مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الأساسية

مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 48 . العدد 8

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
من التحويل الثلاثي إلى الأحادي: استراتيجية مهجنة جديدة لحل بعض معادلات فريدهولم التفاضلية – التكاملية	آلاء محمود حمادة أ.د. خليل يحيى	36-11
حساب طاقة تنشيط تفاعل حماية الحديد من التآكل باستخدام سالسيلات الصوديوم	د. باسل علي علي	58-37
استخدام قشور بذور المشمش وبعض المخثرات اللاعضوية ودراسة فعاليتها في تخفيض عكارة المياه	بنان الحسو د. محمد أسعد	78-59
دراسة تجريبية لتأثير هول الكمومي في طبقات ثنائي كبريتيد المولبديوم (MoS_2) عند درجات الحرارة المنخفضة في المجال الحراري (90-270 K)	د. حسين الحسين + د. جاسم الفواز + د. لمى الشب + د. قيصر اليماني + د. عدي الابراهيم	110-79

من التحويل الثلاثي إلى الأحادي: استراتيجية مهجنة جديدة لحل بعض معادلات فريدهولم التفاضلية – التكاملية

(1) أ.د. خليل يحيى

(2) آلاء محمود حمادة

جامعة دمشق – كلية العلوم– قسم الرياضيات

الملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير إطار تحليلي–عددي مهجّن يجمع بين التحويل الثلاثي العام وطريقة تحليل أدوميان لمعالجة صنف واسع من معادلات فريدهولم التفاضلية–التكاملية الخطية غير الخطية. تعتمد المنهجية المقترحة على توظيف تقنية التوسيع الدالي التي تمكّن من إسقاط المسألة متعددة الأبعاد إلى صيغة أحادية المتغير، مما يسمح باختزال التحويل الثلاثي العام إلى تحويل أحادي أكثر بساطة وكفاءة حسابية. بعد ذلك، يتم تطبيق طريقة أدوميان لتحليل الجزء غير الخطي من المعادلة عبر تمثيل الحل على شكل متسلسلة لا نهائية من حدود قابلة للحساب بشكل تكراري.

تتميّز هذه المقاربة بقدرتها على التعامل مع غير الخطية دون الحاجة إلى خطيّة أو افتراضات تبسيطية، كما توفر تقارباً سريعاً نحو الحلول الدقيقة. وللتحقق من فعالية الطريقة، تم تطبيقها على عدة مسائل نموذجية من معادلات فريدهولم من النوع الثاني، حيث أظهرت النتائج توافقاً تاماً مع الحلول التحليلية المعروفة، مع كفاءة عالية في تقليل الجهد الحسابي.

تشير النتائج إلى أن المنهجية المقترحة تمثل أداة قوية ومرنة يمكن توظيفها في حل طيف واسع من المسائل الفيزيائية والهندسية التي تُصاغ على شكل معادلات تفاضلية–تكاملية خطية وغير خطية.

الكلمات المفتاحية: طريقة أدوميان، التحويل الثلاثي العام، التحويل الأحادي، معادلات فريدهولم التفاضلية–التكاملية.

From Triple to Single Integral Transform: An Advanced Hybrid Strategy for Solving Nonlinear Fredholm Integro-Differential Equations

Abstract

This paper presents a novel hybrid analytical–numerical framework that combines the General Triple Integral Transform with the Adomian Decomposition Method for solving a broad class of linear and nonlinear Fredholm integro-differential equations. The proposed approach is based on an extension technique that enables the transformation of multi-dimensional problems into an equivalent one-dimensional formulation, allowing the triple transform to be effectively reduced to a simpler single integral transform.

The nonlinear components are then systematically handled using the Adomian decomposition technique, where the solution is expressed as a rapidly convergent infinite series. One of the key advantages of the proposed method is its ability to treat nonlinear terms directly without requiring linearization or restrictive assumptions.

To demonstrate the efficiency and accuracy of the method, several test problems are considered. The obtained results show excellent agreement with the exact solutions, confirming the validity and robustness of the proposed approach. The method also exhibits fast convergence and reduced computational complexity compared to traditional techniques.

The findings suggest that the proposed hybrid technique provides a powerful and flexible tool for solving a wide range of linear and nonlinear integro-differential equations arising in applied mathematics, physics, and engineering.

Keywords: Adomian Decomposition Method ,General Triple Transform, Single Integral

Transform, Fredholm Integro-Differential Equations.

1-المقدمة:

تشكل المعادلات التفاضلية-التكاملية $(Integro-Differential\ Equations)$ ركيزة أساسية في العديد من المجالات العلمية مثل الفيزياء والهندسة، تظهر هذه المعادلات في مختلف المجالات المتنوعة مثل الاقتصاد، ديناميكيات المفاعلات، نمذجة البيئة، هندسة الطيران، الانظمة البيولوجية والكيميائية وغيرها [1]

نظراً لتعقيد هذه المعادلات، وخاصة غير الخطية منها، التي تزيد من صعوبة الحصول على الحلول الدقيقة، اتجه الباحثون الى تطوير العديد من الطرق التحليلية وشبه، مثل طريقة تحليل أدوميان (ADM)[2]، وطريقة أدوميان لابلاس $(LADM)$[3]، وطريقة الاضطراب الهوموتوبي (HPM)[4]، وطريقة التكرار المتحولي المعدلة $(MVIM)$[5].

تبرز طريقة أدوميان (ADM)[6] التي قدمها الباحث الأمريكي جورج أدوميان[6]، كتقنية حسابية واعدة لمعالجة غير الخطية المتأصلة في معادلات فريدهولم التفاضلية-التكاملية.

ظهر في السنوات الأخيرة، ظهر توجه بحثي جديد يهدف الى تعميم التحويلات التكاملية في اطار موحد، قدمت $Saadeh$[7] التحويل الثلاثي العام $\mathcal{T}_3$ الذي يحتوي على معظم التحويلات الأحادية والثنائية والثلاثية كحالات خاصة.

يتميز هذا التحويل بكفاءته وسهولة استخدامه، مما يجعله أداة واعدة لحل معادلات فريدهولم التفاضلية-التكاملية غير الخطية.

2- الهدف من البحث:

تطبيق خوارزمية $TGADM$ لحل صنف واسع من المعادلات التفاضلية–التكاملية الخطية وغير الخطية.

3- تعاريف أساسية:

3-1: تعطى مسألة القيم الابتدائية والممثلة بمعادلة فريدهولم التفاضلية–التكاملية غير الخطية من المرتبة n[1]:

$$u^{(n)}(x) = f(x) + \lambda \int_a^b k(x,t)\, F\big(u(t)\big)dt \qquad (1)$$

والمزودة بالشروط الابتدائية الآتية:

$$u^{(k)}(0) = \alpha_k \quad , k = \overline{0, n-1}$$

حيث $f(x)$ دالي تحليلي معلوم، $k(x,t)$ نواة المعادلة، $F(u(t))$ دالي غير خطي.

3-2 تعريف التحويل الثلاثي العام:[7]

$$G_T(s,u,v) = \mathcal{T}_3[g(x,y,z)]$$

$$= p_1(s)p_2(u)p_3(v) \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty g(x,y,z)\, e^{-q_1(s)x - q_2(u)y - q_3(v)z} dxdydz \qquad (2)$$

حيث $g(x,y,z)$ دالي مستمر لكل من $z > 0$ و $y > 0$ و $x > 0$

4- بعض خواص التحويل الثلاثي العام :[7]

4-1- الخاصية الخطية:

$$\mathcal{T}_3[\alpha g(x,y,z)+\beta h(x,y,z)]=\alpha\mathcal{T}_3[g(x,y,z)]+\beta\mathcal{T}_3[h(x,y,z)]$$
$$=\alpha G_T(s,u,v)$$
$$+\beta H_T(s,u,v) \qquad (3)$$

4-2- خاصية الالتفاف:

$$g(x,y,z)\ ***\ h(x,y,z)=\int_0^x\int_0^y\int_0^z g(x-a,y-b,z-c)h(a,b,c)\,dadbdc$$

$$\mathcal{T}_3[g(x,y,z)\ ***\ h(x,y,z)]$$
$$=\frac{1}{p_1(s)p_2(u)p_3(v)}G_T(s,u,v)H_T(s,u,v) \qquad (4)$$

4-3- التحويل الثلاثي العام لمشتق التابع $g(x,y,z)$ من المرتبة n:

يعطى التحويل الثلاثي العام لمشتق التابع على الشكل الآتي:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial g(x,y,z)}{\partial x}\right]$$
$$=q_1(s)G_T(s,u,v)$$
$$-p_1(s)G_D(0,u,v) \qquad (5)$$

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^2 g(x,y,z)}{\partial x^2}\right]$$
$$=q_1^2(s)G_T(s,u,v)-q_1(s)p_1(s)G_D(0,u,v)$$
$$-\frac{p_1(s)\partial G_d(0,u,v)}{\partial x} \qquad (6)$$

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^n g(x,y,z)}{\partial x^n}\right]$$
$$=q_1^n(s)G_T(s,u,v)$$
$$-\sum_{k=1}^{n}q_1^{n-k}(s)p_1(s)\frac{\partial^{k-1}G_D(0,u,v)}{\partial x^{k-1}} \qquad (7)$$

تجدر الإشارة الى أن التحويل الثلاثي العام يختزل الى التحويلين الأحادي والثنائي عند التعامل مع دوال ذات أبعاد اقل وفق العلاقتين الآتيتين:

$$G_T(s,0,0) = G_s(s), G_T(s,u,0) = G_D(s,u) \quad (8)$$

حيث أن G_s هو التحويل الأحادي العام، G_D هو التحويل الثنائي العام، وبناءً على ذلك عند تطبيق $\mathcal{T}_3$ على معادلة ذات متغير أحادي، يُختزل جبرياً الى التحويل الأحادي العام.

5- التحويل الثلاثي العام العكسي:[7]

$$\mathcal{T}_3^{-1}[G(s,u,v)] = \mathcal{T}_x^{-1}\mathcal{T}_y^{-1}\mathcal{T}_z^{-1}[G_T(s,u,v)] = g(x,y,z) \quad (9)$$

$$= \frac{1}{2\pi i}\int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{1}{p_1(s)} e^{q_1(s)x} q'_1(s)\, ds \frac{1}{2\pi i}\int_{b-i\infty}^{b+i\infty} \frac{1}{p_2(u)} e^{q_2(u)y} q'_2(u)\, du \frac{1}{2\pi i}\int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \frac{1}{p_3(v)} e^{q_3(v)z}$$

6- التحويل الأحادي العام:[7, 8]

$$G_s(s) = \mathcal{T}_1[g(x)] = p_1(s)\int_0^\infty g(x)e^{-q_1(s)x}\, dx \quad (10)$$

7- خواص التحويل الأحادي العام:[8]

7-1-الخاصة الخطية:

$$\mathcal{T}_1[\alpha g(x) + \beta h(x)] = \alpha\mathcal{T}_1[g(x)] + \beta\mathcal{T}_1[h(x)] \quad (11)$$

7-2- التحويل الأحادي العام لمشتق التابع $g(t)$ من المرتبة n:

ليكن $\mathcal{T}_1\{g(t)\} = G_s$ عندئذٍ:

$$\mathcal{T}_1[g'(t)] = q_1(s)G_s - p_1(s)g(0) \quad (12)$$

$$\mathcal{T}_1[g''(t)] = q_1^2(s)G_s - q_1(s)p_1(s)g(0) - p_1(s)g'^{(0)} \quad (13)$$

$$\mathcal{T}_1\left[g^{(n)}(t)\right] = q_1^n(s)G_s - \sum_{k=1}^{n} q_1^{n-k}(s)p_1(s)g^{(k-1)}(0) \quad (14)$$

$$\mathcal{T}_1[g(t-a)H(t-a)] = e^{-q_1(s)a}G_s(s) \quad (15)$$

7-3- خاصية الالتفاف:

إذا كان $G_s(s) = \mathcal{T}_1[g(t)]$ و $H_s(s) = \mathcal{T}_1[h(t)]$ فإن:

$$\mathcal{T}_1[(g*h)(t)] = \frac{1}{p_1(s)}G_s(s)H_s(s) \quad (16)$$

حيث أن $(g*h)(t) = \int_0^t g(t-x)h(x)dx$

7-4- التحويل الأحادي العام لتكامل تابع $G(t)$:

$$\mathcal{T}_1\left[\int_0^t g(t)\,dt\right] = \frac{1}{q_1(s)}G_s \quad (17)$$

8- التحويل الأحادي العام العكسي:[8]

ليكن G_s التحويل الأحادي العام للتابع $g(t)$، نسمي $g(t)$ بالتحويل الأحادي العام العكسي للتابع G_s، ونعبر عن ذلك رياضياتياً بالشكل الآتي:

$$g(t) = \mathcal{T}_1^{-1}[G_s] = \frac{1}{2\pi i}\int_{a-i\infty}^{a+i\infty} \frac{1}{p_1(s)} e^{q_1(s)t} q'_1(s) G_s \, ds \qquad (18)$$

$$p_1(s) \neq 0 \, , s \in \mathbb{C}$$

9- يبين الجدول الآتي التحويلين (الأحادي والثلاثي) لبعض التوابع الشهيرة:

$g(t)$	$\mathcal{T}_1[g(t)] = G_s(s)$	$g(x,y,z)$	$\mathcal{T}_3[g(x,y,z)] = G_T(s,u,v)$
$a \in R$	$ap_1(s)/q_1(s)$	$a \in R$	$\frac{ap_1(s)}{\frac{q_1(s)p_2(u)}{q_2(u)p_3(v)}}/q_3(v)$
t	$p_1(s)/q_1^2(s)$	xyz	$\frac{p_1(s)}{\frac{q_1^2(s)p_2(u)}{q_2^2(u)p_3(v)}}/q_3^2(v)$
e^{at}	$\frac{p_1(s)}{q_1(s)} - a$	$e^{ax+by+cz}$	$\frac{p_1(s)}{q_1(s)} - \frac{ap_2(u)}{q_2(u)} - \frac{bp_3(v)}{q_3(v)} - c, q_1(s) > a, q_2(u) > b, q_3(v) > c$
$\cos at$	$\frac{p_1(s)q_1(s)}{q_1^2(s)} + a^2$	$\cos ax \cos by \cos c$	$\frac{p_1(s)q_1(s)}{q_1^2(s)} + \frac{a^2p_2(u)q_2(u)}{q_2^2(u)} + \frac{b^2p_3(v)q_3(v)}{q_3^2(v)} + c^2$
$\sin at$	$\frac{ap_1(s)}{q_1^2(s)} + a^2$	$\sin ax \sin by \sin cz$	$\frac{ap_1(s)}{q_1^2(s)} + \frac{a^2bp_2(u)}{q_2^2(u)} + \frac{b^2cp_3(v)}{q_3^2(v)} + c^2$

t^{α}	$p_1(s)\Gamma(\alpha+1)/q_1^{\alpha+1}(s)$	$x^{\alpha}y^{\beta}z^{\gamma}$	$\frac{p_1(s)p_2(u)p_3(v)\Gamma(\alpha+1)}{\frac{q_1^{\alpha+1}(s)\Gamma(\beta+1)}{\frac{q_2^{\beta+1}(u)\Gamma(\gamma+1)}{q_3^{\gamma+1}(v)}}}, \forall \alpha, \beta > -1$
$g'(t)$	$q_1(s)G_s(s) - p_1(s)g(0)$	$f(x)$	$\frac{F_s(s)p_2(u)}{q_2(u)p_3(v)}/q_3(v)$

10- تقنية التهجين المقترحة لطريقة تحليل أدوميان باستخدام التحويل الثلاثي العام:

لتكن معادلة فريدهولم التفاضلية–التكاملية غير الخطية الآتية:

$$u^{(n)}(x) = f(x) + \lambda \int_a^b k(x,t)\, F\big(u(t)\big)dt, \quad a \le x \le b \qquad (19)$$

بغية التمكن من تطبيق التحويل الثلاثي العام $\mathcal{T}_3$ على معادلة أحادية المتغير، يستخدم الدالي الموسع في الفضاء الثلاثي الأبعاد والذي يختزل رياضياتياً إلى التحويل الأحادي العام بالشكل الآتي:

$$u(x,y,z) = u(x) \quad , \quad \forall y,z > 0$$

بتطبيق التحويل الثلاثي العام على طرفي المعادلة (19) واستبدال $u(x)$ بالتابع $U(x,y,z)$، نجد أن:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^n U}{\partial x^n}\right] = \mathcal{T}_3[f(x)] + \lambda \mathcal{T}_3\left[\int_a^b k(x,t)F(U(t,y,z))dt\right]$$

يعبر عن التحويل المشتق من المرتبة n

$$\mathcal{T}_3\left(\frac{\partial^n U}{\partial x^n}\right) = q_1^n(s)G_{\mathcal{T}}(s,u,v) - \sum_{k=1}^{n} q_1^{n-k}(s)p_1(s)\frac{\partial^{k-1}G_D(0,u,v)}{\partial x^{k-1}}$$

حيث أن $G_T(s,u,v) = \mathcal{T}_3[U(x,y,z)]$

$$G_D(0,u,v) = \mathcal{T}_2[U(0,y,z)]$$

$$\left[\frac{\partial^{k-1}U(0,y,z)}{\partial x^{k-1}}\right]\mathcal{T}_2 = \frac{\partial^{k-1}G_D(0,u,v)}{\partial x^{k-1}}$$

إن العلاقة الأخيرة تمثل التحويل الثنائي العام للمشتق من المرتبة $k-1$ عند $x=0$

وباستخدام خاصية المشتق من المرتبة n للتحويل الثلاثي العام وقسمة طرفي المعادلة على $\frac{p_2(u)p_3(v)}{q_2(u)q_3(v)}$ ، نحصل على معادلة جبرية في فضاء التحويل الأحادي العام بالشكل الآتي:

$$q_1^n(s)\mathcal{T}_1[u(x)] - \sum_{k=1}^{n} q_1^{n-k}(s)\, p_1(s)\, \alpha_{k-1}$$

$$= \mathcal{T}_1[f(x)] + \lambda\mathcal{T}_1 \int_a^b k(x,t)\,\{F(u(t)\}dt$$

بتطبيق التحويل الأحادي العام العكسي $\mathcal{T}_1^{-1}$ ، نحصل على:

$$u(x) = g(x) + \lambda\mathcal{T}_1^{-1}\left[\frac{p_1(s)}{q_1^n(s)}\int_a^b \mathcal{T}_1 k(x,t)\,\mathcal{T}_1\{F(u)\}dt\right]$$

حيث أن $g(x)$ يمثل الحدود الناتجة عن الشروط الابتدائية والحد غير المتجانس $f(x)$.

ووفقاً لطريقة أدوميان يتم تمثيل الحل $u(x)$ على شكل متسلسلة غير منتهية من الحدود بالشكل الآتي:

$$u(x) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(x)$$

بكتابة الدال غير الخطي $F(u)$ على شكل متسلسلة غير منتهية من كثيرات حدود ادوميان بالشكل الآتي:

$$F(u) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m(x)$$

$$A_m = \frac{1}{m!}\frac{d^m}{d\lambda^m}\left[F\left(\sum_{i=0}^{\infty}\lambda^i u_i\right)\right]_{\lambda=0} \quad , m \in \mathbb{N}$$

بتعويض والاصلاح نحصل على العلاقات التكرارية الآتية:

$$u_0(x) = g(x)$$

$$u_{m+1}(x) = \lambda \mathcal{T}_1^{-1}\left[\frac{p_1(s)}{q_1^n(s)}\int_a^b \mathcal{T}_1[k(x,t)]\, A_m(t)dt\right] \quad , m \geq 0$$

وبالتالي حسب طريقة أدوميان، تعطى صيغة الحل النهائي بالشكل الآتي:

$$u(x) = \lim_{N\to\infty}\sum_{m=0}^{N-1} u_m(x)$$

تم برهان التقارب في المرجع[**10**]

11- تقنية الطريقة المقترحة:

بغية توضيح كفاءة ودقة التقنية المقترحة عرضنا عدة تطبيقات:

تطبيق (1):[9]

لتكن مسألة القيم الابتدائية الممثلة بمعادلة فريدهولم التفاضلية–التكاملية الخطية من النوع الثاني الآتية:

$$u'''(x) = \sin x - x - \int_0^{\frac{\pi}{2}} xtu'(t)\,dt \qquad (20)$$

والمزودة بالشروط الابتدائية الآتية:

$$u(0) = 1, u'(0) = 0, u''(0) = -1$$

تجدر الإشارة إلى أن صيغة الحل الدقيق لهذه المسألة تعطى على الشكل $u(x) = \cos x$

بحسب صيغة التحويل الثلاثي العام لدينا: $U(x, y, z) = u(x), \forall y, z > 0$

بتطبيق هذا التحويل على طرفي المعادلة (20)، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^3 U}{\partial x^3}\right] = \mathcal{T}_3[\sin x] - \mathcal{T}_3[x] - \mathcal{T}_3\left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} xtU_t(t, y, z)\,dt\right]$$

وباستخدام خاصية المشتق من المرتبة الثالثة، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^3 U}{\partial x^3}\right] = q_1^3 G_T - q_1^2 p_1 G_D(0) - q_1 p_1 \frac{\partial G_D(0)}{\partial x} - p_1 \frac{\partial^2 G_D(0)}{\partial x^2}$$

وباستخدام الشروط الابتدائية المعطاة في العلاقة الأخيرة، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^3 U}{\partial x^3}\right] = q_1^3 G_T - q_1^2 p_1 \frac{p_2 p_3}{q_2 q_2} + p_1 \frac{p_2 p_3}{q_2 q_3}$$

وباستخدام جدول التحويلات الثلاثية العامة والتعويض والاختزال نحصل على معادلة في فضاء التحويل الأحادي العام على الشكل الآتي:

$$\mathcal{T}_1[u] = \frac{p_1}{q_1} - \frac{p_1}{q_1^3} + \frac{p_1}{q_1^3(q_1^2+1)} - \frac{p_1}{q_1^5}\left(1 + \int_0^{\frac{\pi}{2}} tu'(t)\,dt\right)$$

ومن ثم بتطبيق التحويل الأحادي العام العكسي على طرفي المعادلة الأخيرة، نجد:

$$u(x) = \cos x - \frac{x^4}{24}\left(1 + \int_0^{\frac{\pi}{2}} tu'(t)dt\right)$$

بكتابة الجزء غير الخطي: $C = \sum_{m=0}^{\infty} C_m$ ، $u = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(x)$

$$C_m = \int_0^{\frac{\pi}{2}} t' u_m(t)dt$$

ومنه تنتج العلاقات التكرارية الآتية:

$$u_0(x) = \cos x - \frac{x^4}{24}$$

$$u_{m+1}(x) = -\frac{x^4}{24}C_m\,, m \geq 0$$

$$u_1(x) = 0.05495x^4\,, u_2(x) = -0.01752x^4$$

$$u_3(x) = 0.00559x^4\,\,, u_4(x) = -0.00178x^4$$

$$u_5(x) = 0.00057x^4\,, u_6(x) = -0.00018x^4$$

$$u(x) = \cos x - \frac{x^4}{24}(1 - 1.3188 + 0.4204 - 0.1341 + 0.0428 - 0.0136$$
$$+ 0.00436 - 0.00139 + \cdots) = \cos x - \frac{x^4}{24}(1-1)$$

$$u(x) = \cos x$$

وهو الحل الدقيق للمسألة.

تطبيق (2): [3]

لتكن مسألة القيم الابتدائية الممثلة بمعادلة فريدهولم التفاضلية–التكاملية الخطية من النوع الثاني الآتية:

$$u''(x) = e^x - x + \int_0^1 xtu(t)\,dt \qquad (21)$$

والمزودة بالشروط الابتدائية الآتية:

$$u(0) = 1, u'(0) = 1$$

تجدر الإشارة إلى أن صيغة الحل الدقيق لهذه المسألة تعطى على الشكل: $u(x) = e^x$

بحسب صيغة التحويل الثلاثي العام لدينا:

$$U(x,y,z) = u(x), \quad \forall y,z > 0$$

بتطبيق التحويل الثلاثي العام على طرفي المعادلة (21)، نحصل على:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right] = \mathcal{T}_3[e^x] - \mathcal{T}_3[x] - \mathcal{T}_3\left[\int_0^1 xtU(t,y,z)\,dt\right]$$

باستخدام خاصية تحويل المشتق على طرفي المعادلة الأخيرة:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right] = q_1^2(s)G_T(s,u,v) - q_1(s)p_1(s)G_D(0,u,v) - p_1(s)\frac{\partial G_D(0,u,v)}{\partial x}$$

بحساب $G_D(0,u,v)$ و $\frac{\partial G_D(0,u,v)}{\partial x}$ من الشروط الابتدائية والتعويض في العلاقة الأخيرة، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right] = q_1^2(s)G_T(s,u,v) - q_1(s)p_1(s)\frac{p_2(u)p_3(v)}{q_2(u)q_3(v)} - p_1(s)\frac{p_2(u)p_3(v)}{q_2(u)q_3(v)}$$

وباستخدام جدول التحويلات الثلاثية العامة والتعويض والاختزال نحصل على معادلة في فضاء التحويل الأحادي العام بالشكل الآتي:

$$\mathcal{T}_1[u(x)] = \frac{p_1(s)}{q_1(s)} + \frac{p_1(s)}{q_1^2(s)} + \frac{p_1(s)}{q_1^2(s)(q_1(s)-1)} - \frac{p_1(s)}{q_1^4(s)} + \int_0^1 tu(t)dt\,\frac{p_1(s)}{q_1^4(s)}$$

وبتطبيق التحويل الأحادي العام العكسي على طرفي المعادلة الأخيرة، نجد:

$$u(x) = 1 + x + (e^x - 1 - x) - \frac{x^3}{6} + \frac{x^3}{6}\int_0^1 tu(t)dt$$

بوضع:

$$u(x) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(x)$$

وبما أن $F(u) = u$ خطية فإن حدوديات ادوميان $u_m = A_m$

وبتعويض العلاقات والإصلاح نحصل على العلاقات التكرارية الآتية:

$$u_0(x) = e^x - \frac{x^3}{6}$$

$$u_{m+1}(x) = \frac{x^3}{6}C_m \ , m \geq 0$$

$$C = \int_0^1 tu(t)\,dt$$

$$u_0(x) = e^x - \frac{x^3}{6}, u_1(x) = \frac{x^3}{6}C_0$$

$$C_0 = \int_0^1 t(e^t - \frac{t^3}{6})\, dt = \frac{29}{30}$$

$$u_1(x) = \frac{29}{180}x^3, u_2(x) = \frac{29}{5400}x^3$$

$$u_3(x) = \frac{29}{162000}x^3$$

نلاحظ أن $u_m(x)$ من الشكل:

$$u_m(x) = \frac{x^3}{6} \cdot \frac{29}{30^m}$$

بجمع حدود المتسلسلة:

$$u(x) = u_0(x) + \sum_{m=1}^{\infty} u_m(x) = e^x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^3}{6}\sum_{m=1}^{\infty} \frac{29}{30^m}$$

$$\sum_{m=1}^{\infty} \frac{29}{30^m} = \frac{\frac{29}{30}}{1 - \frac{1}{30}} = 1$$

ومنه نجد الحل الدقيق للمسألة المعطاة:

$$u(x) = e^x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^3}{6} \cdot 1 = e^x$$

تطبيق (3):[11]

لتكن مسألة القيم الابتدائية الممثلة بمعادلة فريدهولم التفاضلية–التكاملية غير الخطية من النوع الثاني الآتية:

$$u'(x) = \cos x - \frac{\pi x}{48} + \frac{1}{24}\int_0^{\pi} xu^2(t)\,dt \qquad (22)$$

والمزودة بالشروط الابتدائية الآتية:

$$u(0) = 0$$

تجدر الإشارة إلى أن صيغة الحل الدقيق لهذه المسألة تعطى على الشكل:

$$u(x) = \sin x$$

بحسب صيغة التحويل الثلاثي العام لدينا:

$$U(x, y, z) = u(x), \qquad \forall y, z > 0$$

بتطبيق التحويل الثلاثي العام $\mathcal{T}_3$ على طرفي المعادلة المعطاة (22)، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial U}{dx}\right] = \mathcal{T}_3[\cos x] - \frac{\pi}{48}\mathcal{T}_3[x] + \frac{1}{24}\mathcal{T}_3\left[\int_0^{\pi} xU^2(t, y, z)dt\right]$$

باستخدام خاصية تحويل المشتق، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right] = q_1(s)G_T(s, u, v) - p_1(s)G_D(0, u, v)$$

باستخدام الشرط الابتدائي، نجد:

$$U(0, y, z) = u(0) = 0 \Rightarrow G_D(o, u, v) = 0$$

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right] = q_1(s)G_T(s, u, v)$$

باستخدام جدول التحويلات الثلاثية العامة والتعويض والاختزال نحصل على معادلة في فضاء التحويل الأحادي العام:

$$\mathcal{T}_1[u(x)] = \frac{p_1(s)}{q_1^2(s)+1} - \frac{\pi}{48}\cdot\frac{p_1(s)}{q_1^3(s)} + \frac{\int_0^\pi u^2(t)dt}{24}\cdot\frac{p_1(s)}{q_1^3(s)}$$

بتطبيق التحويل الأحادي العام العكسي على طرفي المعادلة الأخيرة، نجد:

$$u(x) = \sin x - \frac{\pi}{96}x^2 + \frac{x^2}{48}\int_0^\pi u^2(t)\,dt$$

بكتابة الدالي:$u(x) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(x)$ ، ونشر الجزء غير الخطي $u^2(t)$ الى حدوديات ادوميان

$$u^2(t) = \sum_{m=0}^{\infty} A_m(t)$$

$$A_0 = u_0^2, \qquad A_1 = 2u_0u_1, \qquad A_2 = 2u_0u_1 + u_1^2, \cdots$$

بالتعويض والاصلاح نحصل على العلاقات التكرارية الآتية:

$$u_0(x) = \sin x - \frac{\pi}{96}x^2$$

$$u_{m+1}(x) = \frac{x^2}{48}C_m\,, m \geq 0$$

بحساب $A_0(t)$ و C_0 نحصل على التكرار الأول

$$u_1(x) = \frac{x^2}{48}\left(\frac{7\pi}{12} - \frac{\pi^3}{48} + \frac{\pi^7}{46080}\right) = 0.00448x^2$$

$$u_2(x) = \frac{x^3}{48}\cdot\frac{1}{24}\left(\pi^2 - 4 - \frac{\pi^6}{480}\right)\left(\frac{7\pi}{12} - \frac{\pi^3}{48} + \frac{\pi^7}{46080}\right) = -0.00067x^2$$

$$u_3(x) = 2 \times x^2 10^{-6}$$

نلاحظ أن: $-\frac{\pi}{96}+\frac{1}{48}(0.215-0.032+0.0001+\cdots\cdots)=0$

بجمع حدود المتسلسلة :

$$u(x)=\sin x+x^2\left(-\frac{\pi}{96}+\frac{1}{48}\sum_{m=0}^{\infty}C_m\right)$$

$$u(x)=\sin x$$

وهو الحل الدقيق للمسألة المعطاة.

تطبيق (4):[12]

لتكن مسألة القيم الابتدائية الممثلة بمعادلة فريدهولم التفاضلية–التكاملية غير الخطية من النوع الثاني الآتية:

$$u''(x)=\sinh x+x-\int_0^1 x\left(\cos h^2 t-u^2(t)\right)dt \qquad (23)$$

والمزودة بالشروط الابتدائية الآتية:

$$u(0)=0,u'(0)=1$$

تجدر الإشارة إلى أن صيغة الحل الدقيق لهذه المسألة تعطى على الشكل:

$$u(x)=\sinh x$$

بحسب صيغة التحويل الثلاثي العام لدينا:

$$U(x,y,z)=u(x)\,,\forall y,z>0$$

بتطبيق التحويل الثلاثي العام $\mathcal{T}_3$ على طرفي المعادلة المعطاة (23)، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right] = \mathcal{T}_3[\sinh x] + \mathcal{T}_3[x] - \mathcal{T}_3\left[x\int_0^1 \cos h^2\, t\, dt\right] + \mathcal{T}_3\left[x\int_0^1 U^2\,(t)dt\right]$$

باستخدام خاصية تحويل المشتق على طرفي المعادلة الأخيرة، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right] = q_1^2 G_T - q_1 p_1 G_D(0) - p_1 \frac{\partial G_D(0)}{\partial x}$$

باستخدام الشروط الابتدائية، نجد:

$$U(0,y,z) = u(0) = 0 \Longrightarrow G_D(0) = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial x}(0,y,z) = u'(0) = 1 \Longrightarrow \frac{\partial G_D(0)}{\partial x} = \frac{p_2 p_3}{q_2 q_3}$$

$$\Longrightarrow \mathcal{T}_3\left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right] = q_1^2 G_T - p_1 \frac{p_2 p_3}{q_2 q_3}$$

باستخدام جدول التحويلات الثلاثية العامة والتعويض و الاختزال نحصل على معادلة في فضاء التحويل الأحادي العام:

$$\mathcal{T}_1[u] = \frac{p_1}{q_1^2} + \frac{p_1}{q_1^2(q_1^2-1)} + \frac{p_1}{q_1^4}\left(1 - \int_0^1 \cos h^2\,(t)dt + \int_0^1 u^2(t)\,dt\right)$$

بتطبيق التحويل الأحادي العام العكسي، نجد:

$$u(x) = \sinh x - 0.06778x^3 + \frac{x^3}{6}\int_0^1 u^2(t)\,dt$$

بكتابة الدالي المجهول $u(x) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(x)$

$$C = \sum_{m=0}^{\infty} C_m$$

حيث: $C_m = \int_0^1 A_m(t)\,dt$

وبالتعويض نحصل على العلاقات التكرارية الآتية:

$$u_0(x) = \sinh x - 0.06778x^3$$

$$u_{m+1}(x) = \frac{x^3}{6} C_m\,, m \geq 0$$

$$u_1(x) = 0.06305x^3\ \ , u_2(x) = 0.00432x^3$$

$$u_3(x) = 0.000388x^3\,, u_4(x) = 0.000027x^3$$

نلاحظ ان: $(-0.06778 + 0.06305 + 0.00432 + \cdots) = 0$

$$u(x) = \sinh x$$

وهو الحل الدقيق للمسألة المعطاة.

تطبيق(5): [13]

لتكن مسألة القيم الابتدائية الممثلة بمعادلة فريدهولم التفاضلية–التكاملية من نوع البانتوغراف:

$$u'(x) = 1 + x\int_0^1 (6t-4)\,u\left(\frac{t}{2}\right) dt \qquad (24)$$

والمزودة بالشرط الإبتدائي الآتي:

$$u(0) = 0$$

تجدر الإشارة إلى أن صيغة الحل الدقيق لهذه المسألة تعطى على الشكل:

$$u(x) = x$$

بحسب صيغة التحويل الثلاثي العام لدينا:

$$U(x,y,z) = u(x)\ , \forall y,z > 0$$

بتطبيق التحويل الثلاثي العام $\mathcal{T}_3$ على طرفي المعادلة المعطاة (24)، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right] = \mathcal{T}_3[1] + \mathcal{T}_3\left[x\int_0^1 (6t-4)\,U\left(\frac{t}{2},y,z\right)dt\right]$$

باستخدام خاصية تحويل المشتق على طرفي المعادلة الأخيرة، نجد:

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right] = q_1(s)G_T(s,u,v) - p_1(s)G_D(0,u,v)$$

باستخدام الشروط الابتدائية، نجد:

$$U(0,y,z) = u(0) = 0 \Longrightarrow G_D(0,u,v) = 0$$

$$\mathcal{T}_3\left[\frac{\partial u}{\partial x}\right] = q_1(s)G_T(s,u,v)$$

باستخدام جدول التحويلات الثلاثية العامة والتعويض و الاختزال نحصل على معادلة في فضاء التحويل الأحادي العام:

$$\mathcal{T}_1[u] = \frac{p_1(s)}{q_1^2(s)} + \frac{p_1(s)}{q_1^3(s)}\int_0^1 (6t-4)u(\frac{t}{2})dt$$

بتطبيق التحويل الأحادي العام العكسي، نجد:

$$u(x) = x + \frac{x^2}{2}\int_0^1 (6t-4)u(\frac{t}{2})dt$$

وفقاً لطريقة أدوميان نكتب الحل على شكل متسلسلة بالعلاقة الآتية:

$$u(x) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m(x)$$

$$u_0(x) = x$$

$$u_{m+1}(x) = \frac{x^2}{2} C_m, m \geq 0$$

حيث: $C_m = \int_0^1 (6t-4) u_m\left(\frac{t}{2}\right) dt$

$$u_0\left(\frac{t}{2}\right) = \frac{t}{2}$$

$$C_0 = \int_0^1 (6t-4) t \left(\frac{t}{2}\right) dt = 0$$

$$u_1(x) = \frac{x^2}{2} C_0 = 0 \Longrightarrow u_1\left(\frac{t}{2}\right) = 0$$

$$C_1 = \int_0^1 (6t-4) t \frac{t^2}{96} dt = 0$$

$$u_2(x) = \frac{x^2}{2} C_1 = 0$$

نلاحظ أن:

$$u_m(x) = 0, m \geq 1$$

$$\Longrightarrow u(x) = u_0(x) + u_1(x) + \cdots = x$$

وهو الحل الدقيق للمسألة المعطاة.

12- النتائج والتوصيات:

في هذه الدراسة، تم تطوير تقنية مهجنة جديدة تجمع بين التحويل الثلاثي العام وطريقة تحليل أدوميان بهدف معالجة معادلات فريدهولم التفاضلية–التكاملية غير الخطية بكفاءة عالية. أظهرت النتائج أن

استخدام التوسيع الدالي يساهم بشكل فعّال في تبسيط البنية الرياضية للمسألة من خلال اختزالها إلى صيغة أحادية المتغير، مما يسهّل تطبيق أدوات التحليل المختلفة.

كما بيّنت التطبيقات العملية أن الطريقة المقترحة قادرة على إنتاج حلول دقيقة تتطابق تماماً مع الحلول التحليلية المعروفة، مع تحقيق تقارب سريع وتقليل ملحوظ في التعقيد الحسابي. ويُعد هذا الدمج بين التحويلات التكاملية وتقنيات التحليل التكراري خطوة واعدة نحو تطوير أدوات أكثر كفاءة لمعالجة غير الخطية في النماذج الرياضية.

في ضوء هذه النتائج، يمكن توسيع العمل مستقبلاً ليشمل معادلات أكثر تعقيداً مثل المعادلات الكسرية، والمعادلات ذات التأخير الزمني، وكذلك تطبيق الطريقة على مسائل متعددة الأبعاد في الفيزياء والهندسة التطبيقية، مما يعزز من القيمة العلمية والتطبيقية للمنهجية المقترحة.

المراجع:

[1] Eshkuvatov. Z. & Hooi. T. S.(2024). LAPLACE DECOMPOSITION METHOD FOR SOLVING FREDHOLM INTEGRODIFFENTIAL EQUATIONS WITH INITAL VALUE PROBLEMS. Journal of Mathematical Sciences and Informatics,4(3).

[2] Vahidi. A. R, Bablian. E. Cordshooli. G. A. & Azimzadeh. Z.(2009) .Numerical Solution of Fredholm integro differential equation by Adomians decomposition method. International Journal of Mathematical Analysis ,3(33-36), 1769-1773.

[3] AlHayan.W.M.(2013). Solving nth order integro differential equations using the combined Laplace transform Adomian decomposition method.

[4] Eshkuvatov. Z.(2022). New development of homotopy analysis method for nonlinear integro differential equations with initial value problems. Math. Model. comput ,9(4),842-859.

[5] Dawood. L. A, Hamoud. A. A, Ghadle. K. P, & Atshan. S. M. (2019). Usage of the modified Variational iteration technique for solving Fredholm integro differential equations. International Journal of Mechanical and Production Engineering and Development ,9(2), 895-902.

[6] Adomian. G.(2013). Solving frontier problems: the decomposition method Springer Science & Business Media.

[7] Hindawi Journal of Mathematics Valume (2023), Article ID 4512353 , 12 pages https://doi. Org/10.1155/2023/4512353, A Generalized Approach of Triple Integral Transforms and Applications.

[8] Jafar. H. (2021). A new general integral transform for solving integral equations, Journal of Advanced Research,32,133-38.

[9] Al-Saar. F. M &Ghadle. K. P. (2021),Solving nonlinear Fredholm integro differential equations of Some numerical methods .Advances in the Theory of nonlinear Analysis and its Applications,5(2),260-276.

[10] Hosseini, M.,& Nasabzadeh, H.(2006). On the convergence of Adomian decomposition method. Applied mathematics and computation. 182(1). PP: 536-543.

[11] Saha. B. K., Mohiuddin. A. M. & Parua. S. (2017). He's homotopy Perturbation method for Solving Linear and nonlinear Fredholm integro differential equations. International Journal of Theoretical and Applied Mathematics ,3(6), 174.

[12] Manafianheris. J. (2012). Solving the integro differential equations using modified Laplace Adomian decomposition method. Journal of Mathematics Extension,6,41-55.

[13] Iserles,A.(1993). On the generalized pantograh functional−differential equation

European Journal of Applied Mathematics,4(1),1−38.

حساب طاقة تنشيط تفاعل حماية الحديد من التآكل باستخدام سالسيلات الصوديوم

د.باسل علي علي*

ملخص البحث:

تم في هذا البحث دراسة حماية الحديد من التآكل في محلول حمض كلور الماء (0.5M) باستخدام سالسيلات الصوديوم بالاعتماد على طريقة الفاقد الوزني . اختير ملح سالسيلات الصوديوم كمثبط تآكل من اجل تغطية العينات الحديدية وحمايتها لاحتواء هذه الأملاح على ذرات مانحة للإلكترونات وامتلاكها مجموعات فعالة للامتزاز و موجودة بوفرة ورخيصة الثمن ويمكن الحصول عليها بيسر وسهوله اضافة لتمتعها بخواص مضادات اكسدة جيدة، تبين من قياسات الفاقد الوزني أن سالسيلات الصوديوم أبدت فعالية جيدة، لذلك تم دراسة فعالية (كفاءة) تثبيطه عند درجات الحرارة **30°C** . تبين أن زيادة تركيز المثبط يقلل من تآكل الحديد ويزيد كفاءة التثبيط تم حساب المعاملات الحركية: طاقة التنشيط، الانتالبية، الانتروبية. حددت الشروط المثلى لمحاليل الملح السابق إذ كانت (**T=30°C** ، الزمن 72 =ساعة، التركيز = 0.01M).

عولجت العينات الحديدية المدروسة بمحلول المثبط بنفس الشروط المحددة سابقا وتم دراسة تأثير التركيز ودرجة الحرارة ودرس تغير معدل سرعة التآكل لهذه العينات وحساب معاملات التآكل كطاقة التنشيط والانتالبية والانتروبية.

قورنت النتائج لمعدل سرعة التآكل لعينات معالجة بالمثبط مع عينات غير معالجة وكانت قيم معدل سرعة التآكل قبل المعالجة وبعد كما يلي: كان معدل سرعة تآكل العينات الحديدية (قبل المعالجة بالمثبط) خلال زمن غمر 72 ساعة مساوية $0.325\ g/cm^2.h$. اما بعد المعالجة بالمثبط كانت $0.146\ mg/cm^2.h$ بينما كفاءة التثبيط 73%.

كلمات مفتاحية: تآكل، حديد، سالسيلات الصوديوم، مثبط، طاقة تنشيط، كفاءة تثبيط

*حاصل دكتوراه كيمياء لاعضوية ، كلية العلوم ، قسم الكيمياء، جامعة حمص ، سوريا

Calculation of activation energy of the corrosion protection reaction of iron using sodium salicylate

Dr:Bassel Ali Ali*

ABSTRACT

This research investigated the protection of iron from corrosion in 0.5M hydrochloric acid solution using sodium salicylate based on the weight loss method. Sodium salicylate was chosen as a corrosion inhibitor to coat and protect iron samples because it is abundant, inexpensive, readily available, and possesses good antioxidant properties. Weight loss measurements showed that sodium salicylate exhibited good effectiveness. Therefore, its inhibition efficiency was investigated at 30°C. Increasing the inhibitor concentration was found to reduce iron corrosion and increase the inhibition efficiency. The kinetic parameters (activation energy, enthalpy, and entropy) were calculated. The optimal conditions for the salt solutions were determined to be T = 30°C, time = 72 hours, and concentration = 0.01M. The studied iron samples were treated with the inhibitor solution under the same conditions previously defined. The effect of concentration and temperature was investigated, and the change in the corrosion rate of these samples was studied. Corrosion coefficients such as activation energy, enthalpy, and entropy were calculated.

The results for the corrosion rate of the inhibitor-treated samples were compared with those of untreated samples. The corrosion rate values before and after treatment were as follows: The corrosion rate of the iron samples (before inhibitor treatment) during a 72-hour immersion period was 0.325 mg/cm²/h, while after inhibitor treatment it was 0.146 mg/cm²/h, with an inhibition efficiency of 73%.

Keywords: Corrosion, iron, sodium salicylate, inhibitor, activation energy, inhibition efficiency

*Holds a PhD in Inorganic Chemistry, Faculty of Science, Department of Chemistry, University of Homs, Syria

مقدمة:

يعرف التآكل أنه انحلال المعدن بسبب تفاعله مع الوسط الذي يتعرض له ويعرف أحيانا بأنه العملية العكسية لاستخلاص المعدن من خاماته [1].

يحدث تآكل بعض المعادن بنتيجة التفاعلات الكيميائية أو الكهروكيميائية بين المعادن وبيئتها، يمثل تآكل المواد المعدنية واحدة من أكبر المشاكل الكبيرة في الصناعة. وتؤدي إلى تلوث البيئة وتشكل خطراً على سلامة الإنسان [2]، ولهذا السبب كانت الحماية من التآكل أمر بالغ الأهمية للحد من الأثر الاقتصادي للتآكل، وتقليل التلوث البيئي الناجم عن تآكل خطوط انابيب النفط أو انابيب الغاز وناقلات النفط. حيث يكون لها تأثير ضار جداً على البيئة من تلوث المياه والهواء[3].

تآكل الحديد واحد من أهم المشاكل التي تواجه دول العالم كما في جسور المناطق الساحلية والمنشآت المعدنية المعرضة للمياه الحاوية على الكلوريدات التي تسبب تشكل أكاسيد الحديد والتي ينتج عنها عدة اضرار ذات مردود اقتصادي سيء ففي الولايات المتحدة الأمريكية مثلا حصرت تكلفة الصدأ السنوية في العقد السابق بحوالي 150 مليون دولار نتيجة لمشاكل الصدأ في المباني والجسور والتي تحدث في أمريكا وأوربا نتيجة إذابة الجليد باستخدام الملح[4]. وفي المملكة المتحدة أيضاً تقدر تكلفة إصلاح الجسور نتيجة للصدأ في حديد التسليح بحوالي 616 مليون جنيه إسترليني وهذا بإنكلترا وويلز فقط وهذا يشكل 10% فقط من إجمالي الجسور في المملكة المتحدة.

ينجم عن عملية التآكل هذه اضرار عدة نذكر منها:

- تغيير الأبعاد وفقدان الخواص الميكانيكية
- المظهر: يتأثر مظهر المعدن بدرجة كبيرة عند إصابته بالتآكل وفي الغالب لا يسر مظهر التآكل عين الناظر.
- الأضرار الاقتصادية بسبب الإجراءات الوقائية.
- تلوث المنتجات: نواتج التآكل تؤدي إلى تغيير الطبيعة الكيميائية للوسط الذي تلوثه.
- فقدان السلامة: يؤدي التآكل إلى حصول كوارث إذا لم تتخذ الإجراءات الوقائية الكفيلة بإيقافها والحد منها[5].

أصبح ضرورياً تكريس المزيد من الانتباه لتآكل المعادن في الوقت الحاضر عما كان عليه سابقاً، نظراً لزيادة استخدام المعادن في جميع مجالات التكنولوجيا، الأمر الذي أوجد بيئة أكثر تآكلًا للمعادن وزيادة تلوث الهواء والماء، كما إن استخدام التطبيقات الخاصة في مجال الطاقة الذرية من المعادن النادرة والمكلفة زاد معدل التآكل أكثر وأكثر. تتراوح تكاليف التآكل في معظم البلدان الصناعية بين(2– 4)% من الناتج القومي الاجمالي للبلدان الصناعية، فكان لابد من اتخاذ تدابير مفيدة اقتصادياً لتقليل التآكل الى أدنى حد ممكن[6]. يعد الحديد اللين أكثر أشكال الحديد المستخدم على نطاق واسع في مختلف

القطاعات الصناعية وكمادة إنشائية في العديد من الصناعات بسبب خصائصه الاقتصادية والتقنية والميكانيكية الممتازة وتكلفته المنخفضة كصناعة خطوط أنابيب البترول واوعية التفاعل وصهاريج التخزين والبطاريات الكيميائية [7].

1-1 مثبطات التآكل Corrosion Inhibitors

تؤدي المحاليل الحمضية ولاسيما الحموض القوية مثل حمض كلور الماء التي تستخدم على نطاق واسع في الصناعات لأغراض كثيرة منها التنظيف الصناعي وازالة الترسبات وتحميض ابار النفط، تؤدي لتآكل المعادن فكان لابد من ايجاد حلول لحماية السطوح ضد اوساط التآكل وخاصة في البيئات الحمضية [8]، وهناك أربع طرق اساسية لمكافحة وتخفيض التآكل:

1- الحماية بالطلاء: تقنية التحكم في التآكل الاكثر استخداماً، وهي عزل المعدن عن الوسط الآكل بطبقة رقيقة مقاومة للوسط بهدف حمايته من التآكل[9]. من خلال تغطيته بمعدن آخر مقاوم للتآكل أو التغطية بمادة لا عضوية أو عضوية.
2- الحماية الكاثودية: تمثل ربط المعدن المراد حمايته بدارة كهربائية خارجية إذ يصبح المعدن كاثود(قطب سالب) وفي الطرف الاخر من الدارة انود (قطب موجب)[10].
3- الحماية الانودية: تقنية كهروكيميائية لمنع تآكل المعدن في بيئات أكالة مثل حمض كلور الماء وحمض الكبريت. وتعتمد على تعرض المعدن أو السبيكة لتيار أنودي يؤدي الى تكوين طبقة من الأكاسيد السلبية الواقية على سطحه تقلل من معدل التآكل [11].
4- مثبطات التآكل: مواد كيمياوية تضاف بنسب ضئيلة جداً الى وسط التفاعل تعمل على اعاقة التآكل وتحاول ايقافه وذلك بإزالة المواد المسببة للتآكل من الوسط أو تكوين طبقة عزل واقية بين المعدن والوسط، تعمل المثبطات على تغيير سلوك المعدن في الوسط وبالتالي تأخير أو ازالة التفاعلات التآكلية، فالسيطرة على تآكل المعادن له أهمية تقنية واقتصادية وبيئية وجمالية، واستخدام المثبطات هي واحدة من أفضل الخيارات لحماية المعادن والسبائك ضد التآكل وتقسم لقسمين

مثبطات عضوية: مركبات كيميائية يكون الكربون أساسها، تعمل على حماية المعادن من التآكل عن طريق الامتزاز على السطح وتكوين طبقة رقيقة كارهة للماء تُستخدم بكثرة في الصناعات النفطية، معالجة المياه، والطلاءات لحماية الصلب والنحاس، وتتميز بفعاليتها العالية في الأوساط الحمضية، وتقسم الى:

- الأمينات :خاصة الأمينات الدهنية.
- مركبات النيتروجين غير المتجانسة :مثل الإيميدازولين والتريازول.

- مركبات الكبريت :مثل الثيوريا، الكحول الثيولي، والثيول.
- الحموض الكربوكسيلية العضوية ومركباتها :كالكربوكسيلات والسالسيلات والبنزوات[12].

مثبطات لاعضوية: هي مركبات تُضاف بتراكيز منخفضة إلى الأوساط الأكالة لحماية المعادن . تعمل بشكل رئيسي عن طريق تكوين طبقة رقيقة ومستقرة (فيلم تخميل) على سطح المعدن، مما يعزز مقاومته للتآكل الكهروكيميائي ويقلل من سرعته. نذكر منها

نتريت الصوديوم :مثبط شائع للحديد والفولاذ.

- الفوسفات والبولي فوسفات :تُستخدم بكثرة في معالجة مياه التبريد.
- أكسيد الألومنيوم والتيتانيوم :تُستخدم لتشكيل طبقات حماية.
- المولیبدات، الكرومات، الزنك، هيبوفوسفات الكالسيوم ونترات الكالسيوم

في الأونة الأخيرة تم استبدال العديد من مثبطات التآكل اللاعضوية التقليدية (مثل الكرومات) بمثبطات عضوية أقل سمية وأكثر أماناً وبيئياً[13] .

هنالك ثلاث امور اساسية تُعتَمد في استخدام مثبطات التآكل هي:

اولاً: الثباتية طويلة الأمد والأداء الجيد للمثبط.

ثانياً: تأثير المثبطات على منع تفشي التآكل بعد حدوثه.

ثالثاً: تأثير ايجابي للمثبطات على الخواص الفيزيائية للمعدن.

تؤثر المثبطات على حركية التفاعلات الكهروكيميائية التي تشكل عملية التآكل، معظم المثبطات الفعالة المستخدمة تحتوي ذرات غير متجانسة مثل N،O ، P،S ، والروابط الثلاثية والمضاعفة والحلقات الآروماتية والتي تؤدي الى امتزاز المركبات على سطح المعدن، تتحكم مثبطات التآكل عموماً في عملية التآكل من خلال تشكيل أنواع مختلفة من الطبقات الرقيقة بطرق عدة: كالامتزاز، تشكيل رواسب، تشكيل طبقة سلبية(خمول)على سطح المعدن، تؤخر التآكل عن طريق امتزازها على سطح المعدن مكونة طبقة رقيقة غير مرئية. فالمثبطات تمتز على السطح المعدني عن طريق هجرة جزيئات الماء على السطح وتشكيل حاجز حماية مدمج. وجود زوج من الكترونات الرابطة (π) في جزيئات المثبطات تسهل من عملية نقل الالكترون من المثبطات الى المعدن وتتكون رابطة تساندية متجهة من المثبطات الى السطح المعدني[14] .

تعمل الحموض العضوية (الكربوكسيلية) وأملاحها كمثبطات تآكل للعديد من المواد بالإضافة إلى

كونها صديقة للبيئة، حيث يتميز عملها بامتزاز مجموعة الكربوكسيل على سطح المعدن مما يسمح بتكوين طبقة كارهة للماء والتي توفر الحماية من التآكل كما تعتمد الخواص الكاره للماء للحموض العضوية (الكربوكسيلية) بشكل كبير على طول سلسلة الكربون الخاصة بها [15]. بحيث تصبح أكثر فعالية مع زيادة كرهها للماء حيث تمنع كل العمليات الكاثودية والأنودية بسبب قدرتها العالية على الامتزاز [16].

قام مجموعة من الباحثين بدراسة كفاءة حمض البنزوئيك على الفولاذ المنخفض الكربون، شكل هذا المثبط طبقة سطحية على سطح الفولاذ المذكور عن طريق الامتزاز الالكتروستاتيكي لأنيونات البنزوات وأخّرت هذه الطبقة تآكل المعدن بشكل كبير في محلول حمضي وأظهرت الدراسة أن كفاءة التثبيط تتناسب طردا مع تركيز الحمض وزمن الغمر ودرجة الحموضة [17].

بين مجموعة من الباحثين تأثير مجموعة الحموض الكربوكسيلية كمثبطات تآكل للحديد اللين حيث تمت المقارنة بين حمض الفتاليك وحمض الأوكزاليك وحمض البنزوئيك وحمض الساليسيليك باستخدام المجهر الالكتروني لدراسة سطح الحديد بعد التعرض للمحلول أظهرت النتائج أن الحموض الكربوكسلية لها تأثير مثبط وكان أفضلها حمض الفتاليك وحمض الأوكزاليك أقلها تثبيطاً [18].

أظهرت دراسة أن زيادة طول السلسلة الكربونية تبدي كفاءة تثبيط أعلى حيث درست مجموعة حموض بدءا من 4 ذرات كربون وحتى 14 ذرة حيث كان الحموض الاكبر عددا بذرات الكربون هو المثبط الأفضل[19] .

أهمية وهدف البحث:

تكمن أهمية البحث المقدم في كونه يقدم حلا بديلا عن المثبطات الصنعية السامة لها تأثير تثبيطي جيد لتآكل الحديد ومتوافر وغير مكلف وأقل تلوثا للبيئة ويمكن الحصول عليه بسهولة ويسر. وبحثنا يهدف لاستخدام بعض أملاح الحموض الكربوكسيلية كمثبطات تآكل ودراسة تأثيرها التثبيطي عند تغير تركيز المثبط ودرجة الحرارة

الجزء العملي:

الطرائق والأدوات والتجهيزات

الادوات المستخدمة:

1. ميزان حساس: استخدمنا في بحثنا ميزان حساس بدقةg 0.0001 صيني المنشأ ماركة SUZHUE موديل OEM16

2. سخان مع حساس لتثبيت درجة الحرارة: جهاز صيني المنشأ ماركة YELLOW طراز YUV25
3. فرن كهربائي: صيني المصدر ماركة labs nova طراز TRB-5 يتميز بترموستات مسبق وضبط حرارة من (**c**˚ 200-50) مثالي للحفاظ على حرارة القواطع.
4. حوض زجاجي لغمر العينات: بأبعاد cm (40 × 20 × 30) تستخدم لوضع العينات الحديدية المدروسة بعد ملئها بالماء تحتوي حوامل معدنية تثبت عليها العينات الحديدية محلي الصنع.
5. زجاجيات مخبرية: صينة المصدر ماركة renonlab din

المواد الكيميائية المستخدمة:

1. اوراق صنفرة (برداخ): صينية المصدر ماركة sait بخشونات مختلفة: 70 – 160 – 220 -320
2. قطع الحديد(0.1x2x4cm) نوع ST37 تركيب الحديد هو
   0.04%P , 0.05%S , 0.25-0.4%Mn , 0.08%C , 99.43-99.75% Fe
3. ورق ترشيح، قطن
4. ساليسيلات الصوديوم $C_7\ H_5O_3\ Na$ بنقاوة 99% انتاج شركة (CHEM LAB)
5. اسيتون: صيغته الكيميائية C_3H_6O كتلته المولية 58.08g/mol نقاوته 99.9% درجة غليانه 56.53 °C انتاج شركة Merck
6. حمض كلور الماء:Hydrochloric Acid 36%, Solution_1LitreSRL-INDIA
7. كحول ايتيلي: سوري المصدر شركة سدر 75%

طريقة العمل:

أخذت قطع الحديد نوع ST37 بأبعاد (0.1 x 2 x 4 cm) بمساحة ($16\ cm^2$) الموصوفة بالتركيب:

C	P	S	Mn	Fe
0.08 %	0.04%	0.05 %	0.25-0.4%	99.43-99.75%

وتمت صنفرتها من جديد بورق الصنفرة بدءا من الورق الخشن وصولا للورق الناعم ثم غسل القطع جيدا بالماء المقطر ثم بالكحول بالأسيتون وتجفيفها بالمجفف الكهربائي

تحضير الوسط الآكل:

تم تحضير محلول حمض كلور الماء (0.5 M) من حمض كلور الماء المركز (تركيزه 36%) ، ثم تغطس عينات الحديد المعالجة والغير معالجة بالمثبط ضمن محلول الحمض لفترات زمنية مختلفة من 0–72 ساعة.

تحضير المثبط:

1- سالسيلات الصوديوم: حضرت محاليل سالسيلات الصوديوم المستخدمة في عملية حماية الحديد بتركيز

(0.1M) ببالون معايرة سعة 100 ml لتمام الذوبان ويكمل الحجم بالماء المقطر من ثم حضرت المحاليل الأتية 0.015،0.02، 0.025 M) انطلاقا من المحلول الأصلي المحضر

معالجة عينات الحديد بالمثبط:

عولجت عينات الحديد بالغمر بمحلول سالسيلات الصوديوم بتراكيز مختلفة كخطوة أولى ثم تمت الدراسة السابقة بعد تغيير في درجات الحرارة واخيرا تم الدراسة بترك العينات في الوسط الآكل لفترات زمنية مختلفة، وبعد الغسيل والتجفيف والوزن الدقيق غمرت بمحلول حمض كلور الماء (0.5 M) لأزمنة مختلفة (6–72) ساعة موضحة في الجداول التالية وفي نهاية الاختبارات تم إخراج العينات وغسلها بعناية بالكحول والاسيتون وتجفيفها ووزنها من جديد

بينما عينات الحديد الشاهدة التي لم تعالج بالمثبط توزن وتغمر في محلول حمض كلور الماء (0.5M) لمدة (6–72) ساعة بغياب سالسيلات الصوديوم (المثبط).

تم حساب الفاقد الوزني(mg) ومعدل سرعة التآكل CR ($mg.cm^{-2}.h^{-1}$).[20] ثم حساب كفاءة التثبيط IE% وحساب درجة التغطية لتراكيز مختلفة من المثبط [21] ، من خلال العلاقات الآتية:

$$CR = \frac{W_0 - W}{A.t}$$

حيث w, w_0: وزن قطع الحديد قبل وبعد الغمر (mg)

A: المساحة السطحية لقطعة الحديد (CM^{-2})

t: زمن الغمر (h)

CR, CR_0: معدل سرعة التآكل

بوجود وغياب المثبط ($mg.cm^{-2}.h^{-1}$)

وحيث **Θ** درجة التغطية السطحية

$$IE\% = \frac{CR_0 - CR}{CR_0} * 100$$

$$\theta = \frac{W_0 - W}{W_0}$$

النتائج والمناقشة:

1- دراسة تأثير نوع المثبط:

تم دراسة تأثير الزمن على سلوك التآكل للحديد بوجود وغياب المثبط (سالسيلات الصوديوم) عند ثبات باقي الشروط (تركيز المثبط 0.01M ، زمن الغمر 72 h ،درجة الحرارة 30°C) وتمت المقارنة من خلال قياس الفاقد الوزني

الجدول (1) الفاقد الوزني ومعدل التآكل في غياب المثبط

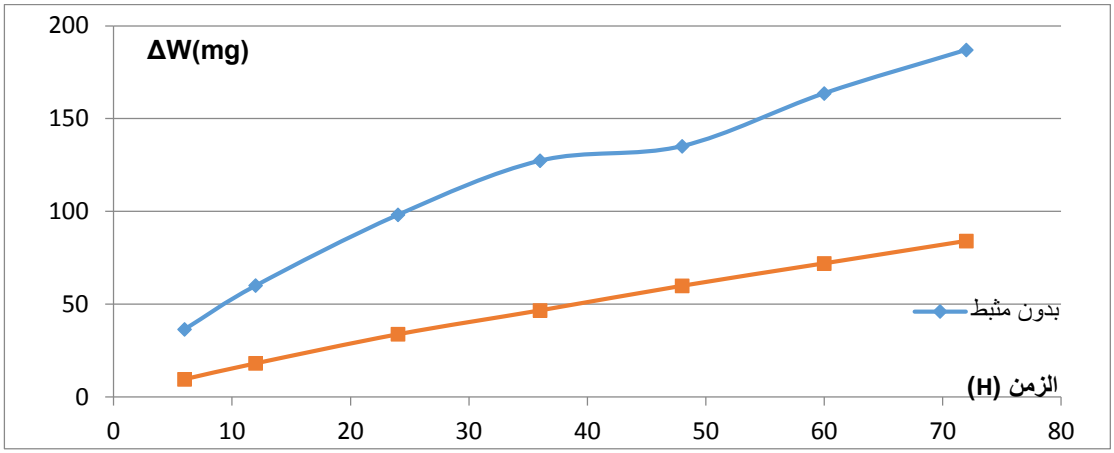
Time (h)	w_0 (mg)	w (mg)	Δw (mg)	$(mg.cm^{-2}.H^{-1})$ CR	LnCR
0	12354	--	--	-----	-----
6	12564	12527	36.48	0.760	−0.274
12	12125	12065	60	0.625	−0.470
24	12487	12388	98.11	0.511	−0.671

36	12365	12237	127.29	0.442	−0.816
48	12879	12743	135.16	0.352	−1.044
60	12159	11995	163.6	0.341	−1.075
72	12432	12244	187	0.325	−1.123

الجدول (2) الفاقد الوزني ومعدل التآكل وكفاءة التثبيط بوجود سالسيلات الصوديوم (0.01M) ودرجة الحرارة30°C

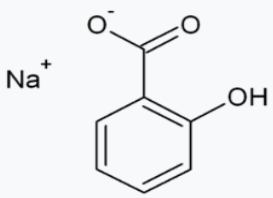
Time(h)	ΔW(mg)	CR mg.cm^{-}) (^{2}.H^{-1}	lnCR	IE%	Θ%
0	---	---	---	----	---
6	9.6	0.200	−1.609	73.68	73.68
12	18.14	0.189	−1.666	69.76	69.7
24	33.79	0.176	−1.737	65.55	65.55
36	46.65	0.162	−1.820	63.34	63.2
48	59.90	0.156	−1.857	55.68	55.1
60	72	0.150	−1.897	56.01	55.8
72	84.09	0.146	−1.924	55.07	55.2

يمكن تلخيص تغيرات الفاقد الوزني (mg) ΔW لعينات الحديد المدروسة السابقة بغياب المثبط وبعد المعالجة بالمثبط (النتائج السابقة) بالشكل رقم (1)



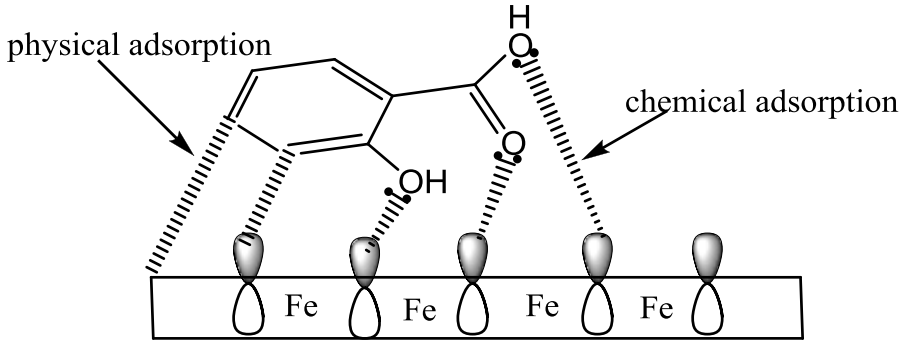
الشكل (1) تغيرات الفاقد الوزني ΔW (mg) عند غياب المثبط وبوجود سالسيلات الصوديوم

سالسيلات الصوديوم



يلاحظ من الشكل (1) زيادة الفاقد الوزني في غياب المثبط المستخدم في هذه الدراسة، أي ارتفاع معدل سرعة التآكل، ويلاحظ دور المثبط في تثبيط تآكل الحديد.

يمكن تفسير الدور الجيد الذي يتميز به المثبط ناتج عن البنية المستوية الناتجة عن الحلقة العطرية عند السالسيلات والتي تسمح بإمكانية التمدد على سطح الحديد ونشوء الروابط الكيميائية بين الأزواج الإلكترونية الحرة عند الأكسجين في الزمرتين الكربوكسيلية والهيدروكسيلية والمدارات الفارغة عند الحديد بالإضافة إلى الروابط الفيزيائية بين الإلكتروناتπ في الحلقة العطرية مع مدارات الحديد [20].



2- دراسة تأثير تركيز المثبط:

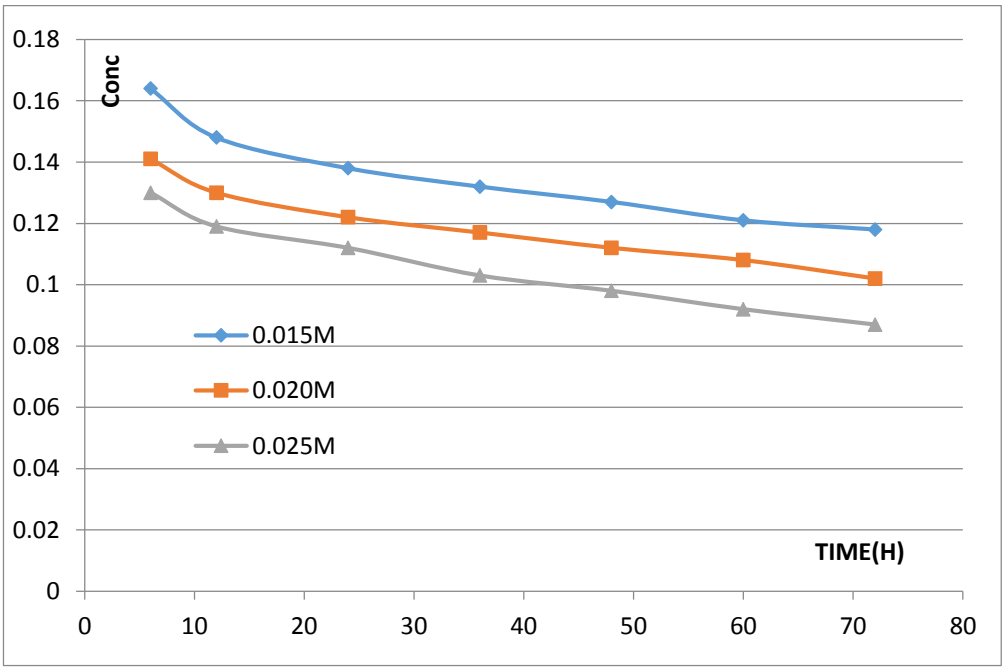
من النتائج السابقة تبين التأثير المثبط الجيد لملح السالسيلات لذا سندرس تأثير تغير التركيز على كفاءة التثبيط حيث حضرنا التراكيز التالية (0.015،0.02، 0.025 M).

ورتبت النتائج التي حصلنا عليها في الجدول رقم (4) ويلاحظ تناقص واضح في معدل التآكل بزيادة تركيز المثبط المستخدم (سالسيلات الصوديوم) يقابله زيادة في كفاءة التثبيط وتغطية أفضل للسطح .

الجدول (4) الفاقد الوزني ومعدل التآكل وكفاءة التثبيط بوجود سالسيلات الصوديوم بتراكيز مختلفة ودرجة الحرارة30°C

Conc	Time (h)	ΔW (mg)	CR (mg.cm-2.h-1)	LnCR	IE%	Θ%
0.015	6	7.78	0.164	−1.807	78.42	78.67
	12	14.20	0.148	−1.910	76.32	76.33
	24	26.49	0.138	−1.980	72.99	72.99
	36	38.01	0.132	−2.024	70.123	70.2
	48	48.76	0.127	−2.063	63.92	63.22
	60	58.08	0.121	−2.111	64.51	64.8
	72	67.96	0.118	−2.137	63.69	64.1
0.02	6	6.76	0.141	−1.958	81.44	80.25
	12	12.48	0.130	−2.040	79.2	79.6
	24	23.42	0.122	−2.103	76.12	77.1
	36	33.69	0.117	−2.145	73.52	73.9
	48	43.00	0.112	−2.189	68.18	69.21
	60	51.84	0.108	−2.225	68.32	68.33

	72	58.75	0.102	−2.282	68.61	68.2
0.025	6	6.24	0.130	−2.04	82.89	82.08
	12	8.92	0.119	−2.128	80.96	81.95
	24	21.50	0.112	−2.189	78.08	79.3
	36	29.66	0.103	−2.273	76.69	77.4
	48	37.63	0.098	−2.322	72.15	74.6
	60	44.16	0.092	−2.385	73.02	72.15
	72	50.11	0.087	−2.441	73.23	72.05



الشكل (2) تغير معدل سرعة التآكل عند تراكيز مختلفة من المثبط (سالسيلات الصوديوم) خلال

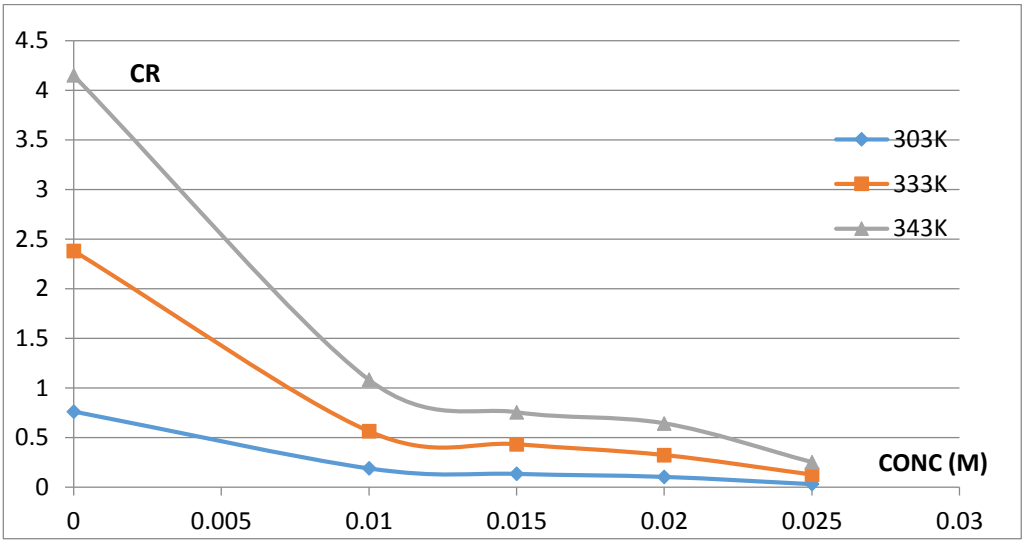
فواصل زمنية

تبين النتائج أن زيادة تركيز سالسيلات الصوديوم تؤدي إلى انخفاض معدل سرعة التآكل وارتفاع كفاءة التثبيط ويعزى ذلك إلى زيادة عدد جزيئات المثبط الممتزة على سطح الحديد مع زيادة التركيز مما يؤدي إلى تشكل طبقة حماية أكثر تجانساً وكثافة على السطح المعدني. كما تؤدي زيادة التغطية السطحية إلى تقليل عدد المواقع الفعالة المتاحة للتفاعل مع الوسط الحمضي وبالتالي انخفاض معدل انحلال الحديد. وتشير هذه النتائج إلى أن عملية التثبيط تعتمد بشكل رئيسي على امتزاز جزيئات المثبط على سطح المعدن.

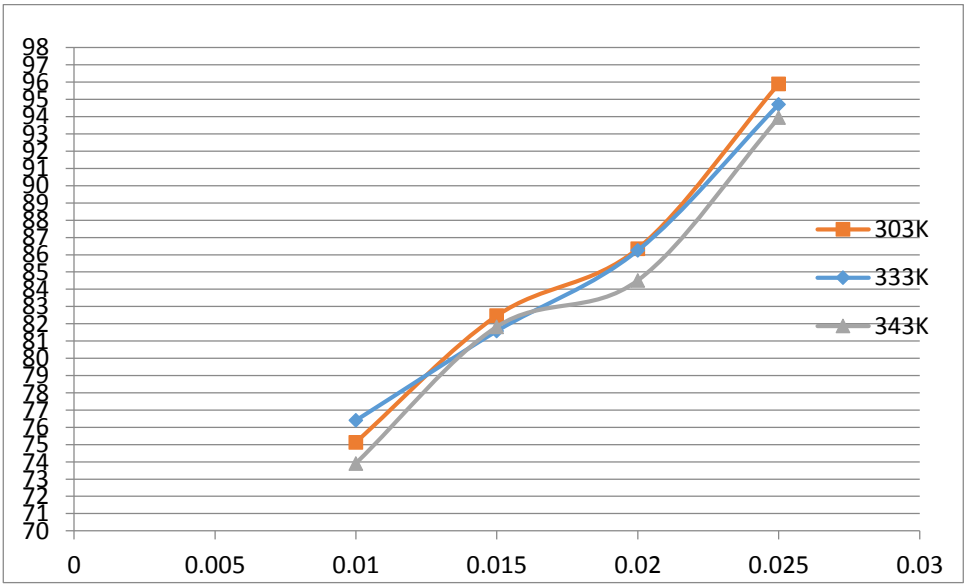
3- **دراسة تأثير درجة الحرارة :** قمنا بدراسة كفاءة التثبيط لسالسيلات الصوديوم عند درجات الحرارة (30-60-70°C) وكان زمن الغمر 6 ساعات حصلنا على النتائج المرتبة في الجدول (5)

الجدول (5) الفاقد الوزني ومعدل التآكل وكفاءة التثبيط بوجود سالسيلات الصوديوم بدرجات الحرارة (30-60-70°C)

تركيز سالسيلات الصوديوم (M)	30 °C		60 °C		70 °C	
	CR ($mg.cm^{-2}.h^{-1}$)	IE%	CR ($mg.cm^{-2}.h^{-1}$)	IE%	CR ($mg.cm^{-2}.h^{-1}$)	IE%
0	0.760	0	2.381	0	4.150	0
0.01	0.188	75.13	0.562	76.4	1.081	73.9
0.015	0.133	82.46	0.431	81.88	0.754	81.82
0.02	0.103	86.35	0.322	86.25	0.642	84.51
0.025	0.03	95.9	0.125	94.71	0.251	93.94



الشكل (3) تغير معدل سرعة التآكل عند درجات حرارة مختلفة



الشكل (4) تغير كفاءة التثبيط عند درجات حرارة مختلفة

يلاحظ من النتائج أن معدل سرعة التآكل يزداد بارتفاع درجة الحرارة في جميع المحاليل المدروسة ويُعزى ذلك إلى زيادة الطاقة الحركية للجزيئات وتسارع التفاعلات الكهروكيميائية المسؤولة عن التآكل.

كما تبين أن كفاءة التثبيط لسالسيلات الصوديوم تنخفض بشكل طفيف مع ارتفاع درجة الحرارة مما يشير إلى حدوث ضعف جزئي في امتزاز جزيئات المثبط على سطح الحديد عند درجات الحرارة المرتفعة نتيجة زيادة عمليات إزالة عمليات الامتزاز.

وعلى الرغم من هذا الانخفاض بقيت كفاءة التثبيط مرتفعة نسبياً عند التراكيز العالية مما يدل على استمرار تشكل طبقة حماية فعالة على سطح المعدن حتى عند درجات حرارة مرتفعة.

4- حساب معاملات التآكل:

تم حساب بعض الخواص الترموديناميكية المصاحبة لدراسات التآكل من خلال دراسة التغير الحاصل في الطاقة الحرة المصاحبة لتفاعل التآكل، لمعرفة تلقائية عملية التآكل من عدمها، وبالتالي عندما يكون التغير في طاقة جبس الحرة له قيم سالبة تكون عملية التآكل تلقائية ومفضلة ترموديناميكياً. يحدد الترموديناميك التوازن كدالة للعناصر والمركبات الحالية والظروف البيئية (الضغط ودرجة الحرارة، والتركيب الكيميائي). يفترض قانون الطبيعة ان الحالة الاكثر استقراراً لمجموعة من التفاعلات هي الحالة الأدنى طاقة حرة، وبالتالي فان الاسطح المعدنية التي تكون في حالة اتصال مع المحلول تميل نحو أدني حالة طاقة حرة ممكنة [22].

تم حساب معاملات التنشيط لعملية التآكل من علاقة أرينوس:

$$CR = AExp\left(\frac{-Ea}{RT}\right), \quad Ln(CR) = LnA - \frac{Ea}{RT}$$

حيث Ea: طاقة التنشيط

R: ثابت الغازات العام ($8.31434\ J.mol^{-1}.K^{-1}$)

A: معامل التردد (العامل ما قبل الأسي)

كما يمكن استخدام علاقة أرينوس بالشكل التالي:

$$CR = \frac{RT}{Nh} Exp\left(\frac{\Delta S_a}{R}\right) Exp\left(\frac{-\Delta H_a}{RT}\right)$$

$$Ln\frac{CR}{T} = Ln\frac{R}{Nh} + \frac{\Delta S_a}{R} - \frac{\Delta H_a}{RT} \qquad (*)$$

حيث C_R :معدل التآكل .

N: عدد أفوغادرو ($6.022.10^{23}mol$)

h: ثابت بلانك ($6.626.10^{-34}$ j.s)

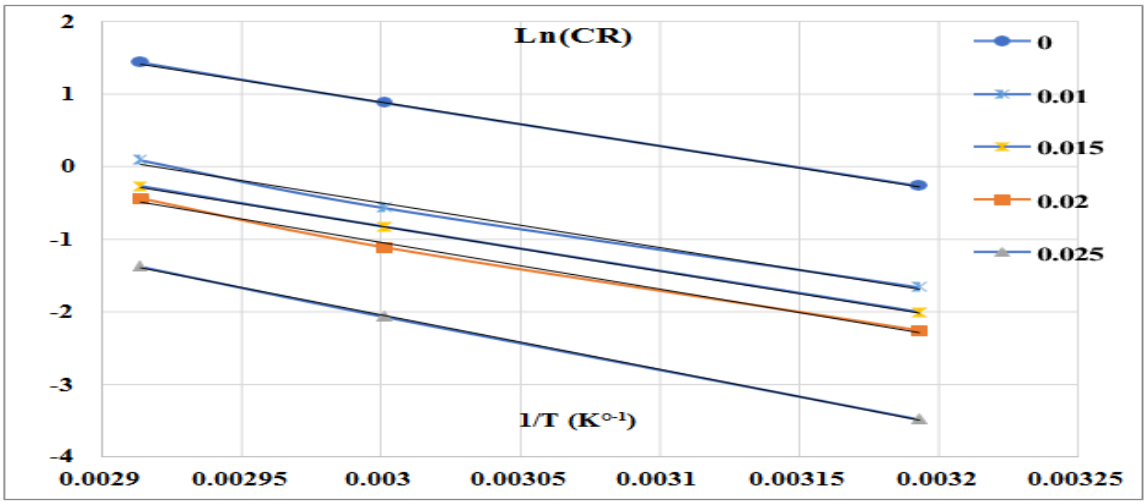
R: ثابت الغازات العام

T : درجة الحرارة المطلقة (K)

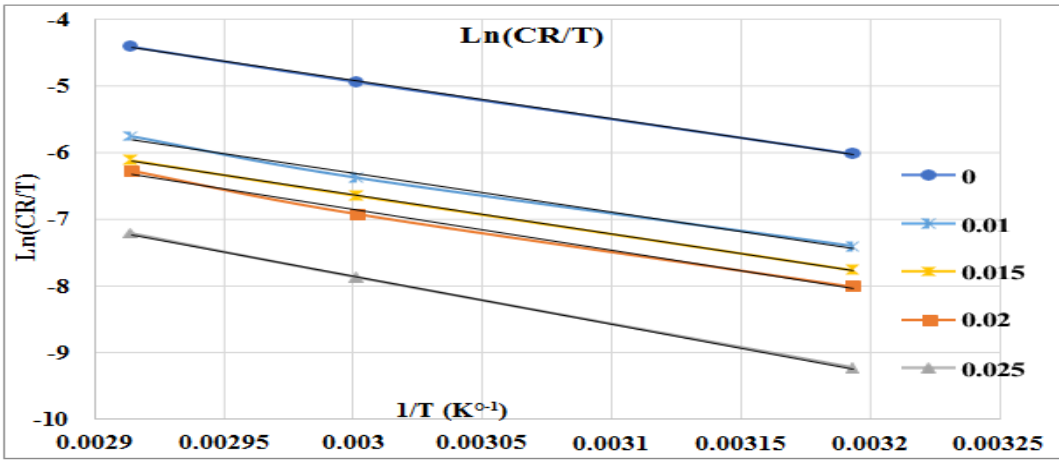
ΔH_a : انتالبية النشيط ،: ΔS_a انتروبية التنشيط

تم الحصول على قيم انتالبية التنشيط وانتروبية التنشيط من المعادلة (*)

عند رسم lnCR/T بدلالة 1/T لتآكل الحديد في HCl (0.5M) بغياب ووجود تراكيز مختلفة من سالسيلات الصوديوم. فإننا نحصل على خط بياني ميله ($-\frac{\Delta Ha}{R}$) ونقطة التقاطع ($\ln\frac{R}{N.h} + \frac{\Delta S}{R}$) فنتمكن من حساب المقادير ΔHa , ΔS [23] .



الشكل (5) مخططات أرينوس عند تراكيز مختلفة من سالسيلات الصوديوم



الشكل (6) مخططات الحالة الانتقالية لمعدلات لتآكل الحديدlncr/t بدلالة 1/t في(0.5m) حمض كلور الماء عند تراكيز مختلفة من سالسيلات الصوديوم

الجدول (6) معاملات التنشيط لتآكل الحديد في (0.1 M) HCl عند تراكيز مختلفة من سالسيلات الصوديوم

Conc.S.Na (M)	Ea (kJ/mol)	ΔHa (kJ/mol)	ΔSa (J/mol K)	Ea – ΔHa (J/mol K)
0	50.38	47.66	−92.44	2.72
0.01	51.2	48.47	−104.56	2.71
0.015	51.51	48.75	−106.8	2.71
0.02	53.5	50.84	−102.6	2.713
0.025	61.53	58.36	−72.3	2.715

تشير القيم أن وجود سالسيلات الصوديوم يزيد من طاقة التنشيط لتفاعل التآكل. من المفترض أن يحث تفاعل امتزاز المثبط في مواقع الطاقة الأعلى، ويجب أن يرتبط وجود المثبط الذي يؤدي الى حجب المواقع النشطة بزيادة طاقة التنشيط لتفاعل التآكل في الحالة المثبطة. تفسر القيمة الأعلى لـ Ea% بوجود سالسيلات الصوديوم مقارنة بتلك الموجودة في غيابه وانخفاض طاقة التنشيط Ea%

مع ارتفاع درجة الحارة مؤشر لحدوث انتزاز فيزيائي ونتيجة لذلك فإن ازدياد تركيز سالسيلات الصوديوم يؤدي الى زيادة قيمة Ea% مما يشير لحدوث امتزاز قوي لجزيئات المثبط على سطح المعدن.

يلاحظ من الجدول حدوث انخفاض في قيمة الانتروبية بزيادة تركيز المثبط حتى تزداد عمليات الامتزاز على سطح الحديد حتى نصل الى التركيز (0.015M) وبعدها تبدأ الانتروبية بالازدياد مما يدل على أن عدد كبير من الجزيئات لم يمتز على سطح الحديد وذلك نتيجة التغطية الكبيرة للسطح وللتأكد من دقة التجربة يمكن حساب الفارق الطاقي بين طاقة التنشيط وانتالبية التنشيط [24]. حيث يبقى هذا الفرق ثالثا ويتوافق مع العلاقة:

$$Ea - \Delta Ha = RT$$

5- الاستنتاجات والتوصيات:

1. أظهر ملح سالسيلات الصوديوم أداء جيد في تثبيط تآكل الحديد في 0.5M HCl
2. تزداد كفاءة التثبيط مع ازدياد تركيز المثبط ولكنها تقل مع زيادة درجة الحرارة (نتيجة تخريب الربط الفيزيائي)
3. القيم التي تم الحصول عليها تدعم آلية الامتزاز الفيزيائي
4. نوصي بالعمل على دراسة تأثير سالسيلات الصوديوم على مختلف أنواع الحديد الأخرى
5. نوصي بالعمل على دراسة تأثير سالسيلات الصوديوم على الأنواع الأخرى من المعادن كالنحاس والألمنيوم

المراجع:

1. YOOS,H. Kim,Y. Chung K, 2013, *Corrosion Inhibition Properties of Triazine Derivatives Containing Carboxylic Acid and Amine Groups in 1.0 M HCl Solution*. *Ind Eng Chem.* 52, Res.india ,10880–10889.
2. ALHAIDAR, B. REESHAH,F, JAMMOAL, Y. 2024,*The Possibility of Using Barley Grains Extract as an Acidic Corrosion Inhibitor for Carbon Steel*. .21,*Baghdad Sci J*: 1306.
3. AMIN, MA. ABD EL-REHIM ,S. EL-SHERBINI ,F. 2007. *The inhibition of low carbon steel corrosion in hydrochloric acid solutions by succinic acid. Electrochim Acta*; 52:USA. 3588–3600.
4. GABA,A. 2014,*Corrosion Inhibitors – Principles, Mechanisms and Applications. In: Developments in Corrosion Protection*. 10,*InTech. Epub ahead of print 20 February*. INDIA,5772/57255.
5. AL-AMIERY, A. ISAHAK ,W. AL-AZZAWI ,WK. 2023,*Corrosion Inhibitors*,11, *Natural and Synthetic Organic Inhibitors*. *Lubricants*,174.
6. LOTO, RT. 2018,*Surface coverage and corrosion inhibition effect of Rosmarinus officinalis and zinc oxide on the electrochemical performance of low carbon steel in dilute acid solutions*. 8,*Results Phys*, 172–179.
7. HAMADI ,L. MANSOURI, S. OULMI. K. 2018, *The use of amino acids as corrosion inhibitors for metals*,27,*A review J Pet. Egypt*, 1157–1165.
8. BOISIER ,G. LAMURE,A. PÉBÈRE ,N. 2009,*Corrosion protection of AA2024 sealed anodic layers using the hydrophobic properties of carboxylic acids*. 203,*Surf Coatings Technol*, 3420–3426.
9. KUZNETSOV,I. IBATULLIN, KA. 2002, *On the Inhibition of the Carbon Dioxide Corrosion of Steel by Carboxylic Acids*. 38,*Prot Met*,439–444.
10. RAJENDRAN,S.PALANISWAMY,N.2000,*Corrosioninhibition byphosphonic acid –Zn 2+ systems for mild steel in chloride medium*. 47,*Anti-Corrosion Methods Mater*, 359–365.
11. ALMOBARAK,NA. EL-NAGGAR,M. Al-MUFRAJ, S.2014. *Carboxylic Acids: Pitting Corrosion Inhibitors for Carbon Steel in Alkaline Medium and in the Presence of Chlorides*.50, *Chem Technol Fuels Oils*. 170–178.
12. ZARROK, H. ZARROUK, A. SALGHI, R.2013. *Corrosion Inhibition of*

C38 Steel in Acidic Medium Using N-1 Naphthylethylenediamine Dihydrochloride Monomethanolate.8, *Int J Electrochem Sci*, 6014–6032.

13. SCHMITT, G.1984, *Application of Inhibitors for Acid Media: Report prepared for the European Federation of Corrosion Working Party on Inhibitors*.19, *Br Corros J* , 165–176.
14. DURNIE,W.Jefferson, *A.1999. Developmentof a Structure - Activity Relationship for Oil Field Corrosion Inhibitors.146. J Electrochem Soc . 1751–1756.*
15. OGUZIE,E. OKOLUE,N. EBENSO,E.2004. *Evaluation of the inhibitory effect of methylene blue dye on the corrosion of aluminium in hydrochloric acid*.87. *Mater Chem Phys*, 394–401.
16. LI,X. TANG, L.2005. *Synergistic inhibition between OP and NaCl on the corrosion of cold-rolled steel in phosphoric acid.* 90*Mater Chem Phys* , 286–297.
17. ALI. B.2019. *Study the protection of iron from corrosion by using extract of green husk Juglans regia as plant inhibitor.*,41.homs university. 56–77.
18. ABAZID.B,. TANG, L.2024. *Studying the effect of some carboxylic acids on protecting iron from corrosion.* 46.homs university. 11–44
19. LI,X.MU,G.2005, *Tween-40 as corrosion inhibitor for cold rolled steel in sulphuric acid: Weight loss study, electrochemical characterization, and AFM*.252, *Appl Surf Sci* , 1254–1265.
20. SCHORR, M, YAHALOM ,J.1972. *The significance of the energy of activation for the dissolution reaction of metal in acids.*12, *Corros Sci*,867–868.
21. TAO, Z. ZHANG, S. LI,W.2009. *Corrosion inhibition of mild steel in acidic solution by some oxo-triazole derivatives*. 51.*Corros Sci* , 2588–2595.
22. UMOREN,SA.OBOT,IB.EBENSO,E.2008,*CorrosionInhibitionof Aluminium Using Exudate Gum from Pachylobus edulis in the Presence of Halide Ions in HCl*.5. *E-Journal Chem*. 355–364.
23. UMOREN, SA. EBENSO,E.2007. *The synergistic effect of polyacrylamide and iodide ions on the corrosion inhibition of mild steel in H_2SO_4*.106. *Mater Chem Phys*. 387–393.
24. ZARROUK,A.HAMMOUTI,B.ZARROK,H.2012. *Thermodynamic*

*study of metal corrosion and inhibitor adsorption processes in copper/N-1-naphthylethylenediamine dihydrochloride monomethanolate/nitric acid system*38 *part 2. Res Chem Intermed* . 1655–1668.

استخدام قشور بذور المشمش وبعض المخثرات اللاعضوية ودراسة فعاليتها في تخفيض عكارة المياه

اعداد : بنان الحسو اشراف : د. محمد أسعد

الملخص:

تعتبر عمليات التخثير والتلبيد من أكثر العمليات شيوعاً في معالجة المياه لغرض الحصول على مياه نقية وصالحة للشرب، وتوجه العديد من الباحثين لاستخدام بدائل للشبة وهي عبارة عن مواد طبيعية. أُستخدم في هذه الدراسة قشور بذور المشمش كمادة مخترة طبيعية. أجريت العديد من الاختبارات باستخدام أحواض الجار المخبرية وطُبقت التجارب على عينات مياه معكرة صنعياً باستخدام الطين بعكارات مختلفة NTU (25,50,100,150,200,250,300,500)، وباستخدام جرعات مختلفة من المخثرات مسحوق قشور بذور المشمش و كبريتات الألمنيوم و مزيج من كلا المخثرين بنسب مختلفة، وتم قياس العكارة النهائية لبيان تأثير درجة الحموضة والحرارة بعد الترسيب.

أظهرت النتائج أن أعلى كفاءة للتخثير تحققت عند معالجة العينة ذات العكارة 500 NTU باستخدام مزيج من كبريتات الألمنيوم وقشور بذور المشمش بجرعة 80 mg\L ونسبة مزيج 25% من قشور بذور المشمش إلى كبريتات الألمنيوم. كانت % 99 بدرجة حموضة pH=7.58 ودرجة حرارة T=25□، كما تمت دراسة العوامل المؤثرة على عملية التخثير باستخدام قشور بذور المشمش و أجريت التجارب على عينة 25NTU وكانت أفضل درجة حموضة، تحققت عندها أعلى كفاءة تخثير هي PH=12 وأن زمن بقاء الذي أعطى أعلى فعالية 87.96% هو 120 min ودرجة الحرارة التي حققت أعلى كفاءة هي T=60□ بنسبة.88.30%.

كلمات مفتاحية: عكارة، تخثير، تلبيد، كبريتات الألمنيوم، قشور بذور المشمش، مخثرات، ترسيب.

Abstract:
Coagulation and flocculation are among the most widely used processes in water treatment for the processes of obtaining clean and potable water, Many researchers have focused on using alternatives to alum, represented by natural materials.
in this study, apricot seed shells were used as a natural coagulant.
Several experiments were conducted using laboratory jar test apparatus, and the tests were applied to artificially turbid water samples prepared using clay(Household soil), with turbidity levels of (25, 50, 100, 150, 200, 250, and 300) NTU. Different dosages of coagulants were used, including powdered apricot seed shells, aluminum sulfate, and mixtures of both coagulants in various proportions. The final turbidity, pH, and temperature were measured after sedimentation to evaluate their effect.
The results showed that the highest coagulation efficiency was achieved when treating a water sample with a turbidity of 500 NTU using a mixture of aluminum sulfate and apricot seed shells at a total dose of 80 mg/L and a mixing ratio of 25% apricot seed shells. The removal efficiency reached 99% at a pH of 7.58 and a temperature of T = 25 °C. In addition, the factors affecting the coagulation process using apricot seed shells were studied. The experiments were conducted on a sample with an initial turbidity of 25 NTU. The optimum pH that achieved the highest coagulation efficiency was pH = 12, the retention time that gave the highest efficiency of 87.96% was 120 minutes, and the temperature that achieved the highest efficiency was
T = 60 °C with a removal efficiency of 88.3%.

Keywords: Turbidity, coagulation, flocculation, aluminum sulfate, apricot seed shells, coagulants, sedimentation

مقدمة:

تستخدم عمليات التخثير والتلبيد لسرعة التخلص من المواد العالقة في أحواض الترسيب الأولية ، كما تعمل على تحسين أداء أحواض الترسيب الثانوية ، حيث تتم إضافة مواد كيميائية تدعى بالمخثرات حيث تعمل هذه المخثرات على تجميع الجسيمات الميكروية التي لا يمكن أن تترسب بفعل الجاذبية، تحمل الجسيمات الميكروية شحنة كهربائية سالبة مما يجعلها تتنافر بشدة وتتوزع في الوسط، تبرز فعالية المخثرات من خلال قدرتها على تعديل الشحنة السطحية للدقائق الميكروية سالبة الشحنة مما يؤدي إلى تجميعها مع بعضها في كتل أكبر حجماً وبالتالي يزيد قطرها ويزداد سرعة ترسبها حسب قانون ستوكس.

تستخدم عدة مواد كيميائية كمواد مخثرة مثل كلوريد الحديد والشبة وهي مواد رخيصة ومتوفرة وذات كفاءة عالية في ترسيب المواد العالقة، إلا أن لها بعض المساوئ والتأثيرات السامة على الانسان والبيئة، حيث تؤدي التراكيز العالية في الألمنيوم إلى مرض الزهايمر المبكر إذ أنه يتراكم في الدماغ ومع الوقت يسبب الخرف المبكر[1]، لذا سارع العديد من الباحثين إلى تطوير مواد مخثرة طبيعية تضاف إلى مخثرات الألمنيوم والحديد. تهدف الدراسة الحالية إلى استخدام مخثرات طبيعية مثل قشور بذور المشمش كبديل عن الشبة، وإيجاد الكفاءة ومقارنتها مع كفاءة المخثرات الكيميائية، وتحديد النسب المثلى لمزيج من المخثرات الطبيعية والكيميائية، ودراسة تأثير كل من درجة الحرارة ودرجة الحموضة وزمن البقاء على فعالية عملية التخثير.

هناك العديد من الأبحاث التي درست استخدام المواد الطبيعية كمواد مخثرة حيث قام A.Ali والباحثون بمجموعة من الاختبارات لمقارنة فعالية مسحوق قشور الجوز وصمغ المشمش مع كبريتات الألمنيوم تبين أن استخدامهما كمواد مساعدة للتخثير مع كبريتات الألمنيوم أفضل من استخدام كبريتات الألمنيوم وحدها[1]. ودرس M.Priyatharishini وفريقه 2019 فاعلية قشور الموز ووجدوا انه أعطى أعلى

نسبة إزالة للعكارة والتي بلغت 89% [2]، كما درس Q.Hashim وآخرون عام 2021 دور قشور البرتقال في إزالة عكارة الماء مع كبريتات الألمنيوم حيث بلغت نسبة الإزالة 83.9% [3] ، وشغلت قشور البطاطا اهتمام الباحثين ففي دراسة أجراها F.Choumane وفريقه عام 2017 استُخدمت قشور البطاطا كمادة طبيعية مخثرة مع مخثر كلوريد الألمنيوم وفي دراسة لهم عام 2020 تم استخدام قشور البطاطا مع كبريتات الألمنيوم وكانت كفاءة إزالة 98% [4,5]. كما أجرى Muhammad Bahrodan وفريقه عام 2022 [6] العديد من الاختبارات لبيان فاعلية قصب السكر في إزالة عكارة الماء ووجدوا أن أعلى نسبة إزالة كانت90%، وفي دراسة أخرى أجراها S.Niesha ومجموعة من الباحثين عام 2022 قارنوا فيها أداء وفاعلية العديد من المواد الطبيعية كمواد تخثير ووجدوا أن جميعها ذات فاعلية بنسب إزالة مختلفة تتراوح بين%(99-85) منها مستخلص بذور الكركديه و الألوفيرا وهلام تين الصبار الهندي وبذور البطيخ ونبات الريحان وبذور الشمام وبذور البامية، وكذلك العدس[7]، واستخدم M.Otalora [2]عام 2022 هلام نبات تين الصبار وقارنوا كفاءته في إزالة العكارة مع مخثر كلوريد الحديد ووجدوا أن نسبة الإزالة كانت أعلى ما يمكن عند جرعة 13 mg\l من الهلام حيث وصلت إلى 82.70% مقارنة ب 94.70% عند استخدام كلوريد الحديد[8].

مواد وطرائق العمل:

الأدوات المستخدمة:

1-أحواض الجار، 2- جهاز قياس العكارة، 3-جهاز قياس درجة الحرارة

4-جهاز قياس PH وجهاز قياس TDS.

المواد المستخدمة:

1-الماء العكر المخلوط بالطين (التراب المنزلي).

2-المخثرات المستخدمة: المخثر اللاعضوي (كبريتات الألمنيوم $Al_2SO_4.18H_2O$) والمخثر الطبيعي (مسحوق قشور بذور المشمش) والملبد (بولي أكريلاميد).

3-حمض كلور الماء HCl و NaOH لتعديل الحموضة

تحضير المياه العكرة:

تم في هذه الدراسة استخدام عينات مياه ذات عكارة اصطناعية عن طريق إضافة الطين إلى المياه النقية، حيث تم تحضير عينة بعكارة 680 NTU وذلك بإضافة 100 mg\L من الطين إلى 1 L من ماء الصنبور. حركت العينة باستخدام الخلاط الكهربائي لمدة 10 min حتى تتوزع الحبيبات بشكل متجانس، وتركت العينة حتى تترسب لمدة 30 min ثم رشحت باستخدام قطعة قماش قطنية، قيست قيمة العكارة بعد الترشيح وكانت 680 NTU.

تم تحضير العينات بالعكارات المطلوبة عن طريق إضافة أو تخفيف العينة المحضرة بالماء النقي النظيف، وبتلك الطريقة تم تحضير العكارات NTU(25,50,100,150,200,250,300,500)، وينبغي الإشارة إلى أن التجارب الحالية أُجريت على مياه معكرة اصطناعياً بالطين لتأمين ظروف مخبرية مضبوطة تسمح بدراسة تأثير المتغيرات المختلفة بصورة مستقلة. أما في التطبيقات العملية فقد تحتوي المياه الطبيعية على مواد عضوية مذابة وأملاح وأيونات متنوعة قد تؤثر في آلية التخثير وكفاءته، لذلك فإن تعميم النتائج على جميع أنواع المياه يتطلب إجراء تجارب إضافية باستخدام عينات حقيقية من مصادر مختلفة للتحقق من ثبات الأداء تحت الظروف التشغيلية الواقعية.

تحضير المخثر الطبيعي (قشور بذور المشمش):

جمعت قشور بذور المشمش ونقعت بالمياه الدافئة لمدة 2h فقط، ثم جففت طبيعيا تحت أشعة الشمس لمدة 2day، فصلت القشور عن البذور ثم أعيد تجفيفها بأشعة الشمس ليوم إضافي، بعد ذلك طحنت باستخدام المطحنة الكهربائية المنزلية إلى مسحوق ناعم جداً ثم نخلت لضمان تجانس حجم الحبيبات وخزنت في عبوات جافة تماماً ومحكمة الإغلاق لحين الاستخدام.



الشكل (1): مسحوق قشور بدور المشمش المستخدم

اعتمدت هذه الدراسة على استخدام قشور بذور المشمش بعد التجفيف والطحن فقط دون إخضاعها لأي عمليات تنشيط حراري أو كيميائي، بهدف تقييم فعاليتها الأولية كمادة طبيعية منخفضة التكلفة ومتوافرة محلياً. ومن المتوقع أن يؤدي التنشيط الحراري أو الكيميائي للقشور إلى زيادة المساحة السطحية الفعالة وعدد المجموعات الوظيفية المشاركة في عملية التخثير، الأمر الذي قد يحسن كفاءة إزالة العكارة ويستحق الدراسة مستقبلاً.

خطوات إجراء التجارب العملية:

أخذت العينة ذات العكارة 500 NTU وتم قياس البارامترات الآتية (Tur,pH,TDS,T) .

أجريت التجارب باستخدام أحواض الجار المخبرية حيث تم ملء كل وعاء ب 200 mL من العينة، ثم أذيب 2 mg من كبريتات الألمنيوم في سليندر يحوي 10 mL ما مقطر وكذلك أذيب 4mg\L و 16 mg\L من الكبريتات في سليندات أخرى أضيف إلى كل وعاء من أوعية الجار محتوى سيلندر من السليندرات بحيث يصبح تركيز الكبريتات في الوعاء الأول 10 mg\L وفي الوعاء الثاني 20 mg\L وفي الوعاء التالث 40 mg\L وفي الوعاء الرابع 80mgL.

استخدم في التجارب عملية المزج السريع بسرعة 100rpm لمدة 2min بعد إضافة الكبريتات، ثم خفضت السرعة إلى 50 rpm لمدة 10 min قبل البدء بعملية التلبيد تم إضافة البولي أكريل أميد بتركيز 2 mg\L ثم يتابع المزج على سرعة 20 rpm لمدة 20 min، بعد ذلك تترك العينات للترسب لمدة 30 min.

بعد انتهاء زمن الترسيب يزال الزبد المتشكل في أعلى الوعاء وتفرغ محتوى الوعاء بحذر شديد إلى بيشر ليتم قياس كل من العكارة ودرجة الحموضة والحرارة ونسبة المواد الصلبة المعلقة، وتحسب كفاءة التخثير بالعلاقة $E_{tut\%}=(C_0-C)\backslash C_0$ ،[9]

حيث C_0: العكارة الأولية.

C: العكارة المتبقية بعد التخثير.

تكرر جميع الخطوات السابقة مع استبدال قشور بذور المشمش بكبريتات الألمنيوم.

ثم تكرر مرة أخرى باستخدام مزيج من كلا المخثرين حيث تم تحضير المزائج بالنسب الآتية:

الجدول (1): نسبة المزيج المختبر في التجارب

كمية المخثر الطبيعي (mg\L)	4	6.4	9.6	12
كمية المخثر اللاعضوي(mg\L)	12	9.6	6.4	4
النسبة (مخثر طبيعي)%	25	40	60	75

تعاد جميع الخطوات والتجارب السابقة على عينات مياه جديدة بعكارات مختلفة.

تم اختبار تأثير درجة الحموضة على عملية التخثير وخفضت درجة الحموضة باستخدام حمض كلور الماء ورفعت باستخدام هيدروكسيد الصوديوم.

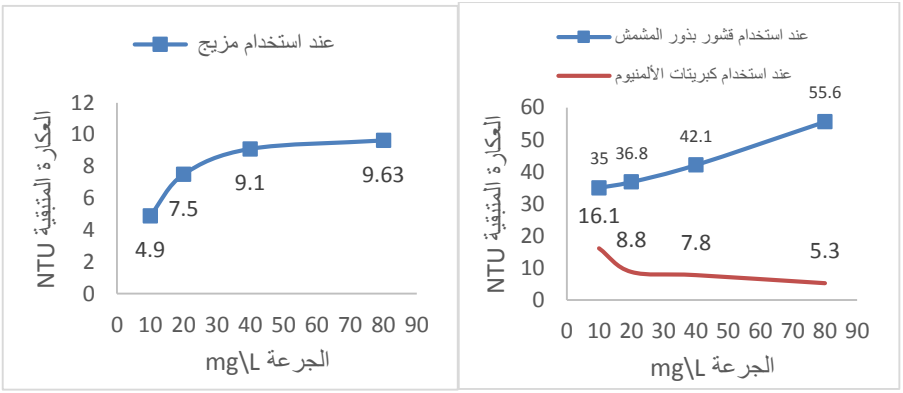
وكذلك تم اختبار تأثير زمن البقاء ودرجة الحرارة.

النتائج والمناقشة:

توضح الجداول والأشكال من (9–2) النتائج المخبرية للعكارة النهائية عند استخدام قشور بذور المشمش وحده وكبريتات الألمنيوم وحدها بجرعات مختلفة وعند استخدام مزيج من كليهما بنسب مزائج مختلفة ولمختلف العكارت.

الجدول(2): معالجة العينة ذات العكارة 500 NTU.

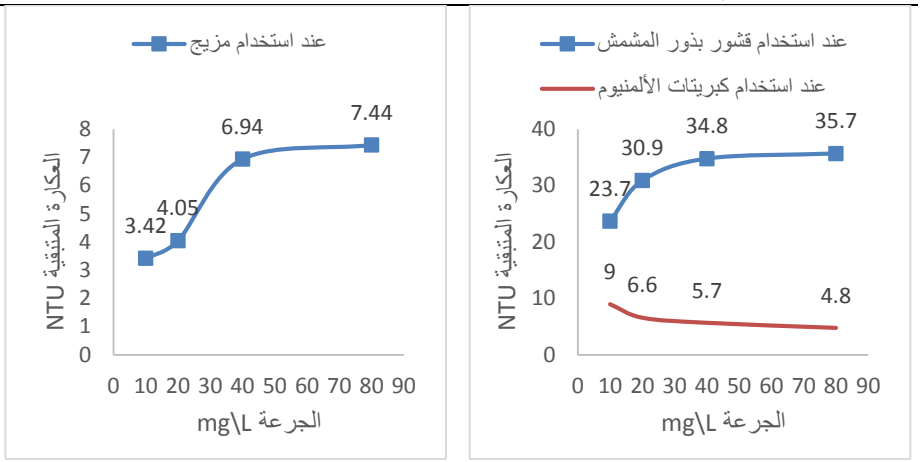
كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	16.1	10	35	25	4.9
20	8.8	20	36.8	40	7.5
40	7.8	40	42.1	60	9.1
80	5.3	80	55.6	75	9.6



الشكل(2): معالجة العينة ذات العكارة 500 NTU

الجدول(3): معالجة العينة ذات العكارة 300 NTU

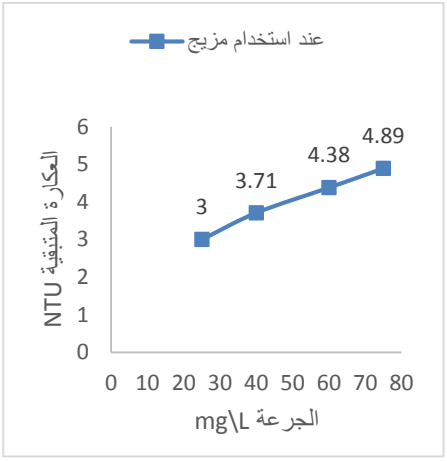
كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	9	10	23.7	25	3.4
20	6.6	20	30.9	40	5
40	5.7	40	34.8	60	6.9
80	4.8	80	35.7	75	7.4

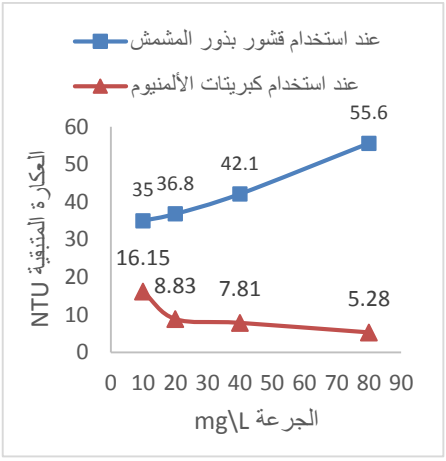


الشكل(3) : معالجة العينة ذات العكارة 300 NTU

الجدول(4): معالجة العينة ذات العكارة 250 NTU

كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	7.2	10	19.7	25	3
20	6.9	20	20.7	40	3.71
40	3.9	40	35.8	60	4.4
80	3.6	80	32.2	75	4.90

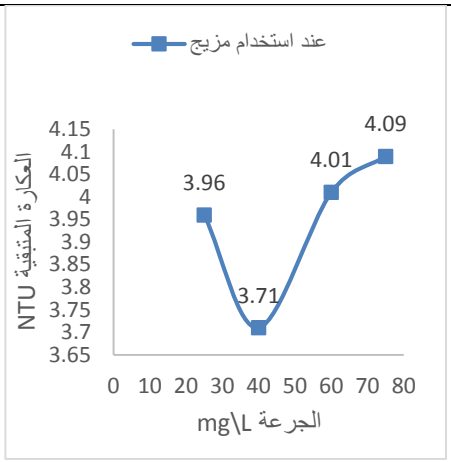


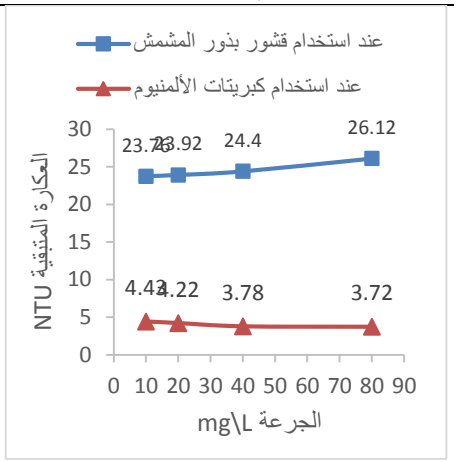


الشكل(4): معالجة العينة ذات العكارة 250 NTU

الجدول(5): معالجة العينة ذات العكارة 200 NTU

كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	4.4	10	23.8	25	3.9
20	4.2	20	23.9	40	3.7
40	3.8	40	24.4	60	4
80	3.7	80	26.1	75	4.1

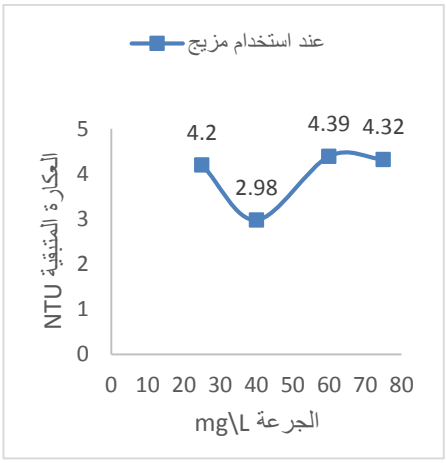


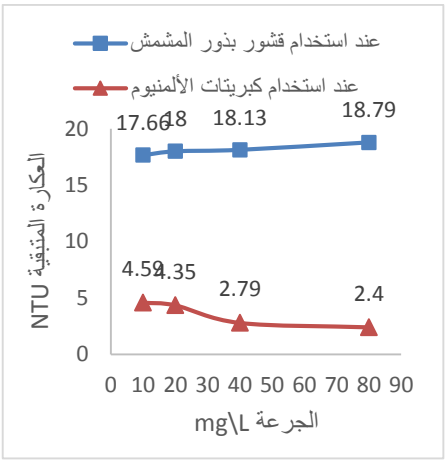


الشكل(5): معالجة العينة ذات العكارة 200 NTU

الجدول(6): معالجة العينة ذات العكارة 150 NTU

كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	4.6	10	17.6	25	2.4
20	4.3	20	18	40	3
40	2.8	40	18.1	60	4.4
80	2.4	80	18.8	75	4.3

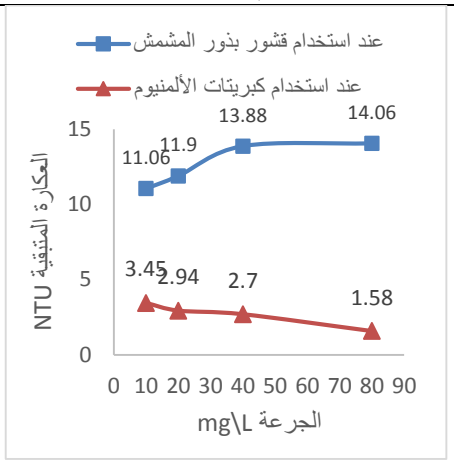


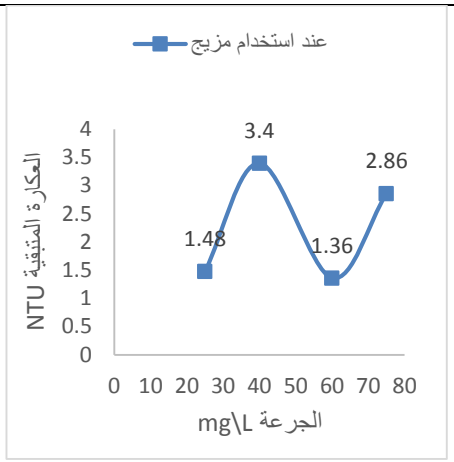


الشكل(6): معالجة العينة ذات العكارة 150 NTU

الجدول(7): معالجة العينة ذات العكارة 100 NTU

كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	3.4	10	11	25	1.5
20	2.9	20	11.9	40	3.4
40	2.7	40	13.9	60	1.4
80	1. 6	80	14	75	2.9

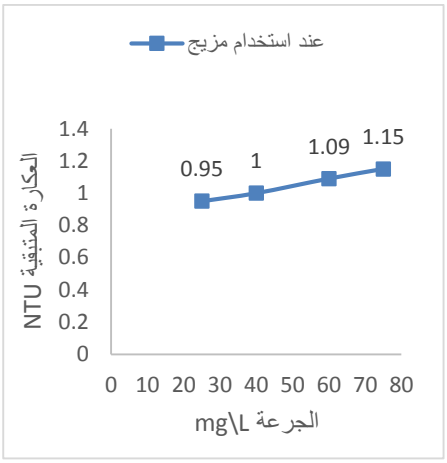


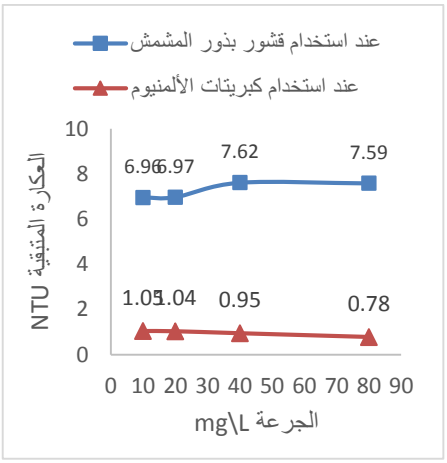


الشكل(7): معالجة العينة ذات العكارة 100 NTU

الجدول(8): معالجة العينة ذات العكارة 50 NTU.

كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	1	10	6.9	25	0.9
20	1	20	6.9	40	1
40	0.9	40	7.6	60	1.1
80	0.8	80	7.6	75	1.1

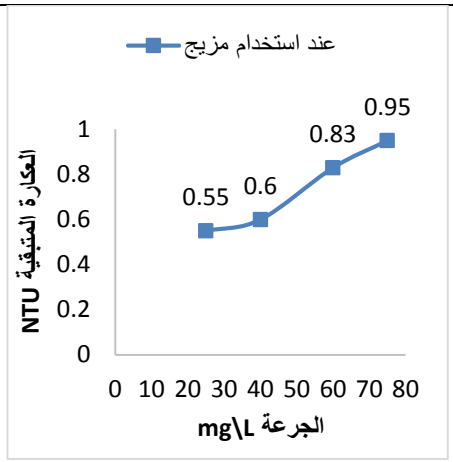


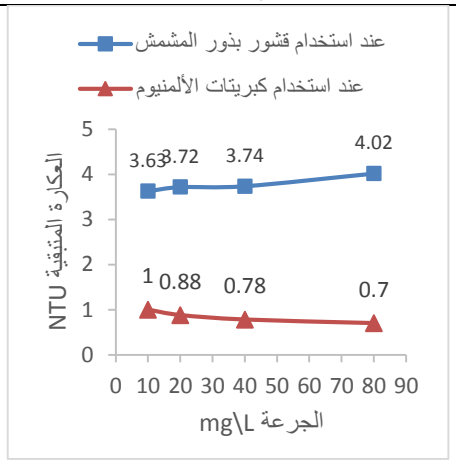


الشكل(8): معالجة العينة ذات العكارة 50 NTU

الجدول(9): معالجة العينة ذات العكارة 25 NTU

كبريتات الألمنيوم		قشور بذور المشمش		مزيج من كلا المخثرين	
الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	الجرعة (mg\L)	العكارة المتبقية NTU	نسبة المزيج%	العكارة المتبقية NTU
10	1	10	3.6	25	0.5
20	0.9	20	3.7	40	0.6
40	0.8	40	3.7	60	0.8
80	0.7	80	4	75	0.9





الشكل(9): معالجة العينة ذات العكارة 25 NTU

يلاحظ أنه من خلال النتائج المخبرية الموضحة في الجداول والأشكال أن قيمة العكارة المتبقية تنخفض كلما زادت الجرعة المستخدمة من كبريتات الألمنيوم، أما عند استخدام قشور بذور المشمش فالعكارة المتبقية تكون منخفضة عند استخدام جرعات منخفضة ويعود ذلك إلى أن مسحوق قشور بذور المشمش قد تترك رواسب وبقايا دقيقة من القشور مما يؤدي إلى زيادة المواد العضوية في المياه المعالجة وبالتالي زيادة العكارة.

بينت النتائج أن كبريتات الألمنيوم أعطت فعالية إزالة ثابتة مع تغير قيمة العكارة الإبتدائية، أما قشور بذور المشمش كانت أكثر فعالية عند استخدامها في معالجة المياه ذات العكارة المرتفعة.حيث خفضت قشور بذور المشمش العكارة بمعدل يتراوح بين %(93- 83.91)، وعند دمجها مع المخثر الكيميائي اللاعضوي تحسنت فعالية الإزالة لتصبح بمعدل %(99-96.2)

لدراسة تأثير درجة الحموضة على عينة بعكارة أولية 25 NTU تم استخدام محلول مائي لحمض كلور الماء لتحضير عينات بدرجات حموضة pH=3-5 ومحلول مائي لهيدروكسيد الصوديوم لرفع درجة الحموضة إلى pH=9-12،

توضح النتائج في الجدول التالي.

الجدول (10): تأثير درجة الحموضة على عملية التخثير باستخدام قشور بذور المشمش عند معالجة عينة بعكارة ابتدائية 25 NTU

pH	3	5	9	12
Tur(NTU)	19	13	3.32	2.68
$E_{tur\%}$ (%)	24	48	86.71	89.28

أظهرت النتائج أنه كلما ارتفعت درجة الحموضة وزادت قلوية الماء كانت فعالية إزالة العكارة بقشور بذور المشمش أعلى.

وعند اختبار تأثير زمن البقاء تم الحصول على النتائج التالية.

الجدول (11): تأثير زمن البقاء على عملية التخثير باستخدام قشور بذور المشمش عند معالجة عينة بعكارة ابتدائية 25 NTU

زمن البقاء(min)	52	70	90	120
Tur(NTU)	3.62	3.54	3.32	3.01
$E_{tur\%}$ (%)	85.49	85.84	86.72	87.96

وتم أيضا دراسة تاثير درجة الحرارة ويوضح الجدول التالي تأثيرها على فعالية عملية التخثير.

الجدول (12): تأثير درجة الحرارة على عملية التخثير باستخدام قشور بذور المشمش عند معالجة عينة بعكارة ابتدائية 25 NTU

درجة الحرارة □	25	30	40	60
Tur(NTU)	3.63	3.51	2.34	2.3
$E_{tur\%}$ (%)	85.48	85.96	86.64	88.3

عند مقارنة نتائج الدراسة الحالية بنتائج الدراسات السابقة يتبين أن قشور بذور المشمش أظهرت فعالية جيدة في إزالة العكارة، حيث تراوحت كفاءة الإزالة بين 83.91% و93% عند استخدامها منفردة، وارتفعت إلى نحو 99% عند استخدامها مع كبريتات الألمنيوم. وتعد هذه النتائج مقاربة لما حققته قشور الموز التي بلغت كفاءة الإزالة لديها نحو 89%، وكذلك مخلفات قصب السكر التي سجلت فعالية تقارب 90%، كما أنها تقترب من النتائج المسجلة لقشور البطاطا المستخدمة كمساعد تخثير. ويعود الاختلاف بين الدراسات إلى طبيعة المادة المستخدمة وخصائصها السطحية والجرعات المطبقة وظروف التشغيل المختلفة، إلا أن النتائج تؤكد أن قشور بذور المشمش تمثل مادة واعدة يمكن استخدامها كمساعد تخثير طبيعي منخفض التكلفة ومتوافر محلياً.

الاستنتاجات والتوصيات:

- من خلال النتائج الموضحة تبين أن فعالية الإزالة بواسطة قشور بذور المشمش تزداد كلما ارتفعت قيمة العكارة الأبتدائية، وانخفضت الجرعة المستخدمة وأعلى فعالية تحققت بنسبة 93% عند معالجة عينة بعكارة 500 NTU بجرعة 10 mg\L.
- تزداد فعالية الإزالة باستخدام مزيج من قشور بذور المشمش مع كبريتات الألمنيوم بمقدار 1% عن فعالية الإزالة باستخدام كبريتات الألمنيوم وحدها مما يبرز دورها كمادة داعمة للمخثرات الكيميائية.
- تزداد فعالية الإزالة بالتسخين وتنخفض كلما انخفضت درجة حرارة العينة ودرجة الحرارة الأفضل 40°C حيث حققت كفاءة إزالة 86.64% وبعدها تصبح الزيادة غير ملحوظة مقارنة بازدياد استهلاك الطاقة للتسخين.
- تتاثر قيمة العكارة المتبقية بالرقم الهيدروجيني حيث تنخفض كلما ارتفعت درجة الحموضة وتعتبر القيمة الأفضل للحموضة هي درجة الحموضة الطبيعية للمياه pH=7.6 حيث حققت كفاءة 85.49% والقيم الأعلى من ذلك غير مرغوبة في المياه بالإضافة لذلك تصبح زيادة الكفاءة غير ملحوظة عند رفع درجة الحموضة وغير مجدية اقتصاديا.
- تنخفض قيمة العكارة المتبقية في العينة المعالجة بالتخثير والتلبيد كلما زاد زمن البقاء و أفضل زمن بقاء 120 min تحققت عنده نسبة إزالة 87.96% وبعده تصبح الزيادة غير ملحوضة مقارنة بالزيادة الكبيرة في الزمن.
- تعتبر مادة قشور بذور المشمش مادة فعالة في إزالة العكارة، ويمكن استخدامها منفردة أو معززة للمخثرات اللاعضوية.
- دراسة التأثير التراكمي والمستمر لاستخدام قشور بذور المشمش على جودة المياه المعالجة في حال تطبيقها لفترات طويلة، وذلك لتقييم استقرار أدائها وغياب أي تأثيرات جانبية.
- اقتراح تطوير طرق كيميائية أو فيزيائية بسيطة لتحسين فعالية القشور كالكربنة أو التنشيط الكيميائي بهدف زيادة المساحة السطحية وتحسين الامتزاز

المصادر والمراجع:

1-A.H.Ali,Y.S.Tlaiaa and Z.A.Nasir-Sustainable used of natural coagulant aid for enhancing the performance of alum to treat turbidity water-IOP Conference series : Materials science and engineering-2019.

2-M.priyatharishini,N.M.Mokhtar and R.A.Kristani-Study on effectiveness of banana peel coagulant in turbidity reduction of synthetic wastewater-International journal ofengineering technology and sciences-2019.

3-F.Z.Choumane,F.Zaoui,F.Kandouci,B.Maachou and B.Benguella- Use of the potato peels and the bentonite as additives of flocculation in the wastewater treatment of the STEP of saida-2018.

4-F.Z.Choumane,F.Zaoui,F.Kandouci,B.Maachou and B.Benguella-Valorization of potato peel residues to produce a bioflocculant to be used in the treatment of liquid effluents-IOP Conference series : Materials science and engineering,volume 1204-2020.

5-L.Q.Hashim, A.A.Hasson,G.H.Fadheal and S.A.Naeem-Increment of water turbidity removal efficiency using plant assistant mucilage for alumn-Iraq journal of science and technology-2021.

6-M.B.Bahrodin, N.S.Zaidi, A.Kadier,N.Hussein,A.Syafiuddin and R.Boopathy-A Novel Nature Active coagulant agent extracted from the sugarcane bagasse for wastewater treatment-Journal of applied sciences-2022.

7-S.Niesha,C.Howawasam,D.J.Jayasnaka,Y.Murakmi,N.Arake and N.Maharjan-Effectiveness of natural coagulant in water and wastewater treatment-Global journal of environment science and management (GJESM)-2022

8-M.Carolina Otalora, A.Torres, C.R.Lara, J.A.G.Castano and G.R.Cifuentes-Evaluation of turbidity and color removal in water treatment: A Comparative study between opuntia ficus-indica Fruit peel mucilage and FeCl3-Journal of polymers-2022

10-APHA-Standard methods of water and wastewater Examination 18th Edition -American public Health Association Washining-1985

دراسة تجريبية لتأثير هول الكمومي في طبقات ثنائي كبريتيد المولبديوم (MoS_2) عند درجات الحرارة المنخفضة في المجال الحراري (90−270 K)

حسين الحسين[*]، جاسم الفواز[**]
لمى الشب[***] قيصر اليماني[****]
عدي الابراهيم[*****]

الملخص

تم في هذا العمل إجراء دراسة تجريبية شاملة لخصائص النقل الإلكتروني في طبقات كبريتيد المولبديوم (MoS_2) المحضرة بالطريقة المائية الحرارية والتي تعطي اطوار بلور مختلفة (3R,2H, 1T). جرى بحث قياسات مفعول هول واكثافة حوامل الشحنة والمقاومة الكهربائية والمغناطيسية وذلك باستخدام قياسات كمون هول، ضمن مجال واسع من درجات الحرارة الممتدة من التبريد الفائق(90 k: -183°C) حتى درجات الحرارة القريبه من الصفر المئوي (270 k : −3 °C). أظهرت قياسات كمون هول تغيرًا لاخطيًا واضحًا مع درجة الحرارة، تخلله انقلاب في إشارة كمون هول قرب درجة حرارة حرجة تقارب (T≈150 k)، ما يدل على انتقال حراري في آلية النقل وتعدد قنوات التوصيل. وكشفت كثافة حاملات الشحنة المستخلصة من القياسات المتناوبة (AC) والحجمية (BD) عن قيم كبيرة عند درجات الحرارة المنخفضة وصلت إلى حدود ($10^{11} - 10^{12}/cm^3$)، مع سلوك غير منتظم يعكس سيطرة الحالات الموضعية العميقة، في حين انخفضت الكثافة واستقرت عند قيم أصغر من ($10^9/cm^3$)، مع ارتفاع درجة الحرارة، نتيجة التحرير الحراري التدريجي لحوامل الشحنة. كما أظهر المتوسط الفعّال لكثافة الحوامل قيمة دنيا حادة بلغت نحو ($-5.5 \times 10^{11}/cm^3$) في المجال الحراري الانتقالي مؤكّدًا وجود إعادة توزيع إلكتروني في النظام. ومن جهة أخرى، كشفت المقاومة المغناطيسية عن استجابة لاخطية قوية للمجال المغناطيسي، مع تعزيز ملحوظ للمقاومة عند درجات الحرارة المنخفضة، يُعزى إلى التبعثر الكمومي وتأثيرات التداخل الإلكتروني في النظام ثنائي الأبعاد. وقد لوحظ تراجع تدريجي في المقاومة المغناطيسية الى القيمة ($2.63 \times 10^{11}\Omega.m$) مع ارتفاع درجة الحرارة الى (270 k) وهذا بسبب فقدان التماسك الطوري وسيطرة النقل الكلاسيكي. وتؤكد النتائج أن النقل الإلكتروني في طبقات MoS_2 تحكمه آليات متعددة تتغير مع درجة الحرارة والمجال المغناطيسي، مع دور محوري للحالات الموضعية والعيوب البنيوية عند التبريد الفائق. هذه الدراسة توفر فهمًا عميقًا لفيزياء الناقلية في المواد ثنائية الأبعاد، ما يجعلها ذات أهمية أساسية لتطوير الأجهزة الإلكترونية والنانوية العاملة في البيئات منخفضة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: كبريتيد المولبيدينوم (MoS_2)، التبريد الفائق، كمون هول، المقاومة الكهربائية، الناقلية الكهربائية، كثافة حاملات الشحنة، السلوك الكمومي، القياسات الكهربائية.

[*]**حاصل على شهادة الدكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب husianphy990@gmail.com**
[**]**حاصل على شهادة الدكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب jasem.alfawwaz@gmail.com**
[***]**أستاذ مساعد ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب**
[****]**أستاذ مساعد ، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة الفرات**
[****]**مدرس، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة حلب**

Experimental Study of the Quantum Hall Effect in Molybdenum Disulfide (MoS□) Layers at Low Temperatures in the Thermal Range (90–270 K)

Hussein AlHussein*
jasem alfawwaz**
Lama Alchab***
kaisr AlYamani****
Odai Alebraheem***

Abstract

In this work, a comprehensive experimental study of electron transport properties was conducted on molybdenum disulfide (MoS□) thin films synthesized via the hydrothermal method, which yields various crystalline phases (3R, 2H, 1T). Measurements of the Hall effect, charge carrier density, electrical resistivity, and magnetoresistance were investigated using Hall voltage measurements across a wide temperature range, extending from cryogenic temperatures (90 K: -183°C) up to near-freezing temperatures (270 K: -3°C). The Hall effect measurements showed a clear non-linear dependence on temperature, with a sign reversal near a critical temperature of approximately T≈150 k, indicating a thermal transition in the transport mechanism and the presence of multiple conduction channels. The charge carrier density extracted from alternating current (AC) and bulk (BD) measurements revealed high values at low temperatures, reaching approximately (10^{11}–10^{12}/cm³), with irregular behavior reflecting the dominance of deep localized states. As the temperature increased, the density decreased and stabilized at lower values (less than 10□/cm³), due to the gradual thermal release of charge carriers. The effective average carrier density also showed a sharp minimum of approximately (-5.5 × 10^{11}/cm³) in the transitional temperature range, confirming the presence of electronic redistribution in the system. Furthermore, the magnetoresistance exhibited a strong nonlinear response to the magnetic field, with a significant enhancement at low temperatures, attributed to quantum scattering and electron interference effects in the two-dimensional system. A gradual decrease in magnetoresistance to a value of (2.63 × 10^{11} Ω·m) was observed as the temperature increased to (270 k), due to the loss of phase coherence and the dominance of classical transport. These results confirm that electron transport in MoS□ layers is governed by multiple mechanisms that change with temperature and magnetic field, with a crucial role played by localized states and structural defects at very low temperatures. This study provides a deep understanding of the conductivity physics in two-dimensional materials, making it fundamentally important for the development of electronic and nanoelectronic devices operating in low-temperature environments.

Keywords: Molybdenum disulfide (MoS□), Hall effect, electrical resistance, electrical conductivity, charge carrier density, quantum behavior, electrical measurements**.**

***PhD holder in Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University.**
****PhD holder in Physics, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University**
*****Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University.**
******Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, AlFurat University.**
******Lecturer, Department of Physics, Faculty of Science, Aleppo University.**

1-المقدمة:

1-1-الخصائص الكهربائية عند درجات الحرارة المنخفضة:

تُعد دراسة الخصائص الكهربائية للمواد شبه الموصلة عند درجات الحرارة المنخفضة من الموضوعات الأساسية في فيزياء الحالة الصلبة، لما توفره هذه الدراسات من فهم عميق لآليات النقل الإلكتروني والتفاعلات الأساسية بين حوامل الشحنة وبنية المادة. عند خفض درجة الحرارة، تقل الاهتزازات الحرارية للشبكة البلورية كذلك مع التبريد الفائق وخفض درجة الحرارة تقل الطاقة الحرارية المتاحة لتحرير حوامل الشحنة من مستويات الشوائب إلى حزمة التوصيل، مما يؤدي إلى ما يُعرف بمنطقة التجمّد(Freeze-out region) ، حيث ينخفض تركيز الحوامل الحرة بشكل ملحوظ. نتيجة لذلك تتغير آليات النقل الكهربائي ويصبح التوصيل أكثر حساسية للحالات الموضعية والعيوب البلورية. مما يؤدي إلى تغيّر جوهري في سلوك التوصيل الكهربائي مقارنة بدرجات الحرارة العالية. ويُعتبر كبريتيد المولبديوم (MoS_2) من المواد شبه الموصلة ثنائية الأبعاد التي أظهرت سلوكًا كهربائيًا مميزًا عند درجات الحرارة المنخفضة، خصوصًا في سياق دراسات الناقلية الإلكترونية تحت تأثير المجال المغناطيسي[1,2]. وتكتسب هذه الدراسات أهمية إضافية عند درجات حرارة منخفضة (90 k, -183°C)، حيث يمكن عزل التأثيرات الحرارية والتركيز على الخصائص الجوهرية للمادة. فعند درجات الحرارة المنخفضة، ينخفض تأثير الفونونات بشكل كبير مما يقلل من تشتت حوامل الشحنة الناتج عن الاهتزازات الشبكية. ونتيجة لذلك، يصبح النقل الإلكتروني أكثر انتظامًا، وتزداد حساسية التوصيل الكهربائي تجاه العيوب البلورية، الشوائب، والحالات السطحية. في هذا النطاق الحراري، يمكن ملاحظة أن التغير في الناقلية لا يعود بالدرجة الأولى إلى عدد الحوامل، بل إلى حركيتها وآليات التشتت المسيطرة وفي المواد ثنائية الابعاد(الطبقية) مثل□MoS يؤدي الانخفاض في درجة الحرارة إلى إبراز الطبيعة ثنائية الأبعاد للنقل الكهربائي، حيث يتركز التيار بشكل رئيسي داخل الطبقات كما أن التفاعلات بين الطبقات تصبح أقل تأثيرًا، مما يسمح بدراسة النقل الالكتروني داخل المستوى بدقة أكبر[3,4,5].

1-2-درجات الحرارة المنخفضة والناقلية الفائقة:

من المهم التمييز بين الناقلية عند درجات الحرارة المنخفضة وبين الناقلية الفائقة (Superconductivity) : الناقلية الفائقة تُعرّف بأنها اختفاء المقاومة الكهربائية كليًا عند درجة حرارة حرجة معينة (Tc) وقريبة من الصفر المطلق (0 k)، إضافة إلى طرد المجال المغناطيسي (تأثير مايسنر). في حين أن MoS_2 في حالته الاعتيادية لا يُظهر ناقلية فائقة ذاتية، إلا أن انخفاض درجة الحرارة يؤدي إلى تغيير ملحوظ في النقل الإلكتروني دون الوصول إلى حالة المقاومة الصفرية، وقد أظهرت دراسات حديثة أن MoS_2 يمكن أن يُظهر ناقلية فائقة في ظروف خاصة، مثل: الاشابة العالية، تطبيق جهد بوابة كهربائية قوي، أو التلامس مع مواد فائقة التوصيل. إلا أن هذه الحالات تُعد استثنائية، وتختلف عن السلوك الكهربائي المدروس في هذا العمل، الذي يركز على النقل الإلكتروني منخفض الحرارة وليس على الناقلية الفائقة بمعناها الفيزيائي الصارم [6,7,8].

العلاقة بين المدى الحراري وقياسات تأثير هول:

تكتسب قياسات تأثير هول ضمن هذا المدى الحراري أهمية خاصة، إذ تسمح بتتبع التغير في نوع وكثافة الحوامل المشحونة مع درجة الحرارة. ففي درجات الحرارة المنخفضة، تعكس قياسات هول الخصائص الجوهرية للمادة بشكل مباشر، بينما عند درجات الحرارة الأعلى، تتأثر النتائج بمساهمة الحوامل الحرارية والتشتت الفونوني. إن مقارنة نتائج تأثير هول عند (-183°C) مع تلك المقاسة قرب درجة حرارة قريبة من الصفر المئوي(-3°C) توفّر رؤية شاملة حول

تطور آليات الناقلية، وتساعد في التمييز بين السلوك (نصف الناقل) الداخلي وتأثيرات العيوب كما أن هذا النطاق الحراري الواسع يسمح بالكشف عن أي تغيرات غير اعتيادية في السلوك الكهربائي قد تشير إلى انتقالات في آلية الناقلية أو إلى تأثيرات فيزيائية ناشئة [9,10].

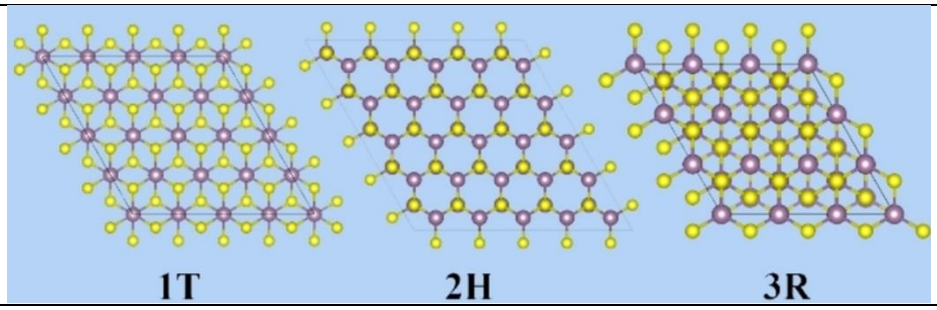
2-البنية البلورية لكبريتيد المولبديوم (MoS□):

يوجد MoS_2، سواءً كان طبيعيًا أو صناعيًا، في أحد الأطوار الثلاثة: $2H-MoS_2$، و$R-MoS_2$، و $1T-MoS_2$، حيث تُمثل H وR وT التماثل السداسي والمعيني والرباعي، على التوالي، بينما تُمثل الأرقام "1" و"2" و"3" عدد الطبقات لكل خلية وحدة (Number of layers per unit cell) كما هو موضح بالجدول (1).

الجدول (1): يلخص المراحل البلورية لـ MoS□

الطور البلوري	عدد الطبقات في خلية الوحدة	السلوك الإلكتروني النموذجي	البنية البلورية	التنسيق	مرجع
1T-MoS□	طبقة واحدة	سلوك معدني / ناقلية عالية	بنية ثلاثية (Trigonal)	تنسيق ثماني السطوح	[11]
2H-MoS□	طبقتان	سلوك نصف ناقل (Semiconducting)	بنية سداسية (Hexagonal)	تنسيق منشوري ثلاثي السطوح	[12]
3R	3 طبقات	سلوك نصف ناقل (Semiconducting)	(Rhombohedral)	تنسيق ثماني السطوح	[12]

يمكن تحديد الاختلاف بين هذه الاطوار من خلال المنظر العلوي للطبقات، حيث يُظهر الشكل (1) المنظرين العلوي والجانبي للهياكل الذرية للطبقات الأحادية من أطوار 2H-MoS□ و 1T-MoS□ و 3R-MoS□ في طوري 2H-MoS□ و 3R-MoS□ ترتبط ذرة المولبديوم (Mo) بشكل تساهمي مع ست ذرات من الكبريت(S) ، مما يؤدي إلى تكوين تنسيق منشوري ثلاثي السطوح حول ذرة المولبديوم. أما في طور 1T-MoS□، فإن ذرة المولبديوم تكون محاطة بست ذرات كبريت بترتيب يُشكّل تنسيقًا ثماني السطوح [13,14].



الشكل (1): يبين المنظرين العلوي للهياكل الذرية للطبقات الأحادية من أطوار $2H-MoS_2$ و 1T-MoS□ و 3R-MoS□ [15].

3-أهمية البحث: يُعد اختيار هذا المدى الحراري اختيارًا علميًا مدروسًا، إذ يجمع بين (التبريد الفائق183°C-) درجات حرارة منخفضة كفاية لتقليل التشتت الفونوني ودرجات حرارة نسبيًا قريبة من الصفر المئوي(3°C-) وهي ظروف تشغيل

قاسية للأجهزة الإلكترونية القائمة على كبريتيد المولبديوم MoS، حيث ان دراسة تأثير هول والخصائص الكهربائية لكبريتيد المولبديوم ضمن المدى الحراري (3°C, -183°C-) توفّر فهمًا متكاملًا لتطور الناقلية الإلكتروني في هذه المادة، وتسهم في تقييم إمكاناتها للتطبيقات الإلكترونية المستقبلية.

4- الدراسة العملية والتجريبية:

4-1- الأدوات والأجهزة:

1) منظومة قياس تاثير هول من الطراز (HMS-5000)
2) مجهر القوة الذرية (AFM).
3) مطياف الأشعة السينية (XRD) من شركة Leybold Didactic، طراز(554-81).
4) فرن المعالجة الحرارية من شركة Carbolite، طراز CWF 1200.
5) خلاط مغناطيسي مع سخان، طراز (2-502p) من شركة PMC.
6) جهاز Autoglaze من شركة SMIC.
7) معدات التحضير الكيميائي.

4-2- طريقة التحضير:

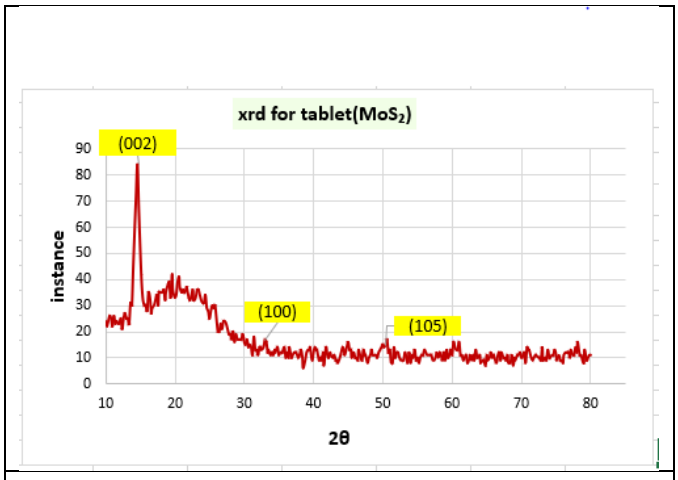
لتحضير هياكل (MoS_2) النانوية، تم إجراء عملية التصنيع باستخدام الطريقة الحرارية المائية. في عمليات تصنيع جسيمات MoS_2 النانوية النموذجية، يُستخدم كبريتيد الصوديوم كمصدر للكبريت للحصول على كبريتيد الموليبدينوم من خلال التفاعلات الكيميائية. [16, 17] يمكن تقسيم مراحل التحضير إلى الخطوات التالية: وُضع (1.235 gr) من رباعي هيدرات هيبتامولوبيدات الأمونيوم ($(NH4)_6Mo_7O_{24}\ 4H_2O$) في (25ml) مل من الماء المقطر مع التحريك المستمر. بعد 30 دقيقة، أُضيف (0.5gr) من أحادي هيدرات حمض الستريك ($C_6H_8O_7\ H_2O$) إلى المحلول السابق. بعد ذلك، أُضيف (0.31gr) من بلورات كبريتيد الصوديوم (Na_2S) إلى خليط المحلول. ثم نُقل المحلول إلى جهاز تعقيم عند درجة حرارة (200) درجة مئوية لمدة (6) ساعات. ثم بُرّد بشكل طبيعي إلى درجة حرارة الغرفة. بعد ذلك، غُسل المنتج الأسود النهائي بالإيثانول ثم بالماء المقطر. وجُفف المسحوق الناتج عند درجة حرارة (70°C) درجة مئوية. بعد ذلك قمنا بضغط كمية من البودرة الناتجة قدرها (1gr) باستخدام مكبس هيدروليكي عند استطاعه ($5ton/cm^2$) فحصلنا على قرص بقطر (14mm) وسماكة (3mm) كما هو موضح بالشكل (2).



الشكل (2):يبين القرص المحضر من كبريتيد المولبديوم

4-3-طيف انعراج الأشعة السينية:

تبين من خلال طيوف الأشعة السينية (XRD) للاقراص المحضرة من (MoS_2) وجود قمم تبلور واضحة، حيث بينت قياسات انعراج الأشعة السينية وجود قمة موافقة للمستوي البلوري (002) المقابل للزاوية ($2\Theta=14.6°$) والذي يميز طبقات كبريتيد المولبديوم بأطوارها الوحيدة او المتعددة كما هو موضح بالشكل (3) وهذا يتوافق مع البطاقات المرجعية لثنائي كبريتيد المولبديوم ((PDF#75-1539)) [18].



الشكل (3): يبين طيف الاشعة السينية لعينة(tablets– MoS_2)

وبالاعتماد على قانون براغ لانعراج الأشعة السينية كما في العلاقة (1)، يمكن تعيين المسافة بين المستويات البلورية المحددة بقرائن ميللر (hkl):

$$2d_{hkl}\sin(\theta_{hkl}) = n\lambda \qquad (1)$$

حيث أنd_{hkl}: يمثل البعد بين المستويات البلورية المتوازية وفق الاتجاه hkl، والزاوية (θ_{hkl}): هي زاوية الانعراج، و n: هي رتبة الانعراج.

λ: تمثل طول موجة الاشعة السينية ($\lambda = 1.541\ A^0$) حيث β عرض منتصف الشدة لكل قمة مقدراً بالراديان، ومن أجل القمم المميزة الثلاثة الموافقة للزاويا والتعريض الموافق لكل شدة تم تلخيص نتائج قياس (XRD) بالجدول (2):

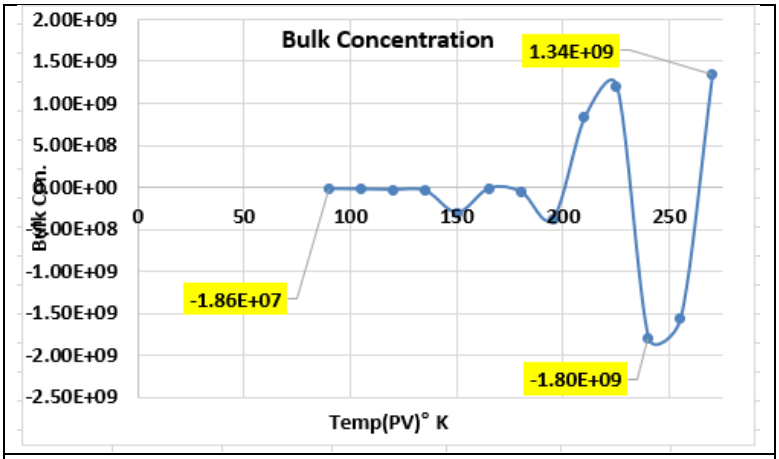
جدول(2): تلخيص طيف (XRD)

2θ	Hkl	Θ (degree)	d (A^0)
14.4	**(002)**	7.2	6.14
33.4	**(100)**	16.7	5.36
55	**(105)**	27.5	4.26

باخذ المتوسط الحسابي تبين أن $d_{hkl}=5.25\ ^{\circ}A$

4-4- دراسة التركيز الحجمي لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع درجة الحرارة في التبريد الفائق:

لقد تمت جميع الدراسات الكهربائية في التبريد الفائق مع تطبيق حقل مغناطيسي قدره (556 m.T) وتطبيق تيار كهربائي قدره (1 n A)، مع خطوة قياس قدرها (15 k)، مع تأخير زمني قدره (5 Sec) لكل خطوة قياس، تمت دراسة التركيز الحجمي لحاملات الشحنة كما هو موضح بالشكل (4) حيث يبين تغير تركيز الحوامل الحجمية (BulK Concentration)المستخرج من قياسات تأثير هول بدلالة درجة حرارة العينة (T)، ضمن المجال الحراري الممتد تقريباً من 90 k إلى 270 k يمثل المحور الأفقي درجة حرارة العينة الفعلية، بينما يمثل المحور العمودي تركيز الحوامل مع الأخذ بعين الاعتبار الإشارة المستخلصة من معامل هول، مما يسمح بتحديد كل من مقدار التركيز ونوع الحوامل المسيطرة. وعند درجات الحرارة المنخفضة من (90 k) حتى حوالي (150 k) ، يكون تركيز الحوامل قريباً جداً من الصفر مع وجود تقلبات طفيفة حوله، كما أن الإشارة غير مستقرة. يُعزى هذا السلوك إلى ما يُعرف بمنطقة التجمّد (Freeze-out region). في هذه المنطقة يكون معامل هول ضعيفاً جداً، وتصبح القياسات شديدة الحساسية للضجيج التجريبي كما هو موضح بالشكل (4)



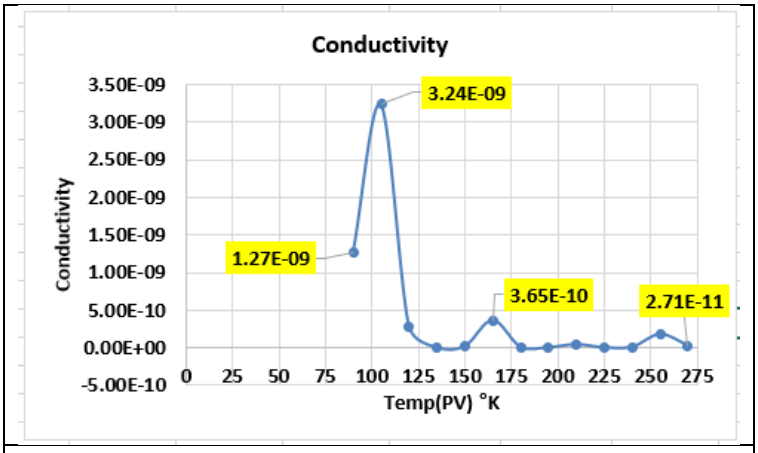
الشكل (4): دراسة التركيز الحجمي مع تغير درجات الحرارة T

مع ارتفاع درجة الحرارة إلى المجال الوسطي تقريباً بين 190 k, 150 k ، تبدأ المادة بالدخول في منطقة انتقالية، حيث يلاحظ تغير طفيف في تركيز الحوامل دون استقرار واضح. مع مساهمة متزامنة لنوعين من الحوامل، ما يؤدي إلى عدم وضوح سيطرة نوع واحد منها. في المجال الحراري الأعلى، وتحديداً بين حوالي (200–240 k) ، يظهر سلوك غير اعتيادي يتمثل في ازدياد حاد في التركيز الظاهري يتبعه انعكاس في الإشارة من موجبة إلى سالبة ثم العودة إلى موجبة. يشير هذا السلوك بوضوح إلى وجود نقل متعدد الحوامل(Two-carrier conduction) ، حيث تساهم كل من الإلكترونات والثقوب في عملية النقل الكهربائي. في هذه الحالة لا يعود نموذج الحامل الواحد المستخدم لاستخراج تركيز الحوامل من معامل هول صالحاً، إذ يصبح معامل هول معتمداً على تراكيز وحركيات كلا النوعين من الحوامل. وعليه فإن القيم السالبة الكبيرة الظاهرة في هذا المجال لا تمثل تركيزاً فيزيائياً حقيقياً، وإنما هي نتيجة رياضية لانهيار نموذج الحامل الواحد عند وجود أكثر من نوع حامل مسيطر. (عند درجات الحرارة الأعلى) أعلى من (250 k)، يستقر تركيز الحوامل مرة أخرى عند قيم موجبة كبيرة نسبياً، مما يدل على سيطرة نوع واحد من الحوامل، غالباً نتيجة زيادة التوليد الحراري للإلكترونات والثقوب، وبداية الاقتراب من السلوك الذاتي .(Intrinsic or near-intrinsic behavior) في هذا المجال تصبح القياسات أكثر موثوقية مقارنة بالمنطقة الانتقالية.

4-5- دراسة الناقلية الكهربائية لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) بدلالة درجة الحرارة T:

يبين الشكل (2) تغير التوصيلية الكهربائية للمادة المدروسة بدلالة درجة حرارة العينة (T) ضمن المجال الحراري الممتد تقريباً من 90 k إلى 270 $°K$ وترتبط التوصيلية بتركيز الحوامل الحرة وحركيتها وفق العلاقة $\sigma = qn\mu$ **حيث إن q تمثل شحنة الإلكترون الأساسية وتساوي تقريبًا** $q = 1.602 \times 10^{-19}\ C$ **بينما n هو تركيز الحوامل الحرة و μ هي حركية الحوامل.وكون في** MoS_2 **يوجد نوعين من الحاملات n, p:** $\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$

و n و p يمثلان تركيز الإلكترونات والفجوات على التوالي، بينما μ_n , μ_p تمثلان حركيتهما._لذا فإن سلوكها يعكس آلية النقل الكهربائي داخل المادة وعند درجات الحرارة المنخفضة (90–120 k~) ، تُظهر التوصيلية قيماً منخفضة مع وجود قيمة عظمى واضحة، ناتجة عن التوازن بين الزيادة التدريجية في تركيز الحوامل بسبب بداية تأيين الشوائب، وارتفاع الحركية نتيجة ضعف آليات التشتت في هذا المجال الحراري. ومع ارتفاع درجة الحرارة إلى المجال الوسطي (120–170 k~)، تنخفض التوصيلية بشكل حاد، ويُعزى ذلك إلى الانخفاض الكبير في حركية الحوامل نتيجة ازدياد تشتتها بالفونونات الشبكية، رغم استمرار الزيادة الطفيفة في تركيز الحوامل كما هو موضح بالشكل (5):



الشكل (5): يبين تغيرات الناقلية الكهربائية الحجمية σ مع درجة الحرارة T

عند درجات الحرارة الأعلى من (170 k) ، تستقر التوصيلية عند قيم منخفضة مع تقلبات طفيفة، مما يشير إلى تعادل تأثير زيادة تركيز الحوامل مع الانخفاض المستمر في الحركية، إضافة إلى احتمال وجود نقل متعدد الحوامل كما تدل عليه قياسات تأثير هول. يُظهر هذا المنحنى أن التوصيلية لا تتبع سلوكاً رتيباً مع درجة الحرارة، بل تتحدد بتفاعل معقد بين تركيز الحوامل وحركيتها، مما يستلزم تحليلها بالاقتران مع نتائج تأثير هول لفهم آلية النقل الكهربائي بصورة شاملة وقد تم ترتيب نتائج هذا القياس في الجدول (3).

لقد تم جميع القياسات حاسوبيا باستخدام منظومة قياس تاثير هول من الطراز (HMS-5000) وهي منظومة حاسوبيا تقوم باخذ جميع القياسات بشكل الكتروني وحاسوبي ودون تدخل من الباحثين فقط نقوم بتطبيق التيار الكهربائي والحقل المغناطيسي وحقن غاز النتروجين السائل او الهليوم حسب الدرجة المطلوبة ومع بدء القياس كل شي يتم حاسوبيا والقياسات ويتم تصدير النتائج بشكل ملف exel.

الجدول (3): يبين تغييرات كل من الناقلية و تركيز الحوامل وحركتها و الناقلية السطحية مع درجات الحرارة

Temp(PV)K	Bulk Con.	Sheet Con.	SheetResistance	Resistivity	Conductivity
90	-1.86E+07	-1.86E+06	8.32E+06	7.86E+08	1.27E-09
105	-2.15E+07	-2.15E+06	6.02E+06	3.09E+08	3.24E-09
120	-2.82E+07	-2.82E+06	6.56E+06	3.49E+09	2.87E-10
135	-4.24E+07	-4.24E+06	7.40E+06	3.68E+11	2.71E-12
150	-3.02E+08	-3.02E+07	6.90E+06	5.79E+10	1.73E-11
165	-1.12E+07	-1.12E+06	3.29E+06	2.74E+09	3.65E-10
180	-5.62E+07	-5.62E+06	1.17E+06	1.19E+11	8.38E-12
195	-3.73E+08	-3.73E+07	1.39E+05	3.77E+11	2.66E-12
210	8.35E+08	8.35E+07	6.34E+05	2.38E+10	4.20E-11
225	1.21E+09	1.21E+08	5.71E+05	2.34E+10	4.27E-13
240	-1.80E+09	-1.80E+08	4.94E+05	1.13E+11	8.87E-12
255	-1.57E+09	-1.57E+08	5.79E+05	5.58E+09	1.79E-10
270	1.34E+09	1.34E+08	3.88E+05	3.69E+10	2.71E-11

4-6- دراسة الناقلية السطحية Sheet Conductance (G) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2):

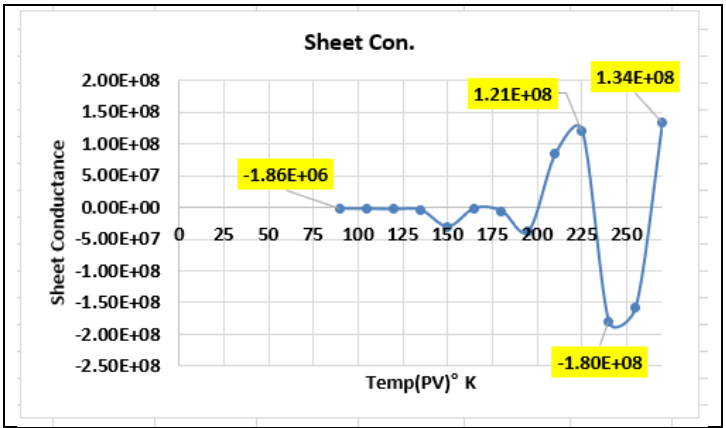
Sheet Conductance: هي مقياس لقدرة طبقة رقيقة ثنائية البعد (2D) او فلام رقيقة (Thin Film) على توصيل التيار الكهربائي بغض النظر عن أبعادها الجانبية. ولها الرمز (G) والسؤال هو لماذا نستخدم Sheet Conductance؟ في العينات الرقيقة جدًا (أفلام رقيقة، واجهات ثنائية الأبعاد): السمك t صغير جدًا وغير متجانس أحيانًا يصعب استخدام الناقلية الحجمية (σ) لذلك نستخدم كمية لا تعتمد على السمك الهندسي مباشرة. وتعطى بالعلاقة: $G = \sigma \cdot t$

حيث σ: الناقلية الحجمية (S/m) و t: سمك العينة (m) و G تعطى بواحدة Siemens

تمت دراسة الناقلية السطحية لعينة MoS_2 في مدى حراري بين نحو(k 270-90) وكما يظهر في الشكل (6)، تبقى الناقلية السطحية عند درجات الحرارة المنخفضة واقل من k 170 صغيرة جدًا وقريبة من الصفر، مما يشير إلى محدودية عدد الحاملات الحرة وتراجع سلوك نصف الناقل وسيطرة آليات نقل ضعيفة تتوافق مع سلوك شبه عازل وهو السلوك المميز مع التبريد العميق الذي يؤدي الى ظهونر حالات تجميد حوامل الشحنة او ما يُعرف بمنطقة التجمّد-Freeze) (out region. مع ارتفاع الحرارة إلى المجال (k 210-180) ، يبدأ مقدار الناقلية بالتحسن تدريجيًا، إلا أن بعض

نقاط القياس تُظهر قيمًا سالبة. ومن المهم الإشارة إلى أن **الناقلية الفيزيائية لا يمكن أن تكون سالبة**، ولذلك فإن هذه القيم تُعزى إلى تغيّر اتجاه إشارة الجهد في قياس Van der Pauw نتيجة **تقلبات الجهد الناتجة عن حساسية الجهاز**. وبالتالي تعدّ تشويهات تجريبية (measurement artifacts) مرتبطًة في ديناميكا الحاملات وكذلك بظهور مساهمات عرضية ناتجة عن تأثير هول كما هو موضح بالشكل (6).

في المجال (220−240 k) ، ترتفع الناقلية السطحية بشكل واضح لتصل إلى قيم كبيرة في حدود $(1.0 - 1.3)\times10^{8}$ S، مما يشير إلى زيادة ملحوظة في عدد الحاملات الحرة و تحسن حركيتها نتيجة تنشيط حراري أكبر.



الشكل (6): تغيرات الناقلية السطحية (G) مع تغيرات مع تغيرات الحرارة في مجال التبريد الفائق

وفي نطاق الحرارة (245−260 k) تظهر مرة أخرى قيم سالبة كبيرة، وهي أيضًا ناتجة عن **انقلاب إشارة الجهد المقاس** حيث ترتبط الناقلية السطحية بالجهد المقاس من خلال علاقة (Van der Pauw)، $Gs = \frac{1}{R} = \frac{ln2}{\pi} * \frac{I}{V}$ حيث انه عندما تنقلب اشارة الجهد ويصبح ذو قيمة سالبة وبالتالي تصبح الناقلية سالبة لكن فعليا الناقلية ليست سالبة **ولكن وجود هذه الاشارة يدل غالبًا إلى تغيّر نمط الاستجابة الكهربائية للعينة والجهاز معًا عند هذه الحرارة. والتفسير الفيزيائي هو:**

- **ظواهر النقل الكمومية (Quantum Transport Phenomena)**: عند درجات الحرارة المنخفضة، تظهر تأثيرات مثل **الموضعية (Localization)** أو **تداخل الموجات الإلكترونية (Electron wave interference)**. هذه الظواهر تجعل سلوك الحاملات غير تقليدي، ويمكن أن تسبب انعكاسًا في إشارة هول. وهذا السلوك الكمي لا يظهر سوى في درجات الحرارة المنخفضة.

ملاحظة: لكن هذا السلوك الكمي ظهر في درجات حرارة ضمن المجال (200−260).

وهذه ملاحظة هامه تؤكد صحة اختيارنا لمركب كبريتيد المولبديوم حيث يتميز بخصائص فريدة نتيجة اطوار المتعددة من حيث ظهور خصائص لاتوجد في بقية انصاف النواقل الاخرى، حيث ان تداخل هذه الاطوار الثلاثة (3R,2H,1T) في كبريتيد المولبديوم (يسمى في الدراسات الأوروبية : بالمادة العجيبة) يمنحه خصائصه فريدة تختلف عن بقية كالكوجينات المعادن الانتقالية وتكسبه سلوك خاص به كما ذكرتم في ملاحظتكم ظهور السلوك الكمي في درجة حرارة (200 k − 260) وما نقوم به في هذا البحث هو رصد هذا السلوك المميز لكبريتيد المولبيديوم والتعرف عليه.

انعكاس إشارة تأثير هول يكون بسبب ظواهر النقل الكمومية ومساهمات ديناميكا الدوامات (Vortex motion).

وفي المجال عالي الحرارة ($T \geq 270\ K$)، تستعيد الناقلية السطحية قيمًا موجبة مرتفعة تصل إلى نحو ($G \approx (1.4) \times 10^8\ S$) مما يدل على استقرار آلية النق

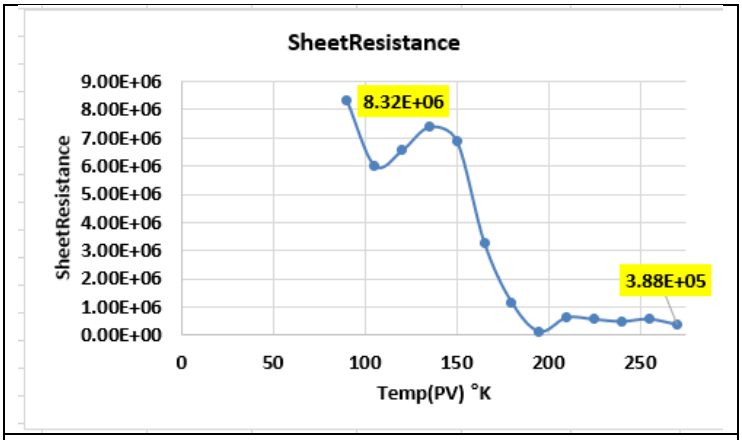
ل الكهربائي مما يعكس استقرار قياسات الجهد وعودة نظام النقل إلى سلوك شبه طبيعي مع زيادة الحاملات وسيطرة الحاملات العادية، مع اختفاء التأثيرات الشاذة التي تميز المجال الانتقالي.

4-7- دراسة مقاومة الصفائح او الطبقات ثنائية البعد (Sheet Resistance) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2):

Sheet Resistance ويرمز لها بـ R هي مقاومة طبقة رقيقة أو نظام ثنائي الأبعاد، وتُعرَّف على أنها المقاومة المقاسة بين جانبين متقابلين من مربع افتراضي من العينة، وهي مستقلة عن الأبعاد الجانبية وتعتمد فقط على خصائص المادة وسُمكها. في قياسات هول، تُستخدم Sheet Resistance لوصف النقل الطولي (longitudinal transport)، أي الاستجابة الكهربائية على اتجاه التيار، في مقابل مقاومة هول التي تصف النقل العرضي. تعكس Sheet Resistance: كثافة الحاملات الشحنة، حركية الحاملات، آليات التشتت، جودة الفيلم الرقيق أو العينة، ولها دور كبير في التمييز بين أنظمة النقل:

- اذا كانت (R عالية $\Leftrightarrow$ نظام ضعيف التوصيل / شبه عازل) اما اذا كانت قيمتها صغيرة, ($R \to 0 \Leftrightarrow$ اقتراب من حالة فائقة التوصيل)
- تغيرها الحاد مع T $\Leftrightarrow$ انتقال طور أو تغير آلية النقل المسيطرة.

اما في حالة الناقلية الفائقة وتأثير هول: في الدرجات فوق درجة الحرارة الحرجة (Tc): R تعكس النقل العادي اما في الدرجات القريبة من درجة الحرارة الحرجة (Tc): تتأثر بتقلبات أزواج كوبر تحت Tc وبالتالي ($R \to 0$) نظريًا لكن عمليًا تظهر مساهمات من حركة الدوامات. لقد تم دراسة تغيرات مقاومة الصفائح مع تغير درجة الحرارة في مجال التبريد الفائق (k 270 – 90) كما هو موضح بالشكل (7).



الشكل (7): بين تغيرات المقاومة السطحية Sheet Resistance مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق T

نلاحظ من الشكل انخفاض أولي في قيمة Sheet Resistance (8.32E+06 - 6.02E+06) عند زيادة الحرارة من k 90 الى الدرجة k 105 وهذا يشير غالبًا إلى تحسن الناقلية حيث ان زيادة الحرارة تمنح الإلكترونات طاقة أكبر لتجاوز العوائق. وبعد ذلك ارتفاع في Sheet Resistance الى القيمة (8.32E+06) وهذا بسبب تأثير انتشار

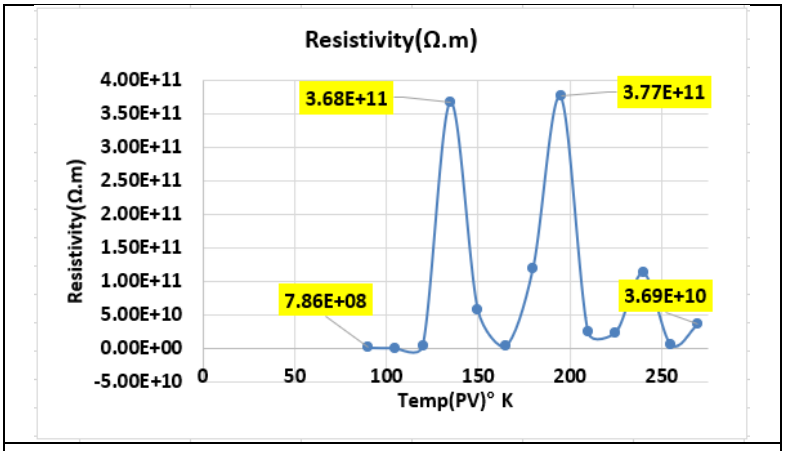
الفونونات. ثم نلاحظ انخفاض تدريجي في قيمة Sheet Resistance الى القيمة (1.39E+05) عند الدرج 195 k وهذا يشير عادة إلى تحول في المادة، مثل تغيّر في البنية البلورية أو ظهور حالة شبه معدنية/معدنية، حيث تصبح الإلكترونات أكثر حرية، كما نلاحظ استقرار جزئي عند(195–270 k) وهذا يشير إلى الوصول إلى توازن حراري حيث تأثير العيوب والفونونات يتوازن، فتثبت المقاومة. تم تلخيص النتائج بالجدول (4).

جدول (4) يبين تغييرات المقامة الحجمية (Resistivity) و(SheetResistance) للصفيحة مع تغييرات درجة الحرارة

Temp(PV)K	SheetResistance	Resistivity
90	8.32E+06	7.86E+08
105	6.02E+06	3.09E+08
120	6.56E+06	3.49E+09
135	7.40E+06	3.68E+11
150	6.90E+06	5.79E+10
165	3.29E+06	2.74E+09
180	1.17E+06	1.19E+11
195	1.39E+05	3.77E+11
210	6.34E+05	2.38E+10
225	5.71E+05	2.34E+10
240	4.94E+05	1.13E+11
255	5.79E+05	5.58E+09
270	3.88E+05	3.69E+10

4–8– دراسة المقاومة الحجمية (ρ – Resistivity) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع التبريد الفائق:

مقاومة المادة للتيار الكهربائي لكل وحدة طول ومساحة مقطع $\rho = \frac{RA}{L}$ حيث: R = المقاومة (Ω)، A = مساحة المقطع العرضي (m^2)، L = طول العينة (m) والوحدة: ($\rho: \Omega * m$) واستخدام قياس المقاومة الحجمية يعطي قياسًا حقيقيًا للمادة نفسها، مستقل عن شكل العينة أو أبعادها. تمت دراسة المقاومة الحجمية في مجال درجات حرارة (90–270 k) كما هو موضح بالشكل (8).



الشكل (8): بين تغيرات المقاومة الحجمية (ρ) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

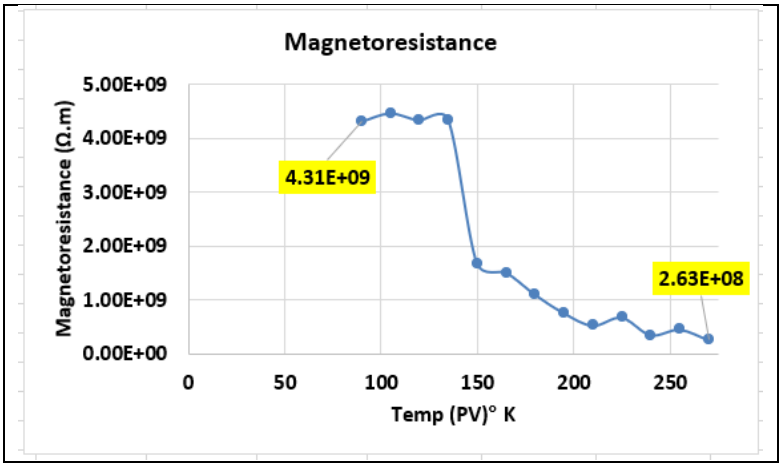
قيم المقاومة الحجمية لكبريتيد المولبديوم كما هو واضح من الشكل قيم صغيرة نسبياً عند (k 110– 90) من مرتبة (7.86E+08) ونلاحظ وجود قمتين حادات (3.68E+11, 3.77E+11) عند الدرجات (k 200 ,140)، وهي قيم كبيرة وهذا الارتفاع في المقاومة سببه **التبريد الفيزيائي:** حيث أن هذا السلوك متوقع في أنصاف النواقل ثنائية الأبعاد (2D Semiconductors) عند درجات الحرارة المنخفضة بسبب ظاهرة **تجمّد حوامل الشحنة (Carrier Freeze-out)**. عند خفض الحرارة، "تُسجن" الإلكترونات في مستويات الطاقة العميقة (Deep traps) ولا تملك طاقة حرارية للتحرر، مما يرفع المقاومة بشكل هائل.

اما وجود التذبذب (الارتفاع ثم الانخفاض ثم الارتفاع) فهو يعود الى:

- **آلية النقل (Hopping Conduction):** إن النقل في هذه الدرجات لا يتبع قانون أوم البسيط، بل يتبع "القفز بمدى متغير" (Variable Range Hopping – VRH). في هذا النمط، يمكن أن تتغير المقاومية بشكل غير رتيب نتيجة تغير المسارات المفضلة للإلكترونات بين مراكز التوضع (Localized states).
- **التداخل بين الأطوار (Phase Competition):** مادة MoS_2 معروفة بتعدد أطوارها (2H , 1T,3R). عند التبريد، قد يحدث انتقال طوري "موضعي" (Local Phase Transition) وتغير في المسافات بين الطبقات، مما يؤدي إلى تغير مفاجئ في فجوة الحزمة (Bandgap) وبالتالي تذبذب المقاومية.
- **بالنسبة للتيار الطفيلي:** لقد استخدمنا **منظومة قياس دقيقة** لقياس تاثير هول من الطراز (HMS-5000) وهو منظومة الكترونية وحاسوبية بالكامل، من حيث عملية القياس وعملية **المعايرة (Calibration)** وطرح تيار الخلفية (Background noise subtraction) ، وجميع العمليات تتم بشكل حاسوبي.
- **التحول الطوري المفاجئ:** إن القمم الظاهرة عند (k 140) و (k 200) تشير بالفعل إلى وجود تحولات طورية من الرتبة الثانية وإعادة ترتيب للشحنات(Charge ordering) ، وهو ما يتوافق مع الدراسات الحديثة على المواد ثنائية الأبعاد تحت التبريد.

4-9- دراسة المقاومة المغناطيسية Magnetoresistance لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع التبريد الفائق:

Magnetoresistance: المقاومة المغناطيسية هي واحدة من أهم الكميات في قياسات هول وخاصة عند درجات الحرارة المنخفضة، هي تغير المقاومة الكهربائية للمادة عند تطبيق مجال مغناطيسي. تمت دراسة المقاومة Magnetoresistance في مجال درجات حرارة (k ° 270–90) كما هو موضح بالشكل (9).



الشكل (9): بين تغيرات المقاومة المغناطيسية (Magnetoresistance) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

يتبين من الشكل (9) وجود قيم عالية (4.31E+09) عند درجات منخفضة (90–120 k~)، وسلوك المقاومة المغناطيسية لكبريتيد المولبديوم انخفاض حاد ابتداءً من (140-150 k)، وتكون قيم المقاومة المغناطيسية صغيرة نسبياً عند درجات أعلى (200–275 k~) من مرتبة 2.63E+08 والتفسير الفيزيائي:

في درجات الحرارة المنخفضة: طول المسار الحر للإلكترونات كبير، والمجال المغناطيسي يسبب انحناءً قوياً لمسارات الحوامل وبالتالي تزداد المقاومة المغناطيسية. ومع ارتفاع الحرارة: تزداد تصادمات الفونونات، أيضا يقل تأثير المجال المغناطيسي النسبي وبالتالي تنخفض magnetoresistance، الانخفاض الحاد قرب (140-150 k) قد يشير إلى: تغير آلية النقل نتيجة لبداية هيمنة تشتت الفونونات. **وقد تم توضيح التغيرات بالجدول (5)**

الجدول (5): يبين تغييرات (MagnetoRes) مع درجات الحرارة

Temp(PV)	MagnetoRes
90	4.31E+09
105	4.46E+09
120	4.33E+09
135	4.35E+09
150	1.68E+09
165	1.51E+09
180	1.11E+09
195	7.62E+08
210	5.29E+08
225	6.78E+08
240	3.55E+08
255	4.55E+08
270	2.63E+08

علاقة تربط المسار الحر الوسطي والمجال المغنطيسي ودرجة الحرارة:

نعم يوجد علاقة تربط بين هذه البارامترات لكننا لم نتطرق اليها في بحثنا هذا وقد تم التطرق اليها في أبحاث أخرى.

بالنسبة للعلاقة المطلوبة هي علاقة نصف قطر لارمور وتعطى بالعلاقة ($R_L = \frac{m*v}{g*B}$) حيث ان V هي سرعه الجسيمات وترتبط بدرجة الحرارة بتناسب وفق العلاقة ($V \propto \sqrt{T}$) اما (B) الحقل المغناطيسي فهو يحدد هندسة المسار للشحنات (R_L).

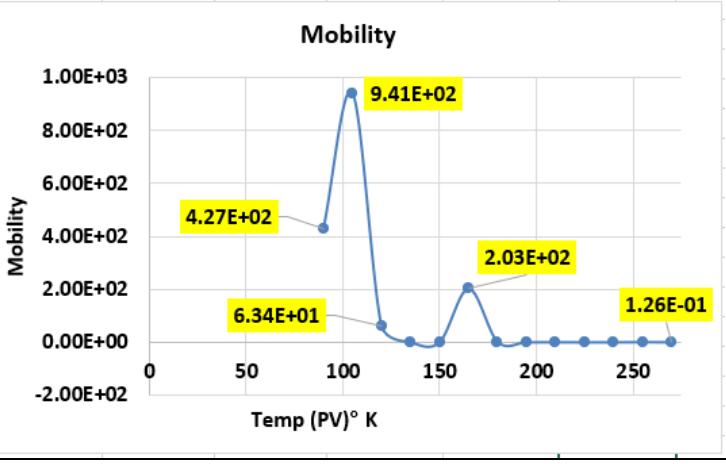
4-10- دراسة تغيرات معامل الحركية (Mobility) مع درجة الحرارة في التبريد الفائق:

الحركية (Mobility كفاءة حركة حوامل الشحنة): هي مقياس مدى سهولة حركة حاملات الشحنة (إلكترونات أو ثقوب) داخل المادة عند تطبيق مجال كهربائي او مغناطيسية ويعطى بالعلاقة: $\mu = \frac{dV}{E}$

حيث : dv :سرعة الانجراف : E المجال الكهربائي وفي قياسات هول: يتم حساب الحركية عادة من:

$$\mu = \frac{\sigma}{nq} = R_H * \sigma = \frac{R_H}{\rho}$$

حيث : R_H : معامل هول، : ρ المقاومية الكهربائية. حيث تمت دراسة تغيرات معامل الحركية (Mobility) في مجال درجات حرارة (90-270 ° k) كما هو موضح بالشكل (10).



الشكل (10): بين تغيرات معامل الحركية (Mobility) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

يتبين من الشكل (10) وجود ارتفاع ملحوظ حتى قيمة عظمى (9.41E+02) موافقة للدرجة (105 k)، بعدها نلاحظ انهيار حاد الى القيمة (6.34E+01) موافقة للدرجة (120° k)، وقيم الحركية تصبح اصغر عند درجات أعلى، مع وجود قمة صغيرة عند الدرجة (275 ° k)، والتفسير الفيزيائي: عند درجات منخفضة: اهتزازات الشبكة ضعيفة وبالتالي حركة الحوامل شبه حرة وبالتالي حركية عالية، القمة الحادة للحركية هي سمة مميزة للمواد القريبة من الفائقية. وبعد الدرجة (105 k) تزداد تصادمات الفونونات بسرعة وهذا يسبب تراجع الحركية، وعند درجات أعلى من الدرجة (180 k) تكون قيمة معامل الحركية صغيرة وهذا يغني

ملاحظة : لكن ماهو سبب تزايد الفونونات بسرعة بين(105 k-120) ألا يعزى لتغير الحالة الطورية

هذه الملاحظة هامه لكن من أجل تأكيدها نحتاج قياسات دقيقة (تشتت رامان، تشتت النترونات غير المرن، IXS) وفي الواقع اثناء عملية التبريد يصعب استخدام هذه القياسات، لكن يمكننا ملاحظة اثر تغير الحالة الطوريه من خلال قياس معامل الحركية او قياس السعة الحرارية (Heat Capacity)، وهذه فائدة قياسات تاثير هول (HALL-

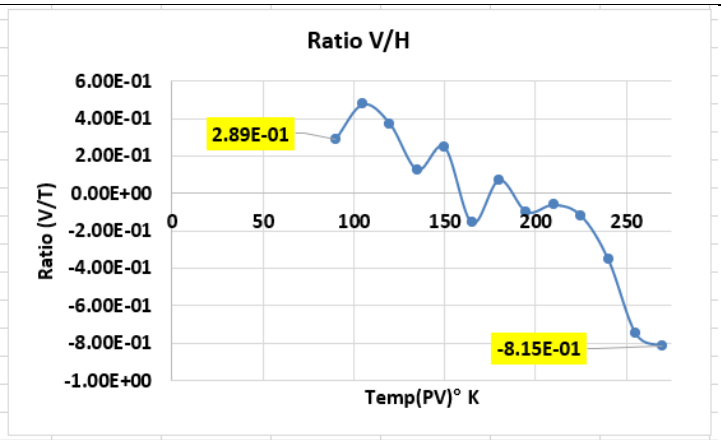
measurements) حيث توفر لنا إمكانية رصد عدة تغييرات معا (مغناطيسية، كهربائية ، طوريه) من خلال ملاحظة التغييرات مع درجة الحرارة.

وجود تشتت قوي لحوامل الشحنة وهذا يفسر تراجع قيم (μ) وانخفاضها. والقمة الحادة للحركية هي سمة مميزة للمواد القريبة من الفائقية أو الأنظمة المترابطة بقوة.

4-11- دراسة الاستجابة للمجال المغناطيسي (Ratio V/H) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2):

ان (Ratio V/H) يمثل نسبة الجهد (كمون هول) إلى المجال المغناطيسي ويعبر عنه بالعلاقة $Ratio = \frac{V_H}{H}$

حيث : V_H : جهد هول المقاس : H شدة المجال المغناطيسي، مفيدة جداً عند القياس في درجات حرارة منخفضة حيث: الإشارات صغيرة، والحساسية عالية، وفي درجة الحرارة الحرجة (Tc) قد يظهر: تغير مفاجئ فيMobility ولاخطية في تغييرات V/H مع الحراره وذلك بسبب تشكل أزواج كوبر التي تسبب تقلبات الناقلية (Superconducting Fluctuations). حيث تمت دراسة تغيرات معامل الاستجابة المغناطيسية (Ratio V/H) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 ° k) كما هو موضح بالشكل (11).



الشكل (11): بين تغيرات معامل الاستجابة المغناطيسية (Ratio V/H) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

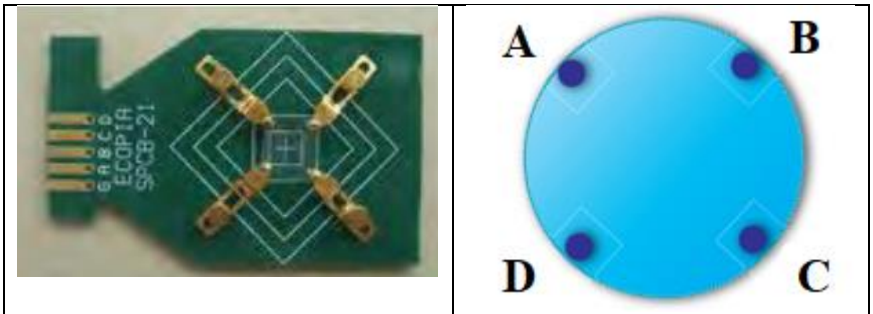
يتبين من الشكل (11) ان معدل الاستجابة المغناطيسية لكبريتيد المولبديوم يتعلق بالحرارة بشكل مباشر حيث تتراوح قيم الاستجابة المغناطيسية بين (2.89E-01)عند الدرجة (90 k) والقيمة (-8.15E-01) عند الدرجة (270 k) حيث يملك معدل الاستجابة لكبريتيد المولبديوم قيم موجبة عند درجات منخفضة(0.5 – 0.239~) ، مع ارتفاع درجة الحرارة نلاحظ تناقص تدريجي في قيم (Ratio V/H)، وانعكاس إشارة (Ratio V/H) إلى قيم سالبة بعد الدرجة (160 k)، كما نلاحظ تناقص قيم (Ratio V/H) الى قيم سالبة كبيرة (8.15E-01-) عند الدرجة (160 k)، والتفسير الفيزيائي: الإشارة الموجبة: تدل على حوامل موجبة (فجوات). وعند الاقتراب من الصفر يحدث توازن بين الالكترونات والفجوات. والإشارة السالبة: انتقال الهيمنة إلى إلكترونات نتيجة تغير في البنية الإلكترونية (Fermi surface). ان انعكاس الإشارة لمعدل الاستجابة المغناطيسية (Ratio V/H) مع الحرارة مؤشر قوي على انتقال في نوع حوامل الشحنة وبالتالي آلية النقل، تم توضيح تغيرات معدل الاستجابة المغناطيسية بالجدول (6).

جدول(6) تغيرات معدل الاستجابة المغناطيسية

Temp(PV)	Ratio V/H
90	2.89E-01
105	4.77E-01
120	3.74E-01
135	1.29E-01
150	2.50E-01
165	-1.55E-01
180	7.40E-02
195	-9.64E-02
210	-5.85E-02
225	-1.18E-01
240	-3.52E-01
255	-7.47E-01
270	-8.15E-01

4-12- دراسة تغييرات كمون هون لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغيير درجة الحرارة في التبريد الفائق: كبريتيد المولبديوم MoS_2 مادة ثنائية الأبعاد ذو بنية طبقية(Layered 2D material) ، الروابط في هذه البنية الطبقية قوية داخل الطبقة افقياً (Mo–S) ، لكنها ضعيفة بين الطبقات (عمودياً) بسبب قوى فاندرفالس (Van der Waals) وبالتالي النقل الكهربائي يتعلق بهذه الروابط ويتمييز بانه أنيسوتروبي (غير متساوٍ اتجاهياً متباين المناحي) وحساس جداً إلى كل من : عدد الطبقات العيوب، التبريد ، المجال المغناطيسي، لذلك قياسات الكمون بين نقاط مختلفة لا تكون متطابقة.

لقد قمنا باخذ اربع اقطاب من سطح قرص كبيريتيد المولبديوم مشكلة اربع نقاط (A, B, C, D) بشكل مربع والبعد بين كل من النقاط (1cm) كما هو موضح بالشكل (12):

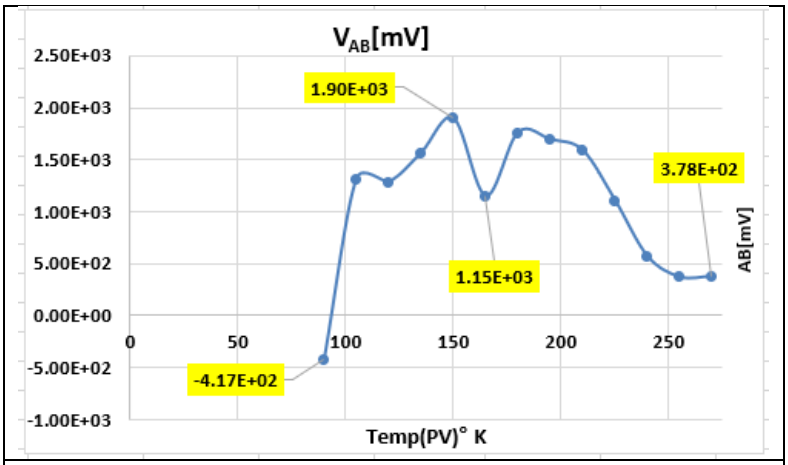


الشكل(12): يبين توضع الأقطاب الكهربائية لقياس الكمون الكهربائي

والهندسة الرباعية للنقاط (A, B, C, D): النقاط موزعة على محيط العينة كما هو موضح بالشكل (9). ويتم قياس كمون الكهربائي بين كل نقطتين بالشكل (V_{AB} , V_{AC}, V_{BC}, V_{CD}, $V_{BD}, V_{DA}, V_{HALL,average}$) وفي كل مرة يطبق تيار عمودي ويقاس الكمون العرضي، مثلاً: اذا كان التيار مطبق (A → C) فيكون كمون هول عرضيا أي كمون هول (B ↔ D).

4-12-1- كمون هول للنقطتين (A, B) V_{AB} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{AB}) مع تغيرات درجات حرارة (k 270-90) كما موضح بالشكل (13).



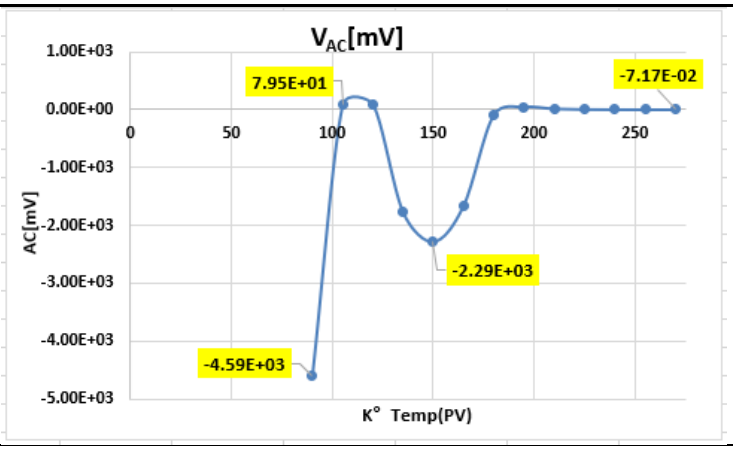
الشكل (13): بين تغيرات كمون هول (V_{AB}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل ان قيمة V_{AB} سالبة (-4.17E+02 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) ، وارتفاع حاد موجب بعد الدرجة (k 100) مع وجود قمة كبيرة (1.90E+03 mV) موافقة للدرجة (k 150)، ونلاحظ هبوط جزئي ثم تناقص تدريجي عند درجات أعلى وصولا للقيمة (3.78E+02 mV) عند الدرجة (k 170). والتفسير الفيزيائي: عند درجات منخفضة: يكون النقل محكوم بحالات موضعية أو طبقات ضعيفة التوصيل. وعند الدرجات بعد (k 100): تفعيل حراري لحوامل الشحنة وبالتالي فتح قنوات نقل داخل طبقات MoS_2. وجود القمة في قيم V_{AB}: تعكس إعادة توزيع التيار بين الطبقات، وتحرر المزيد حوامل الشحنة من المصائد.

4-12-2- كمون هول للنقطتين (A, C) V_{AC} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{AC}) مع تغيرات درجات حرارة (k 270-90) كما هو موضح بالشكل (14).

نلاحظ من الشكل (14) قيمة سالبة (-4.59E+03 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) وارتفاع حاد موجب بعد (k 100)، والقمة الكبرى (7.95E+01) موجودة عند الدرجة (k 105)، ثم هبوط جزئي ثم تناقص تدريجي الى القيمة (-2.29E+03) عند الدرجة (k 150)،

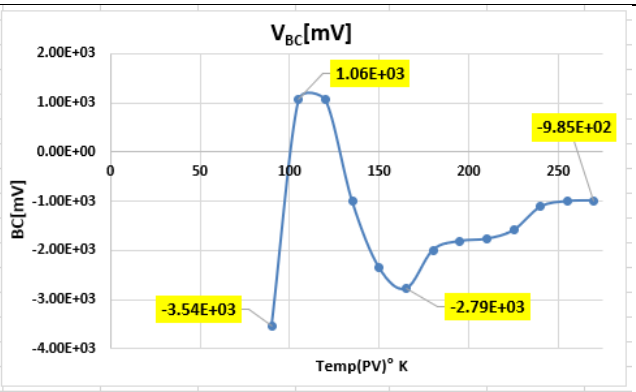


الشكل (14): بين تغيرات كمون هول (V_{AC}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

والتفسير الفيزيائي: إشارة موجبة صغيرة يليها انهيار حاد إلى قيم سالبة كبيرة هذا يمثل انتقالاً بين مسارات ناقلة مختلفة وطبقات ذات كثافات مختلفة.و الانخفاض الحاد: يدل على تغير مفاجئ في نوع الحوامل أو بداية هيمنة النقل بين الطبقات (interlayer).

4-12-3- كمون هول للنقطتين (B, C) V_{BC} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{BC}) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (15).



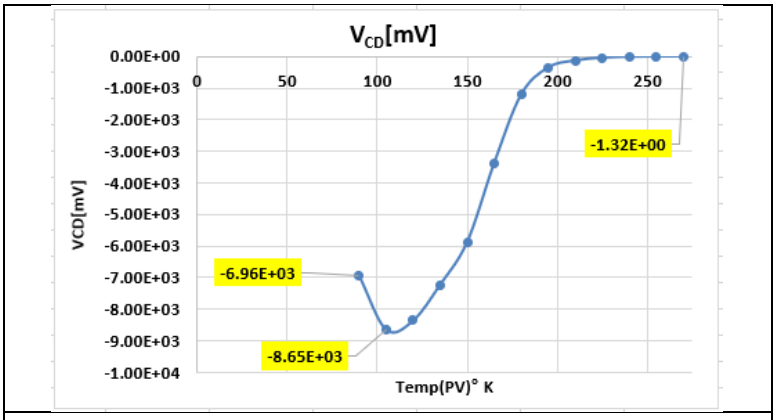
الشكل (15): بين تغيرات كمون هول (V_{BC}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل (15) قيمة سالبة (-3.54 E+03 mV) عند درجات منخفضة(~90 k) وارتفاع حاد موجب عند الدرجة (105 k) يمثل القمة الكبرى (1.06E+03 mV) موجودة عند الدرجة (105 k)، ثم هبوط جزئي ثم تناقص تدريجي الى القيمة (-2.79E+03 mV) عند الدرجة (165 k)، ثم تزايد تدريجي الى القيمة (-9.85E+02 mV) عند الدرجة (170 k). والتفسير الفيزيائي: قيم سالبة كبيرة عند درجات منخفضة، وقمة موجبة حادة (~1.06×10³ mV) ثم عودة إلى القيم السالبة هذه التغييرات تعكس منطقة: أو سماكة طبقية مختلفة وهذا دليل على تشكل اطوار متعددة (3R/2H)، اما القمة الحادة: تشير إلى تحول موضعي في النقل

وفتح قناة نقل جديدة مع ارتفاع درجات الحرارة هذا يبين ان الكمون عند نقاط التلامس في النقاط (B, C) حساس للحدود بين الحبيبات أو الطبقات.

4-12-4-كمون هول للنقطتين (C, D) V_{BC} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{CD}) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (16).



الشكل (16): بين تغيرات كمون هول (V_{CD}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

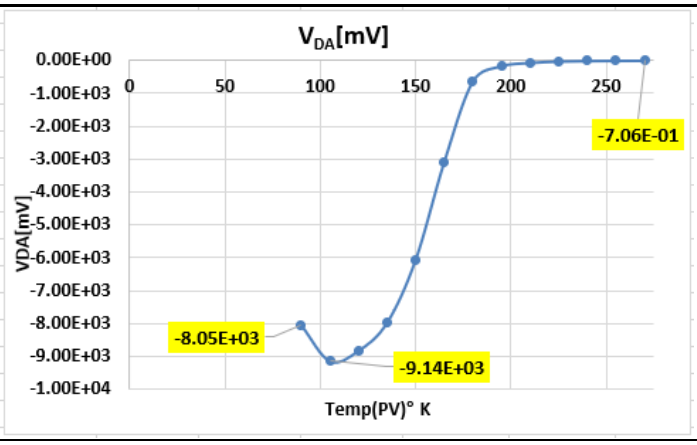
نلاحظ من الشكل (16) ان جميع قيم (V_{CD}) هي قيم سالبة في مجال درجات الحرارة (90-270 k) وقيمة (V_{CD}) قيمة سالبة (-6.96 E+03 mV) عند درجات منخفضة(~90 k) تنخفض قيمة (V_{CD}) عند الدرجة (105 k) الى القيمة (-8.65E+03 mV)، ثم ارتفاع تدريجي الى القيمة (-1.32E+03 mV) عند الدرجة (270 k)، والتفسير الفيزيائي: قيم سالبة كبيرة جداً عند درجات منخفضة وتحسن تدريجي مع الحرارة مع اقتراب من الصفر، وعند درجات أعلى عند الدرجة (270 k): هذا يفسر يمثل النقل العمودي نسبياً بين الطبقات وهي المناطق ضعيفة التوصيل وذلك لان: التبريد يقمع النقل العمودي بشدة، اما التسخين: يفعّل القفز بين الطبقات (Hopping / Thermally activated)وهذا أكبر دليل على أنيسوتروبية MoS_2 . ويمكننا الربط بين الكمونات السابقة والناقلية الكهربائية من خلال الجدول التالي الذي يبين تغير الناقلية بين الأقطاب السابقة

الجدول (7): يبين الربط بين القياس وتوزع الطبقات

الثنائية	ماذا يمثل
V_{AB}	نقل داخل الطبقات العليا
V_{AC}	انتقال بين مناطق مختلفة
V_{BC}	حدود طبقية / عيوب
V_{CD}	نقل بين الطبقات(out-of-plane)

5-12-4-كمون هول للنقطتين (D, A) V_{DA} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{DA}) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما موضح بالشكل (17).

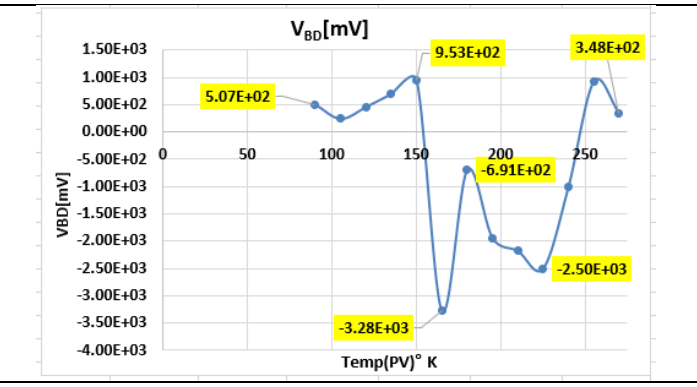


الشكل (17): بين تغيرات كمون هول (V_{DA}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل (17) ان جميع قيم (V_{DA}) هي قيم سالبة في مجال درجات الحرارة (k 270–90) وقيمة (V_{CD}) قيمة سالبة (-8.05 E+03 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) تنخفض قيمة (V_{CD}) عند الدرجة (k 105) الى القيمة (-9.14 E+03 mV)، ثم ارتفاع تدريجي الى القيمة (-7.01 E+03 mV) عند الدرجة (k 270)، وسلوك تغيرات (V_{CD}) لكبريتيد المولبديوم: قيم سالبة كبيرة جداً عند درجات منخفضة وارتفاع حاد بدءاً من (k 150–130) واقتراب من الصفر عند درجات أعلى(k 275–200~) ، والتفسير الفيزيائي: عند درجات منخفضة: كثافة الحوامل الحرة قليلة جداً، النقل محكوم بـ حالات موضعية ، قفز حراري ضعيف وبالتالي كمون هول كبير بالقيمة المطلقة. ومع ارتفاع الحرارة: يتم تفعيل حراري للإلكترونات إلى حزمة التوصيل وبالتالي زيادة عدد حاملات الشحنة n وبالتالي تناقص VH وهذا السلوك نموذجي لشبه موصل طبقي n-type تحت التبريد.

4-12-6-كمون هول للنقطتين (B, D) V_{BD} مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول (V_{BD}) مع تغيرات درجات حرارة (k 270–90) كما موضح بالشكل (18).



الشكل (18): بين تغيرات كمون هول (V_{DA}) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

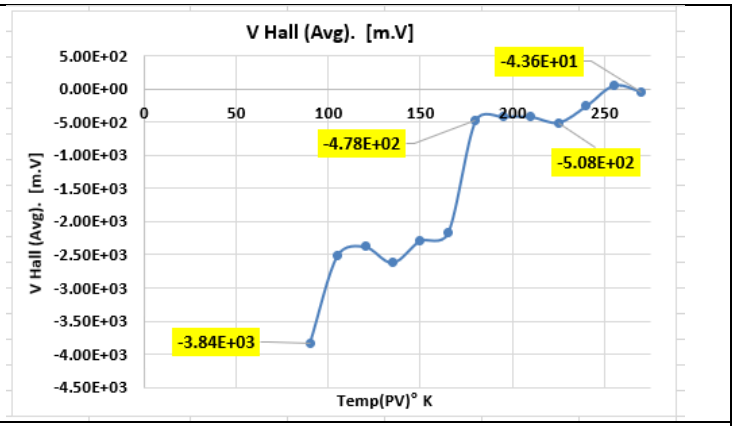
نلاحظ من الشكل (18) ان قيم (V_{BD}) هي قيم موجبة في مجال درجات الحرارة (k 150–90) وقيمة (V_{BD}) تساوي الى (5.07 E+02 mV) عند درجات منخفضة(k 90~) وتزداد قيمة (V_{BD}) تدريجيا حتى الدرجة (k 150) الى

القيمة (9.53 E+02 mV)، ثم انخفاض حاد الى القيمة (−3.28 E+03 mV) عند الدرجة (165 k)، ثم تزداد قيمة V_{BD} الى القيمة (−6.91 E+02 mV) ثم تتناقص(V_{BD}) لكبريتيد المولبديوم الى القيمة (−2.50 E+02 mV) ثم تزداد تدريجيا الى القيمة (9.27E+02 mV) عند درجة الحرارة (255 k)، ثم تتناقص الى القيمة (3.48 E+02 mV) عند الدرجة (270 k). أي ان تغييرات (V_{BD}) في كبريتيد المولبديوم قيم موجبة صغيرة عند درجات منخفضة تليها تقلبات واضحة مع قمم وقيعان، قيم سالبة كبيرة عند (100−200 k) والتفسير الفيزيائي: الكمون في هذه الثنائية حساس جداً إلى يتجلى ذلك من خلال تقلبات منحني التغيرات وذلك بسبب: عدم تجانس العينة واختلاف عدد الطبقات موضعياً وتأثير العيوب. أيضا التقلبات تعكس: منافسة بين مسارات نقل متعددة وهذا يعني انتقال التيار بين طبقات ذات خصائص مختلفة.

- وجود تغيرات الإشارة لا يعني تغير نوع المادة، بل تغير الهيمنة الموضعية لحوامل الشحنة.

4-12-7-تغييرات كمون هول المتوسط $V_{HALL\ average}$ لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغييرات درجة الحرارة:

تمت دراسة تغيرات كمون هول ($V_{HALL\ average}$) مع تغيرات درجات حرارة (90−270 k) كما موضح بالشكل (19).



الشكل (19): بين تغيرات كمون هول ($V_{HALL\ average}$) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (T)

نلاحظ من الشكل (19) ان قيم ($V_{HALL\ average}$) لكبريتيد المولبديوم هي قيم سالبة في مجال درجات الحرارة (90− 150 k) وقيمة ($V_{HALL\ average}$) تساوي الى (−3.84 E+03 mV) عند درجات منخفضة(90~ k) وتزداد قيمة ($V_{HALL\ average}$) تدريجيا حتى الدرجة (180 k) الى القيمة (-4.78 E+02 mV)، ثم ثبات في قيم كمون هول في مجال درجات الحرارة (180 – 225 k) ثم تزداد قيمة ($V_{HALL\ average}$) الى القيمة (−4.36 E+01 mV) عند الدرجة (270 k)، وهذا يعني ان السلوك العام يتميز بوجود قيم سالبة كبيرة عند درجات منخفضة وازدياد تدريجي مع الحرارة، كذلك اقتراب من الصفر عند درجات عالية، كما انه لا يظهر انعكاس إشارة واضح و التفسير الفيزيائي:

(a) الإشارة السالبة: تؤكد أن:

- حوامل الشحنة السائدة هي **الإلكترونات**
- العينة من نوع(n-type) كما هو متوقع لـ(MoS_2)

(b) التغير مع الحرارة:

- عند درجات منخفضة: عدد الحوامل قليل، $V_H(T)$ كبير.
- مع ارتفاع الحرارة تفعيل حراري للإلكترونات وزيادة كثافة الحالات المتاحة وبالتالي انخفاض $V_H(T)$ وهذا السلوك يتوافق تماماً مع العلاقة: $n(t) \propto -(\frac{Ea}{k.t})$

والسؤال المطروح هنا لماذا تختلف الكمونات الموضعية عن المتوسط لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) ؟

- الأسباب الفيزيائية تتعلق في بنية ثنائي كبريتيد المولبديوم MoS_2 فهو غير متجانس سماكياً نتيجة تشكل الاطوار(3R/2H) ويحتوي على: شواغر كبريت، حدود حبيبات، مناطق متعددة الطبقات.
- القياس الرباعي(A,B,C,D) يكشف الفروق الموضعية، المتوسط يلغي التشوهات المحلية.

الربط مع التبريد الفائق:

- عند التبريد تقل كثافة الحوامل وبالتالي يزداد تأثير الحقول وهذا يؤدي الى ظهور لاخطية في $V_H(T)$
- ومع التسخين يتحول النقل إلى (Band conduction) وسلوك شبه كلاسيكي.
- لقد تم ترتيب نتائج قياسات الكمون (V) بين الأقطاب المختلفة كما هو موضح في الجدول (8)

جدول (8) يبين تغييرات الكمون الكهربائي بين الأقطاب المختلفة $V_{AB}, V_{AC}, V_{BC}, V_{CD}$, $V_{BD}, V_{DA}, V_{HALL,average}$

4-13- دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (90-270 k):

دراسة كثافة حاملات الشحنة في طبقات كبريتيد المولبديوم (MoS_2) ذات أهمية علمية وتطبيقية كبيرة، خاصة في فيزياء

Temp(PV)	AB[mV]	BC[mV]	AC[mV]	CD[mV]	DA[mV]	BD[mV]	V Hall (Avg). [m.V]
90	-4.17E+02	-3.54E+03	-4.59E+03	-6.96E+03	-8.05E+03	5.07E+02	-3.84E+03
105	1.32E+03	1.06E+03	7.95E+01	-8.65E+03	-9.14E+03	2.44E+02	-2.52E+03
120	1.29E+03	1.07E+03	9.45E+01	-8.36E+03	-8.83E+03	4.60E+02	-2.38E+03
135	1.57E+03	-1.01E+03	-1.77E+03	-7.22E+03	-7.97E+03	6.98E+02	-2.62E+03
150	1.90E+03	-2.36E+03	-2.29E+03	-5.87E+03	-6.06E+03	9.53E+02	-2.29E+03
165	1.15E+03	-2.79E+03	-1.67E+03	-3.38E+03	-3.08E+03	-3.28E+03	-2.17E+03
180	1.76E+03	-2.00E+03	-9.70E+01	-1.21E+03	-6.35E+02	-6.91E+02	-4.78E+02
195	1.69E+03	-1.81E+03	4.71E+01	-3.56E+02	-1.69E+02	-1.94E+03	-4.24E+02
210	1.59E+03	-1.77E+03	1.47E+01	-1.33E+02	-6.79E+01	-2.18E+03	-4.24E+02
225	1.11E+03	-1.59E+03	3.72E+00	-4.36E+01	-2.40E+01	-2.50E+03	-5.08E+02
240	5.73E+02	-1.11E+03	1.04E+00	-1.30E+01	-9.21E+00	-9.99E+02	-2.60E+02
255	3.72E+02	-9.99E+02	1.92E-01	-3.65E+00	-2.86E+00	9.27E+02	4.89E+01
270	3.78E+02	-9.85E+02	-7.17E-02	-1.32E+00	-7.06E-01	3.48E+02	-4.36E+01

الحالة الصلبة وتقانة المواد ثنائية الأبعاد. فيما يلي عرض أكاديمي منظم يوضح أهم فوائد هذه الدراسة:

- فهم آلية النقل الكهربائي(Charge Transport Mechanism) .
- تحديد نوع الحوامل وانقلابات كمون هول.
- دراسة تأثير التبريد الفائق والحالات الموضعية.
- فهم بنية نطاق الطاقة (Band Structure) .
- تقييم جودة العينة والعيوب البلورية.
- استكشاف الظواهر الفيزيائية المتقدمة: مثل (التفاعلات الإلكترونية القوية، الانتقالات الطورية الإلكترونية، السلوك شبه الفلزي عند التطعيم العالي، إمكانية الظهور الفائق (Superconductivity) عند التطعيم أو الضغط).

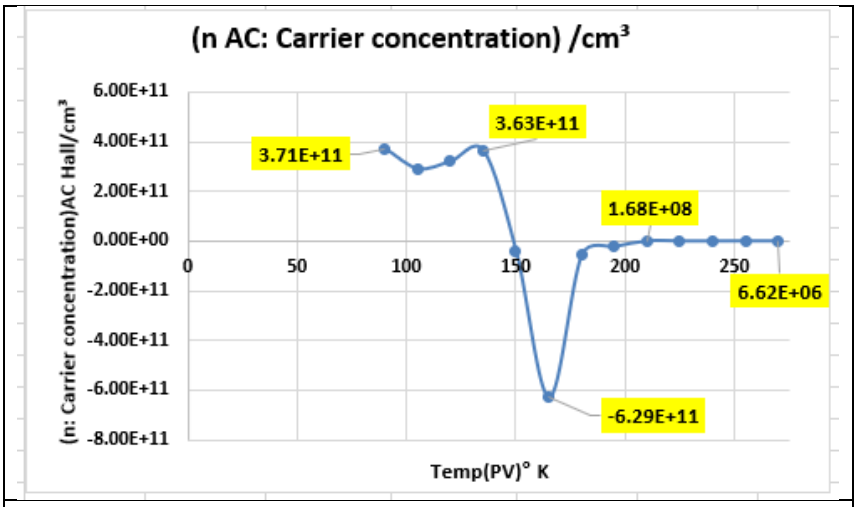
في قياسات تأثير هول (Hall Effect)، تعتمد الإشارة (موجبة أو سالبة) لتركيز الحاملات على نوع الحاملة المسيطرة:

- قيمة موجبة: تعني أن الحاملات المسيطرة هي فجوات (Holes)، وهي حاملات شحنة موجبة.
- قيمة سالبة: تعني أن الحاملات المسيطرة هي إلكترونات (Electrons)، وهي حاملات شحنة سالبة.

تم ترتيب نتائج قياسات الكمون بين الاقطاب المختلفة

4-13-1- دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n AC: Carrier concentration) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (90-270 k):

تمت دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n AC: Carrier concentration) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (20).



الشكل (20): بين تغيرات كثافة حاملات الشحنه للثنائية (n AC: Carrier concentration) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (*T*)

يتبين من الشكل (20) تغير كثافة حاملات الشحنة المستخلصة من استجابة التيار المتناوب (n:AC) مع درجة الحرارة.

- عند درجات الحرارة المنخفضة (90–135 k~) تظهر قيم موجبة وكبيرة نسبيًا لكثافة الحوامل (3.6 /cm□³ E+11)، ما يشير إلى سيطرة حاملات من نوع واحد (غالبًا إلكترونات) مع توصيل شبه موصل ضعيف التأثر بالحرارة.
- مع الاقتراب من (150 k) نلاحظ انخفاضًا حادًا وتحول الإشارة إلى سالبة بقيمة كبيرة (-6.29E+11/ cm□³)، وهو سلوك غير كلاسيكي يدل على: انتقال في آلية التوصيل، ومنافسة بين إلكترونات وثقوب نتيجة تأثير حالات موضعية.
- بعد هذا الحد الأدنى، ومع زيادة درجة الحرارة اعلى من (180 k) تعود كثافة الحوامل إلى قيم صغيرة جدًا (10□–10□ cm□³~)، ما يشير إلى: إعادة تجمّد بعض الحوامل، أو توازن جزئي بين مساهمات متعددة تقلل الإشارة الصافية لكمون هول.

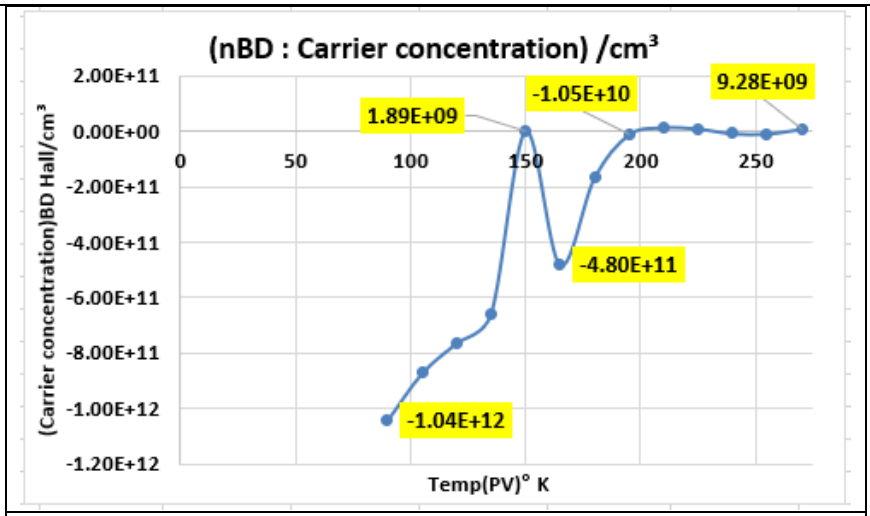
- **التفسير الفيزيائي: لحاملات الأساسية عند درجات الحرارة المنخفضة: تشير القيمة الموجبة للحاملات في البداية إلى أن المادة من نوع p (حاملات موجبة، أي فجوات).**
- **الانتقال الحاد عند (k 165 –135): هذا هو الجزء الأكثر إثارة للاهتمام والذي يحتاج لتوضيح. يمكن تفسير هذا التحول الحاد لعدة أسباب:**
- **تغير آلية النقل: يتغير النقل من سلوك يعتمد على الفجوات إلى سلوك يعتمد على الإلكترونات بسبب آليات معقدة مثل تغير في تركيز الشوائب أو العيوب مع ارتفاع درجة الحرارة.**
- **تعدد الأطوار (Phase Transition): كما ذكرنا سابقاً، قد يكون هناك انتقال طوري يؤثر على نطاق الطاقة (Band structure) وبالتالي يغير نوع وكثافة الحاملات.**
- **الحاملات عند درجات الحرارة الأعلى: القيمة الموجبة الصغيرة تعني أن المادة لا تزال من نوع p، ولكن تركيز حاملات الشحنة أقل بكثير. هذا يتفق مع ما ذكرناه سابقاً عن تجمّد الحاملات (Freeze–out)، حيث أن معظم الحوامل (الفجوات) تكون مقيدة أو غير حرة للحركة عند درجات الحرارة المنخفضة.**
- **هذا الانخفاض الحاد والتحول بين القيم الموجبة والسالبة في تركيز الحاملات (مقاساً بتأثير هول) يعكس تغيرًا معقدًا في آلية النقل وتوزيع الحاملات مع درجة الحرارة، ومرتبطًا بـ:**
- **تغير في دور الشوائب والعيوب مع ارتفاع درجة الحرارة.**
- **حدوث انتقال طوري يؤثر على السويات الطاقية.**
- **ازدياد ظاهرة تجمّد الحوامل (Freeze–out) عند درجات الحرارة المنخفضة، مما يجعل القياس حساسًا لأي تغير طفيف**

4–13–2– دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n BD: Carrier concentration) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (k 270–90):

في قياسات تأثير هول (Hall Effect)، **تعتمد الإشارة (موجبة أو سالبة)** لتركيز الحاملات على **نوع الحاملة المسيطرة:**

- **قيمة موجبة:** تعني أن الحاملات المسيطرة هي **فجوات (Holes)**، وهي حاملات شحنة موجبة.
- **قيمة سالبة:** تعني أن الحاملات المسيطرة هي **إلكترونات (Electrons)**، وهي حاملات شحنة سالبة.

تمت دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n BD: Carrier concentration) مع تغيرات درجات حرارة (k 270–90) كما هو موضح بالشكل (21).



الشكل (21): بين تغيرات كثافة حاملات الشحنه للثنائية (n BD: Carrier concentration) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (*T*)

يتبين من الشكل (21) تغير كثافة حاملات الشحنة المستخلصة من استجابة التيار المتناوب (n:BD) مع درجة الحرارة. حيث يمكن تفسير سلوك كثافة الحوامل المستخلصة من القياس المباشر (bulk-dominated).

- عند درجات الحرارة المنخفضة (90 k) تكون الكثافة سالبة وكبيرة($\sim 10^{12}$ cm^{-3}) ، ما يشير إلى سيطرة واضحة لحوامل من نوع معين (غالبًا إلكترونات مرتبطة بحالات شوائب).
- قرب (150 k) حدثت قفزة في قيمة n تفسيرها بالشكل التالي

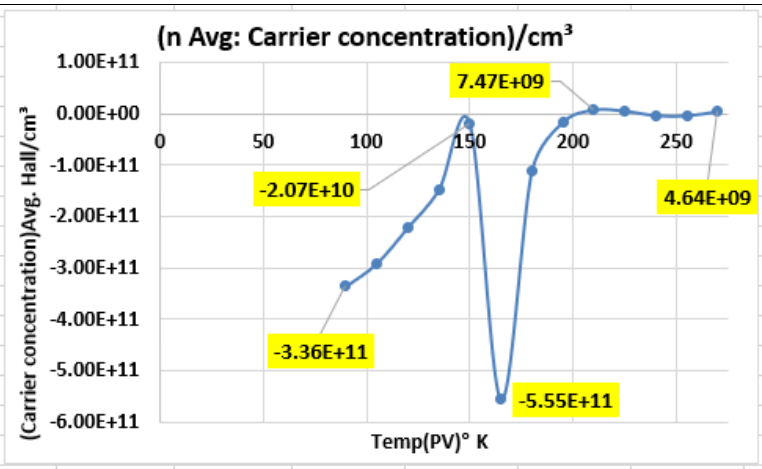
1. **تغير دور الحاملات:** عند هذه الدرجة الحرارية (150 k) ، يحدث تغير جذري في كيفية مساهمة الإلكترونات والفجوات في التوصيل الكهربائي.
   - **قبل** (150 k): الإلكترونات هي الحاملات المسيطرة (تركيز سالب).
   - **عند** (150 k): تصبح مساهمة الفجوات موجبة جدًا بحيث تطغى على قيمة الإلكترونات السالبة (يحدث تعويض أو **Compensation**).
   - **بعد** (150 k) **(لفترة وجيزة):** تعود الإلكترونات لتصبح المسيطرة ولكن بقيم سالبة أقل، ثم تبدأ الفجوات بالتغلب مرة أخرى.
2. **آليات التغير (لماذا يحدث هذا؟):**
   - **تعدد الأطوار (Phase Transition):** هذا هو التفسير الأقوى. مادة MoS_2 توجد في أطوار مختلفة (مثل 2H, 1T). عند درجة حرارة (150 k) تحدث ظاهرة **تحول طوري (Phase transition)** أو تغير في ترتيب العيوب البلورية (Defect ordering). هذا التحول يغير **نطاق الطاقة (Band structure)** للمادة، مما يؤثر على نوع وكثافة الحاملات المسيطرة.
   - **ظواهر النقل الكمومية (Quantum Transport Phenomena):** عند درجات الحرارة المنخفضة، قد تظهر تأثيرات مثل **الموضعية (Localization)** أو **تداخل الموجات الإلكترونية (Electron wave interference)**. هذه الظواهر تجعل سلوك الحاملات غير تقليدي، ويمكن أن تسبب انعكاسًا في إشارة هول.

- **تأثير العيوب والشوائب (Defect/Impurity Effects):** قد تتغير حالة تأين العيوب أو الشوائب الموجودة في المادة مع درجة الحرارة، مما يؤثر على تركيز الحاملات.

بعد ذلك، عند درجات الحرارة الأعلى من (180 k) تستقر الكثافة عند قيم موجبة صغيرة ($\sim 10^{9}$ /cm^{-3})، ما يعكس: توصيلًا أكثر انتظامًا، وتوازنًا بين آليات التشتت والانتشار.

4-13-3- دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n Avg: Carrier concentration) لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) مع تغير درجات الحرارة في التبريد الفائق (90-270 k):

- تمت دراسة تغييرات كثافة حاملات الشحنة للثنائية (n Avg) مع تغيرات درجات حرارة (90-270 k) كما هو موضح بالشكل (22).



الشكل (22): بين تغيرات كثافة حاملات الشحنه للثنائية (n avg: Carrier concentration) مع تغيرات الحرارة في التبريد الفائق (*T*)

يتبين من الشكل (22) تغييرات (n Avg) المتوسط الفعّال لكثافة الحوامل الناتج عن دمج استجابات AC و BD.

- عند درجات الحرارة المنخفضة نلاحظ وجود **(القيم الموجبة) في درجات الحرارة** (90-140 k) تعني أن الحاملات الغالبة هي **فجوات (Holes)** أي أن المادة تسلك سلوك شبه موصل من النوع **p-typ**.
- **القيم السالبة** (140-180 k) تعني حدوث **انعكاس في إشارة هول(Hall Sign Inversion)** ، حيث تصبح **الإلكترونات** هي الحاملات.
- يؤكد سيطرة الحالات الموضعية وعند (140-160 k) يظهر انخفاض حاد جدًا إلى قيمة دنيا ($\sim -5.5\times10^{11}$/ cm^{-3})، وهو مؤشر قوي على انتقال إلكتروني وإعادة تنظيم بنية نطاق الطاقة.

مع ارتفاع درجة الحرارة (180 k) تعود الكثافة إلى قيم موجبة صغيرة ($\sim 10^{9}$/ cm^{-3}) ، ما يدل على: سيطرة الحوامل الحرة المحفزة حراريًا، وبالتالي واستقرار نسبي في آلية التوصيل.

(n Avg) يعطي صورة شاملة لسلوك النظام، ويؤكد وجود منطقة حرجة حراريًا في MoS_2 حيث تتغير طبيعة الحوامل وآلية النقل بشكل جذري.

تم ترتيب نتائج قياس كثافة حاملات الشحنة في الجدول (7).

جدول (7) يبين تغيرات حاملات الشحنة (n) مع درجات الحرارة

Temp (PV)	(Carrier concentration) Avg. Hall/cm³	(Carrier concentration) AC Hall/cm³	(Carrier concentration) BD Hall/cm³
90	-3.36E+11	3.71E+11	-1.04E+12
105	-2.91E+11	2.91E+11	-8.72E+11
120	-2.21E+11	3.20E+11	-7.63E+11
135	-1.47E+11	3.63E+11	-6.58E+11
150	-2.07E+10	-4.33E+10	1.89E+09
165	-5.55E+11	-6.29E+11	-4.80E+11
180	-1.11E+11	-5.49E+10	-1.67E+11
195	-1.67E+10	-2.30E+10	-1.05E+10
210	7.47E+09	1.68E+08	1.48E+10
225	5.18E+09	-2.80E+08	1.06E+10
240	-3.46E+09	-2.81E+08	-6.64E+09
255	-3.98E+09	-1.24E+06	-7.96E+09
270	4.64E+09	6.62E+06	9.28E+09

5- المناقشة

تشير النتائج إلى أن النقل الكهربائي في طبقات (MoS_2) ضمن المجال الحراري (90–270 k) لا يتبع سلوكًا شبه موصلًا كلاسيكيًا بسيطًا، بل يتأثر بعدة آليات نقل متداخلة. فعند درجات الحرارة المنخفضة يزداد تأثير الحالات الموضعية والعيوب البنيوية، مما يؤدي إلى احتجاز جزء من الحاملات وانخفاض عدد الحاملات الحرة المشاركة في التوصيل، وهو ما يفسر ازدياد المقاومية وارتفاع المقاومة المغناطيسية في هذا المجال الحراري.

ومن النتائج المهمة في هذه الدراسة انعكاس إشارة هول قرب (150 k) ، والمتزامن مع تغير ملحوظ في المقاومية وكثافة الحاملات، مما يشير إلى تحول في آلية النقل المسيطرة أو إلى تغير في نوع الحاملات السائدة.

كذلك فإن السلوك غير الرتيب للمقاومية والتغير الواضح في المقاومة المغناطيسية عند درجات الحرارة المنخفضة قد يرتبط بتأثيرات الموضعية الإلكترونية أو تداخل المسارات الإلكترونية، وهي ظواهر تظهر غالبًا في المواد الطبقية وثنائية الأبعاد. ومع ارتفاع درجة الحرارة، تتحرر الحاملات تدريجيًا من المستويات الموضعية بفعل الإثارة الحرارية، مما يؤدي إلى اقتراب السلوك من النقل شبه الموصل التقليدي. وبصورة عامة تعكس هذه النتائج الطبيعة المعقدة لآليات النقل في MoS_2 ودور العيوب والحالات الموضعية في تحديد خصائصه الكهربائية.

6 - الاستنتاجات:

1. سلوك نقل إلكتروني غير تقليدي في طبقات MoS_2 أظهرت القياسات أن النقل الإلكتروني في طبقات كبريتيد المولبديوم ينحرف عن السلوك شبه الموصل الكلاسيكي، خصوصًا عند درجات الحرارة المنخفضة، ما يعكس الطبيعة ثنائية الأبعاد للمادة وتأثير الحالات الموضعية والعيوب البنيوية.

2. إن انعكاس إشارة هول الملحوظ عند k 150، والذي يتزامن مع تغير حاد في المقاومية، هو دليل قوي على حدوث انتقال طوري إلكتروني (Electronic Phase Transition) ، وليس مجرد تغير في تركيز الحاملات. هذا الانعكاس يمكن تفسيره بتغير في طوبولوجيا السويات الالكترونية وبالتالي سطح فيرمي، وهو مفهوم كمومي أساسي.
3. سيطرة الحالات الموضعية والشوائب العميقة لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) عند التبريد الفائق في مجال التبريد الفائق، تحكم النقل حالات موضعية مرتبطة بشوائب وعيوب (مثل فجوات الكبريت)، ويظهر ذلك من القيم الكبيرة لكمون هول وكثافة الحوامل، وكذلك من التعزيز الملحوظ للمقاومة المغناطيسية.
4. السلوك غير الرتيب للمقاومة الحجمية، مع وجود قمم مميزة عند درجات حرارة منخفضة، لا يمكن تفسيره بالكامل بالنماذج الكلاسيكية. هذه الظاهرة قد تكون مؤشراً على تأثيرات الموضعية الكمومية (Quantum Localization Effects)أو التداخل الضعيف(Weak Localization) ، وهي ظواهر شائعة في المواد ثنائية الأبعاد.
5. تحرير حراري تدريجي للحوامل مع ارتفاع درجة الحرارة مع زيادة درجة الحرارة في كبريتيد المولبديوم (MoS_2)، تتحرر الحوامل من مستويات الشوائب إلى نطاقات النقل الحرة، ما يؤدي إلى استقرار كثافة الحوامل، وانخفاض تأثيرات التداخل الكمومي، وانتقال النظام إلى نقل أقرب للسلوك الجوهري.
6. تعدد قنوات النقل واختلاف الاستجابة بين تقنيات القياس الفروقات بين نتائج القياسات (n AC) و (n BD) تؤكد وجود قنوات نقل متعددة (سطحية وحجمية) ذات ديناميكيات مختلفة، في حين يوفر المتوسط بينهما توصيفًا فيزيائيًا أدق للسلوك الفعلي للنقل.
7. ارتباط وثيق بين كمون هول والمقاومة المغناطيسية التوافق بين انقلاب إشارة كمون هول والتغيرات اللاخطية في المقاومة المغناطيسية يؤكد أن كلا الظاهرتين ناتجتان عن نفس التحولات في آلية النقل والتبعثر الإلكتروني تحت تأثير الحرارة والمجال المغناطيسي.
8. دور الحالات الموضعية في تعزيز المقاومة المغناطيسية لكبريتيد المولبديوم (MoS_2) حيث الارتفاع الكبير في MR عند درجات الحرارة المنخفضة يعكس وجود نقل عبر حالات موضعية، حيث يؤدي المجال المغناطيسي إلى تقليل التداخل الكمومي وزيادة المقاومة ونلاحظ أيضا تراجع المقاومة المغناطيسية مع ارتفاع درجة الحرارة مع زيادة درجة الحرارة، تنخفض MR تدريجيًا نتيجة زيادة تبعثر الفونونات، فقدان التماسك الطوري للإلكترونات وبالتالي سيطرة النقل الكلاسيكي على السلوك الكمومي.
9. كمون هول يمثل انعكاس مباشر لبنية نطاق الطاقة والعيوب البلورية حيث إن السلوك الحراري لكثافة الحوامل يعكس بوضوح تأثير فجوة الطاقة الفعالة في MoS_2 ودور مستويات المانحات العميقة، وتاثير التفاعلات الإلكترونية مما يجعل قياسات هول أداة قوية لاستقصاء بنية النطاقات والعيوب.

6- التوصيات:

نوصي بدراسة تاثير هول المغناطيسي على كبريتيد المولبديوم في درجات الحرارة الطبيعية (درجة حرارة المختبر) وكذلك في ظروف تشغيل طبيعية او قاسية للأجهزة الالكترونية عند درجات حرارة تتراوح (0- 100 °C).

"بناءً على النتائج التجريبية، وخاصةً:

1. **انعكاس إشارة هول (Hall Sign Inversion)** بشكل حاد عند k 150.
2. **التزامن بين هذا الانعكاس وقمة المقاومية** في نفس درجة الحرارة.
3. **السلوك غير الرتيب للمقاومية** عند درجات الحرارة المنخفضة.

نعتقد أن هذه الظواهر لا يمكن تفسيرها بالكامل بالنماذج الكلاسيكية. إنها تشير إلى وجود **ظواهر كمومية (Quantum Phenomena)** تلعب دوراً مهماً في الناقلية في طبقات MoS_2 تحت هذه الظروف، مثل:

- **تأثيرات الحالات الموضعية الكمومية (Quantum Localization).**
- **تعدد قنوات النقل (Multi-band/Multi-channel Transport)** المتأثرة بالبنية الكمومية للمادة.

هذه الظواهر تتطلب دراسة أعمق باستخدام تقنيات متقدمة، ولكن النتائج الأولية تشير إلى مجال بحث مثير للاهتمام في فيزياء المواد الكمومية.

References:

1. Neal, A. T., Liu, H., Gu, J., & Ye, P. D. (2013). **Magneto transport in MoS□: Phase coherence, spin–orbit scattering, and the Hall factor**. *ACS Nano, 7*(8), 7077–7082**.** https://doi.org/10.1021/nn4027734.
2. Radisavljevic, B., & Kis, A. (2013). **Mobility engineering and metal–insulator transition in monolayer MoS□.** *arXiv*. https://arxiv.org/abs/1301.4947
3. Cui, X., Lee, G. H., Kim, Y. D., et al. (2014). Multi-terminal electrical transport measurements of MoS□ using van der Waals heterostructure. *arXiv*. https://arxiv.org/abs/1412.5977
4. Ko, T. S., Huang, C. C., & Lin, D. Y. (2016). **Optical and transport properties of Ni–MoS□ films: Temperature-dependent Hall effect**. *ResearchGate Dataset*. http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.2825.8166
5. Du, L., Yu, H., Xie, L., et al. (2016). **The effect of twin grain boundary tuned by temperature on the electrical transport properties of monolayer MoS□.** *Crystals, 6*(9), 115. https://doi.org/10.3390/cryst6090115
6. Jeong, S. H., Liu, N., Park, H., et al. (2018). **Temperature-dependent electrical properties of Al□O□-passivated multilayer MoS□ thin-film transistors**. *Applied Sciences, 8*(3), 424. https://doi.org/10.3390/app8030424
7. Wu, Z., Zhou, B. T., Cai, X., et al. (2019). **Intrinsic valley Hall transport in atomically thin MoS□**. *Nature Communications, 10*, 611. https://doi.org/10.1038/s41467-019-08573-0
8. Brumme, T., Calandra, M., & Mauri, F. (2015). **First-principles theory of field-effect doping in TMDCs: Hall coefficient and electrical conductivity**. *Physical Review B, 91*, 115301. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.115301
9. Baugher, B. W. H., Churchill, H. O. H., Yang, Y., & Jarillo-Herrero, P. (2014). **Optoelectronic devices based on electrically tunable p–n diodes in a monolayer dichalcogenide**. *Nano Letters*. https://doi.org/10.1021/nl5019109
10. Kayyalha, M., Maassen, J., Lundstrom, M., Shi, L., & Chen, Y. P. (2016). **Gate-tunable and thickness-dependent electronic and thermoelectric transport in**

few-layer MoS□. *Journal of Applied Physics, 120*(13), 134302. https://doi.org/10.1063/1.4963879

11. Chao, J., Han, X., Sun, H., et al. (2016). **Platinum nanoparticles supported MoS□ nanosheet for simultaneous detection of dopamine and uric acid**. *Science China Chemistry, 59*, 332–337. https://doi.org/10.1007/s11426-015-5492-9
12. Kochat, V., Apte, A., Hachtel, J. A., Kumazoe, H., Krishnamoorthy, A., Susarla, S., Vashishta, P., Kalia, R., Nakano, A., Tiwary, C. S., & Ajayan, P. M. (2017). **Re doping in 2D transition metal dichalcogenides as a new route to tailor structural phases and induced magnetism.** *Advanced Materials, 29*(43), 1703754. https://doi.org/10.1002/adma.201703754
13. Zhou, K. G., Mao, N. N., Wang, H. X., Peng, Y., & Zhang, H. L. (2011). **A mixed-solvent strategy for efficient exfoliation of inorganic graphene analogues**. *Angewandte Chemie International Edition, 50*(46), 10839–10842. https://doi.org/10.1002/anie.201105364
14. Marks, R., Schranck, A., Stillwell, R., & Doudrick, K. (2020). **Stability of 2H- and 1T-MoS□ in the presence of aqueous oxidants and its protection by a carbon shell**. *RSC Advances, 10*, 9324–9334. https://doi.org/10.1039/D0RA00788A
15. Li, X., Li, T. C., Huang, S., & Zhang, J. (2020). **Controllable synthesis of two-dimensional molybdenum disulfide (MoS□) for energy-storage applications**. *ChemSusChem, 13*(6). https://doi.org/10.1002/cssc.201902706
16. Al-Hussein, H., Al-Shar, J., Othman, S., & Al-Khamisy, H. (2023). **Studying the electronic (structural and optical) properties of molybdenum disulfide (MoS□) nanostructures**. *Aleppo University Journal of Research (Basic Sciences Series)*, (170). *(No DOI available).*
17. Alhussein, H., AlSharr, J. Q., Othman, S., & AlKhamisy, H. (2023). **Study of the electrical and electronic properties of crystalline molybdenum disulfide (MoS□-3R) semiconductor nano using alternating current (AC) measurements.** *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics, 14*(6), 633–643. https://doi.org/10.17586/2220-8054-2023-14-6-633-643
18. Wei, H., Tan, A., et al. (2022). **Interface engineering-induced 1T-MoS□/NiS heterostructure for efficient hydrogen evolution reaction.** *Catalysts, 12*(9), 947. https://doi.org/10.3390/catal12090947