

مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الأساسية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 47 . العدد 16

1447 هـ - 2025 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

عضو هيئة التحرير	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

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 الإلكتروني : 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) + word / CD من البحث منسق حسب شروط المجلة.
- طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
- إذا كان الباحث طالب دراسات عليا: يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقة على النشر في المجلة.
- إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية: يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.
- إذا 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.
- إذا 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 بالنسبة لكليات (الآداب - الاقتصاد - 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 25×17.5 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
 - كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي - 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 للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره 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 ورد 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 - الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة - سنة النشر - وتتبعها معترضة (-) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة - دار النشر وتتبعها فاصلة - 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:

— بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة — المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة — 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 (50000) ل.س أربعون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (200000) ل.س مئة ألف 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 (15000) ل.س ستة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
38-11	زينب الحسن أ.د. عبد الرزاق الصوفي أ.د. عبد الله رستناوي	دراسة تأثير أشعة غاما على الخصائص الكهربائية لديدود شوتكي من النمط Cu/ ZnO/Al وتحديد مناطق عمله
68-39	سراء عبد الله أ.د. مصطفى حسن	حركة وتحريك الآلة الخماسية المعدلة
102-69	عمر سلهب أ.د. حسن المقدم	تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية على الطيف الذري لذرتي الهيدروجين والليثيوم
126-103	كاتولين سكرية د. جورج غندور د. فادي عباس	تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الأزوتي في بعض الصفات المورفو فيزيولوجية والنوعية لنبات عباد الشمس <i>Helianthus annus L.</i>
153-127	الباحث : محمد باسل البجره	استراتيجية جديدة في الإرجاع الأميني المباشر للألدهيدات والكيتونات باستخدام المغنزيوم/ميتانول وحفاز البالاديوم المحمل على الكربون

دراسة تأثير أشعة غاما على الخصائص الكهربائية لديود شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al وتحديد مناطق عمله

زينب الحسن أ.د. عبد الرزاق الصوفي أ.د. عبد الله رستناوي

الملخص

في هذا البحث، قمنا بدراسة تأثير أشعة غاما الصادرة من منبع $^{137}_{55}\text{Cs}$ على الخصائص الكهربائية لديودات شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند زمن تقادم 5 يوم. واعتماداً على طريقة الانبعاث بالتأين الحراري (TE)، تم تحليل ميزة التحيز الأمامي $I - V$ لاستخراج ثوابت ديود شوتكي Cu/ZnO/Al، حيث لوحظ أن تيار التسرب يزداد بينما يتناقص جهد الانهيار. كما تبين أن ارتفاع حاجز الكمون وتيار الإشباع وثابتة سلوك الوجه البيني كلها تتغير بعد التشعيع، إن تيار الإشباع على علاقة عكسية مع حاجز الكمون، بينما كانت المقاومة الكهربائية وجهد التشغيل يتناقصان، أما تيار الفتح وعامل المثالية متزايدان عند التشعيع. بمقارنة طريقة TE مع طريقة Cheung و Cheung لاستخراج المقاومة التسلسلية، لوحظ أنه مع التشعيع، انخفضت كل من المقاومة التسلسلية وارتفاع حاجز الكمون، وثابتة سلوك الوجه البيني. لقد كانت نظرية (TE) متطابقة مع نتائج نظرية Cheung و Cheung. أجريت الدراسة السابقة من أجل تحديد مناطق عمل ديود شوتكي ككاشف فتيين وجود ثلاث مناطق لآليات نقل الشحنة وهي ظاهرة النفق، الانبعاث الحراري، والتيار المحدود بالشحنة الفضائية.

الكلمات المفتاحية: ديود شوتكي، نظرية Cheung، حاجز الكمون، نظرية الانبعاث الحراري (TE)، عامل المثالية، المقاومة المتسلسلة، الميزة $I - V$.

Study the effect of gamma rays on the electrical properties of a Schottky diode of the type Cu/ZnO/Al and determine its operating regions

Abstract

In this paper, we investigate the effect of gamma rays emitted from a $^{137}_{55}\text{Cs}$ source on the electrical properties of Cu/ZnO/Al Schottky diodes after an aging time of 5 days. Using the thermionic emission (TE) method, the forward bias $I - V$ characteristic of the Cu/ZnO/Al Schottky diode was analyzed to extract the leakage current and breakdown voltage. It was observed that the leakage current increased while the breakdown voltage decreased. The potential barrier height, saturation current, and interface conductance constant all changed after irradiation. The saturation current was inversely related to the potential barrier, while the electrical resistance and on-off voltage decreased. The opening current and ideality factor increased upon irradiation. Comparing the TE method with the series resistance extraction method of Cheung and Cheung, it was observed that the series resistance, potential barrier height, and interface conductance constant decreased with irradiation. The TE theory was consistent with the results of Cheung and Cheung's theory. The previous study was conducted to determine the operating regions of the Schottky detector diode and revealed three regions of charge transport mechanisms: tunneling, thermionic emission, and space charge-limited current.

Keywords: Schottky diode, Cheung's theorem, potential barrier, thermionic emission (TE) theorem, ideality factor, series resistance, $(I - V)$ characteristic.

1. مقدمة

1.1. أهمية الكواشف الإشعاعية:

اهتم العلماء في السنوات القليلة الماضية بتطوير أنواع جديدة من الكاشف الكواشف وخصوصاً منها الكواشف الإشعاعية واختيار البدائل الممكنة المعتمدة على أنصاف النواقل، ومن ضمن هذه البدائل المستخدمة الأكاسيد نصف الناقلة التي لاقت اهتماماً هائلاً مؤخراً. تتميز هذه الأكاسيد نصف الناقلة بمجال محظور عريض وناقلية كهربائية مرتفعة وخصائص ضوئية وإشعاعية مهمة تجعل منها مناسبة للعديد من التطبيقات أهمها وصلات نصف ناقلة للكشف عن أشعة متنوعة. لذا كان الدافع من هذه الدراسة تحضير طبقات نصف ناقلة ذات سماكة كبيرة من أوكسيد الزنك بأفضل شروط تحضير، تم استخدام طريقة الطلاء بالبخ الكيميائي فهي طريقة كيميائية ممكنة للحصول على طبقات ذات سماكات عالية حيث كان من الصعب جداً الحصول على مثل هذه السماكات من الأكاسيد نصف الناقلة. لكي يتم الكشف عن الإشعاع، يجب أن يكون هناك تفاعل بين الإشعاع الوارد والجزيئات الماصة في الكاشف. يجب اختيار مادة الكاشف وسماكتها حسب نوع الإشعاع الذي يريد المرء كشفه والمعلومات التي يراد الحصول عليها. في حالة الكشف عن جسيمات ألفا α من التفكك الإشعاعي الكاشف رقيقة جداً كافية، وعادة ما تكون أقل من $100 \mu\text{m}$ في معظم المواد الصلبة. بالنسبة للإلكترونات، مثل المنبعثة من تفكك β ، يلزم وجود مواد صلبة من 0.1 إلى 1 mm ، بينما بالنسبة لأشعة غاما، قد لا يكون كاشف سماكته 5 cm كافياً لاكتشاف كل الإشعاع الوارد، لذلك تم اختيار سماكات كبيرة لإمكانية توسيع منطقة النضوب وبالتالي احتمالية الكشف أكبر وبالتالي زيادة احتمال تشكيل أزواج (ثقوب-إلكترونات) أكثر فيزيد احتمالية تطبيق جهود أكبر فنستطيع الكشف عن التيارات [1]

تُستخدم مقاييس جرعات الإشعاع في مجموعة واسعة من التطبيقات؛ الطب والصناعة والعلوم. قد يحدث التعرض للإشعاع المؤين (أشعة X وأشعة γ) في هذه

التطبيقات مخاطر كثيرة، لذلك يعتبر الكشف الكافي عن الإشعاع ضرورياً للسلامة البيئية. يعتمد اختيار نوع مقياس جرعات معين للتطبيق على مجال الطاقة، أكاسيد المعادن هي نوع مشهور من المواد المستخدمة في قياس الجرعات [2].

2-1 آلية عمل الكواشف الإشعاعية

يعتبر الكواشف الإشعاعية من الاهتمامات الرئيسية للباحثين، حيث أن جميع أنواع الجسيمات المنتجة في الفيزياء الذرية والنوية تتم دراستها بواسطة الكاشف. تعد كفاءة الكشف أحد الثوابت الرئيسية في نظام الكشف إلى جانب العديد من الثوابت المختلفة للكاشف. حيث تستخدم تقنيات الكشف عن غاما على مجال واسع في مطيافية غاما، يفقد الإشعاع كل أو جزء من الطاقة عن طريق حدوث تأثيرات متبادلة منذ دخوله في المادة، فإذا ما صدم فوتون غاما إلكترون فإن هذه الذرة تصبح ذرة متأينة، أو إذا ما صدم نواة فإنها تصبح في حالة إثارة. ثم تعود النواة من الحالة المثارة إلى الحالة المستقرة مصدرة الطاقة على شكل إشعاع. إن تحرير هذا الإشعاع هو المبدأ الأساسي للكشف. إن أنظمة الكشف الأكثر استخداماً في قياس طيف غاما هي كواشف NaI(Tl) و HPGe. يمكن استخدام أنواع مختلفة من مصادر التشعيع لإثارة العينات في القياس مثل أشعة غاما γ وأشعة X والأشعة فوق البنفسجية. إن الاعتماد الأساسي يكون على الطاقة الممتصة أثناء التشعيع، والذي يُطلق عليه "جرعة الإشعاع" والمُعَرَّف على أنه معدل الجرعة \times زمن التعرض [3]، [4].

يعتمد تشغيل أي كاشف إشعاع بشكل أساسي على الطريقة التي يتبادل بها التأثير الإشعاع المراد اكتشافه مع مادة الكاشف نفسه. لذلك يجب أن يعتمد فهم استجابة نوع معين من الكاشف على الإلمام بالآليات الأساسية التي يتبادل بها الإشعاع التأثير ويفقد طاقته في المادة. تتوفر العديد من الأعمال المرجعية العامة بشأن هذا الموضوع الواسع؛ المقال الذي كتبه Evans على سبيل المثال لا الحصر، كان بمثابة مرجع معياري لعدة عقود [2]، [3].

في العديد من تطبيقات الكواشف الإشعاعية، إن استخدام وسيط كشف صلب يكون ميزة عظيمة لقياس أشعة غاما أو بيتا، ويمكن الاحتفاظ بأبعاد الكاشف أصغر بكثير من الكاشف الغازي، لأن الكثافة تزيد بنحو 1000 مرة عن تلك الخاصة للغاز. توفر الكواشف الوميضية إمكانية واحدة لتوفير وسيط كشف صلب، حيث إن الزمن اللازم لتجميع حوامل الشحنة على أبعاد نموذجية تبلغ 0.1 cm أو أقل سيكون أقل من 10 ns. يمكن أن تكون الكواشف نصف-ناقلة من أسرع الكواشف الإشعاعية استجابةً لجميع أنواع الإشعاع [5]، [6].

يمكن استخدام عداد غايغر حيث تعطي أنواع الأشعة الساقطة نفس الناتج. لقياس طاقة الإشعاع، كما يمكن اختيار كاشف يقوم بتحويل طاقة النبضة من خلال سعة النبضة الناتجة من الإلكترونات المجمعة. للقيام بذلك، يجب إطلاق عدد كبير من الإلكترونات في الكاشف بحيث لا يكون للتقلبات الإحصائية للإلكترونات، تأثيراً كبيراً على تعيين طاقة الإشعاع. لتحديد زمن انبعاث الإشعاع، هناك حاجة إلى كاشف يجمع الإلكترونات بسرعة، ويجب تحديد نوع الجسيم الذي يدخل الكاشف [1]، [7].

تحتل ديودات شوتكي، باهتمام متزايد نظراً لإمكانية تطبيقها في الإلكترونيات الراديوية والإلكترونيات الضوئية. تم تخصيص الأبحاث الحديثة لتطوير ديودات شوتكي عالية الجودة المستندة إلى ZnO والمصنعة باستخدام مجموعة من تقنيات المعالجة ومواد الاتصال لما لها من أهمية في الكواشف الضوئية. السليكون والجرمانيوم هما من أنصاف-النواقل التي تستخدم بشكل أساسي لهذه الكواشف. حيث يعتبر السليكون المادة الأكثر استخداماً في الكواشف المصممة للكشف عن الجسيمات المشحونة بينما يستخدم الجرمانيوم على مجال واسع في قياسات أشعة غاما [8].

تمت دراسة (GaAs) ككاشف إشعاعي منذ أوائل 1960 وكان من أوائل أنصاف - النواقل المركبة التي تم تشغيلها عند درجة حرارة الغرفة التي تمتلك طاقة فصل جيدة لغاما 1.43 eV ومتوسط طاقة التأين هو $4.3 \text{ eV/e} - h$ ، مما يشير إلى أن طاقة الفصل المقبولة تمكن الكاشف من التشغيل عند درجة حرارة الغرفة. حيث يتوجب أن تكون

التأثيرات المتبادلة لأشعة غاما ومردود الكشف لكل وحدة كتلة من (GaAs) مشابهة لكواشف الجرمانيوم Ge وهي (31) Ga، (33) As [5].

إن يوديد الرصاص PbI_2 هو مادة مثيرة للاهتمام باعتباره من أنصاف-النواقل المستخدم للكشف عن أشعة غاما. تدل الأرقام الذرية الكبيرة للرصاص (82) واليود (53) على أن المادة سيكون لها تأثير متبادل جيد للغاية لأشعة غاما ومردود كشفها. إن طاقة فجوة الحزمة العصبية الخاصة بها هي 2.55 eV ، مما يعني أنه يمكن تشغيل المواد في بيئات أعلى بكثير من درجة حرارة الغرفة. على الرغم من أن PbI_2 تمت دراسته لأول مرة في أوائل السبعينيات 1970s ككاشف إشعاعي، إلا أن المشكلات المادية المتعلقة باستخدامه مازال قيد الدراسة [5].

3-1 آلية تفاعل أشعة غاما مع المادة:

يمكن لأشعة X أو أشعة غاما نقل كل طاقتها أو جزء منها إلى الإلكترونات داخل الوسط. تحمل الإلكترونات الثانوية الناتجة التشابه الوثيق مع الإلكترونات السريعة (مثل جسيم بيتا). على الرغم من أن عدداً كبيراً من آليات التأثير المتبادل المحتملة معروفة لأشعة غاما في المادة، إلا أن ثلاثة أنواع رئيسية فقط تلعب دوراً مهماً في قياسات الإشعاع وهي: مفعول (الامتصاص) الكهروضوئي، وتشتت كومبتون، وإنتاج الأزواج. كل هذه العمليات تؤدي إلى التحويل الجزئي أو الكامل لطاقة فوتون أشعة غاما إلى طاقة الإلكترون. إنها تؤدي إلى تغيرات مفاجئة في فوتونات أشعة غاما، حيث يختفي الفوتون تماماً أو يتشتت من خلال زاوية ما. هذا السلوك يختلف بشكل ملحوظ مع الجسيمات المشحونة والتي تتباطأ تدريجياً نتيجة تأثيرات متبادلة مستمرة ومتزامنة مع العديد من الذرات الماصة. للكشف عن الإشعاع يجب أن يكون هناك تفاعل بين الإشعاع ومادة الكاشف الماص نظراً لوجود أنواع مختلفة من الإشعاع، ولكل إشعاع نوع معين من التأثير المتبادل مع المادة، فقد تم تطوير أنواع مختلفة من الكاشف. في جميع أنواع الإشعاع، ينقل التأثير المتبادل الطاقة من الإشعاع إلى المادة الماصة. يتم نقل هذه الطاقة كلياً أو جزئياً من الإشعاع

الوارد إلى الإلكترونات أو النواة في مادة الكاشف أو إلى الجسيمات المشحونة كمنتج لتأثيرات متبادلة مع النواة [3]، [6]، [9]، [10]، [11] .

ويمكن أيضاً عند تشعيع الكاشف نصف-الناقلة بغاما، التقاط بعض أشعة غاما بواسطة ذرات الكاشف. إذا خضعت هذه الذرات لتفاعل نووي، تتشكل ذرة أخرى ويصبح الكاشف مشابهاً. على سبيل المثال إذا تم تشعيع كاشف السيليكون بأشعة غاما، فإن بعض ذرات السيليكون يتحول فيها أحد النيوترونات إلى بروتون نووي متحولة إلى ذرة فوسفور، وبالتالي فإن السيليكون يصبح مشابهاً بالفوسفور [3]، [12]، [13].

2. هدف البحث

- دراسة تأثير أشعة غاما على الميزة جهد-تيار وتحديد جهد الانهيار وتيار التسرب.
- تحديد الاختلاف في قيم ارتفاع حاجز الكمون وتيار الإشباع وثابتة سلوك الوجه البيني قبل التشعيع بغاما وبعده.
- حساب قيمة المقاومة الكهربائية قبل التشعيع وبعده ومعرفة التغيرات الحاصلة عليها.
- دراسة تأثير أشعة غاما على جهد التشغيل للديود المحضر وتيار الفتح وعامل المثالية.
- تحديد التغيرات الحاصلة على ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة وفق نظرية الانبعاث الحراري و Cheung قبل وبعد التشعيع.
- تحديد مناطق عمل هذا الديود قبل وبعد التشعيع وتحديد آليات نقل الشحنة.

3. مواد وطرق البحث

استخدم ZnO (99.5% من Honeywell Riedel-de Haën) كمادة أساسية، ثم رسبت طبقة ZnO على Cu لتحقيق الاتصال الأومي بواسطة طريقة الطلاء بالبخ (وهي طريقة تتم باستخدام ضغط الغاز يتم بخ المادة المراد التصاقها على المعدن). في

البداية حضرت أقراص نحاسية بنصف قطر متماثل من أجل جميع العينات 1.0cm ، غسلت بالماء المقطر وجففت لمدة 24 ساعة عند درجة حرارة المخبر. ثم جرى ترسيب الأكسيد بسماكة $50\mu\text{m}$ ، وبعدها رسبت طبقة الألمنيوم ذات السماكة $1\mu\text{m}$ ، فوق طبقة الأكسيد لتحقيق اتصال ثوتكي.

تم الحصول على الميزة $I-V$ للتحيز الأمامي والعكسي عليها باستخدام دائرة إلكترونية مؤلفة من مقياس أمبير - مقياس فولت ومغذية كهربائية ومجموعة من المقاومات (تم شرح أليات التوصيل للدائرة الإلكترونية وكيفية استخراج القيم والحسابات في مقالات سابقة منشورة في مجلة جامعة حمص لم اذكرها في المراجع لعدم نشرها بعد بمجلد).

4- الدراسة الكهربائية :

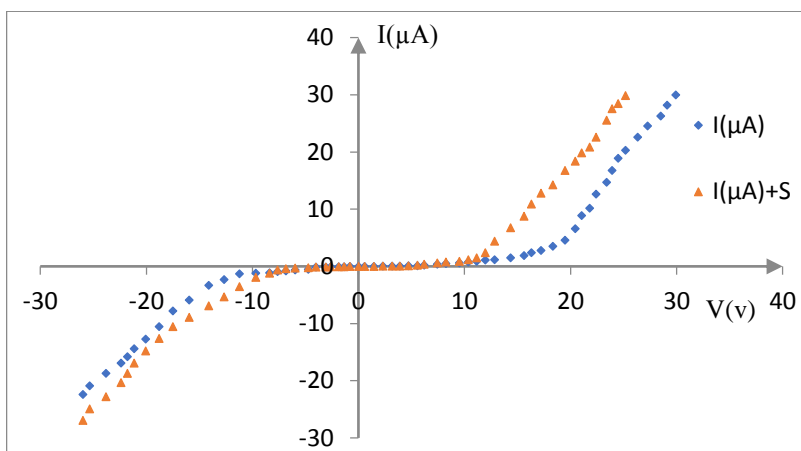
تم تشيع الكاشف بجرعة زائدة خطياً بمقدار $2\mu\text{Gy}$ حتى $970\mu\text{Gy}$ خلال أزمنة تشيع مختلفة. يتم امتصاص الفوتونات بشكل أساسي في طبقة Al في الوصلة Cu/ZnO/Al حيث يتم توليد أزواج إلكترونات-ثقوب. تنتشر الإلكترونات المولدة إشعاعياً في منطقة النضوب ثم تصل إلى طبقة ZnO بواسطة الحقل الكهربائي. لمقاومة التيار الناتج، يجب إنشاء حقل كهربائي بين قطبي الوصلة غير المتجانسة، مما يؤدي إلى حدوث جهد إشعاعي بما يوافق المرجع [14]. ولمعرفة مدى استقرار وعمل الكاشف المدروسة تمت دراسة تأثير تقادم الزمن وتحديد جهد الانهيار. بعد إجراء مجموعة من القياسات على عدد من الكاشف، ولكن في مقالتنا ذكرنا تأثير أشعة غاما على كاشف واحد فقط ذو سماكة $50\mu\text{m}$ ، وتمت كامل الدراسة عليه عند زمن تقادم 5 يوم.

5. القسم العملي:

5-1 دراسة تأثير أشعة غاما على الميزة جهد-تيار في ديود ثوتكي

Cu/ZnO/Al :

الشكل (1) يوضح الميزة جهد-تيار لـ Cu/ZnO/Al ثوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند زمن تقاضم 5 يوم.



الشكل (1) الميزة جهد-تيار لـ ديود شوتكي من النمط Cu/ZnO/Al عند زمن تقاضم 5 يوم¹.

يبين الجدول (1) جهد الانهيار ونسبة التصحيح وتيار التسرب للكاشف المحضر عند زمن تقاضم 5 يوم.

Sample	V كمون الانهيار		$RR = \frac{I_F}{I_R}$		تيار التسرب I (μA)	
	before	After	before	After	Before	After
Sample	-24	-13	0.35	0.416	0.378	0.88

الجدول (1)

تمت دراسة الشكل السابق للميزة I-V لكاشف شوتكي، وقد أظهر الكاشف سلوكاً غير خطي تقويمياً (تقويم تيار) بجهد تشغيل يختلف قبل التشعيع عما بعده (Simulated current) (I + S)، سوف نورد فيما بعد. يوضح الشكل السابق الميزة I-V كدالة لجهد التحيز كما هو موافق للمراجع [15]، [16]. يزداد التيار الأمامي بشكل كبير، وعند الفولتية الأعلى 14-20 V ، خطياً تقريباً. من هذه النتيجة، من الواضح أن معدن Al قد تم

¹ I: التيار قبل التشعيع
I+S: التيار بعد التشعيع.

ترسيبه بنجاح على بنية الأوكسيد التي تشكل وصلة أنصاف-النواقل المعدنية (M/S) [8] مع مقاومة متسلسلة كبيرة نوعاً ما. كما تبدي الميزة اختلافاً قبل التشعيع عما بعده، وقيم الجهد الأمامي للكاشف قبل التشعيع أكبر عما بعده، حيث أدى التشعيع إلى تكون عيوب تؤثر على حركة حوامل الشحنة (إلكترونات- ثقب) تؤدي إلى تغير في آليات النقل الكهربائي داخل الكاشف، وقد ينخفض ارتفاع حاجز الكمون بعد التشعيع مما يؤدي إلى انخفاض جهد التشغيل وظهور منحني الميزة جهد-تيار أقرب لمحور التيار كما أن زيادة التسرب عبر العيوب يُظهر التيار حتى عند جهود منخفضة، كما أن تغير عامل المثالية الذي في الغالب سوف يرتفع بعد التشعيع بسبب تغير آلية النقل وظهور آليات غير مثالية (مثل النقل عبر المصادد). يظهر الخط البياني بزيادة الجهد يزداد التيار في حالة التحيز الأمامي والعكسي. وجهد الانهيار يتناقص بعد التشعيع عما قبله حيث أن أشعة غاما قد أثرت على بنية نصف الناقل فعملت على التسريع من الوصول إلى حالة الانهيار. لقد تمت الدراسة السابقة كلها حتى جهد الانهيار ((ملاحظة: علماً أن جهد الانهيار يتسبب في تدهور عمل الكاشف)) من أجل تحديد مجال عمل الكاشف ومن ثم تحديد جهد عمله الذي عادةً يتم تحديده بمنتصف منطقة العمل.

لدى مقارنة نسبة التصحيح التي تم الحصول عليها، لوحظ أن لها قيم متزايدة بعد التشعيع، ويمكن أن تعزى القيم المنخفضة لنسبة التصحيح التي تم الحصول عليها إلى حقيقة أن الملامسات المعدنية قد تبخرت على سطح ZnO دون تنظيف. وفقاً [17]، [18]، كان من الصعب تحقيق تصحيح جيد لكاشف شوتكي ZnO بسبب الصعوبات في الحصول على سطح نظيف [19]، حيث ينتج عن ترسب المعادن عيوب أصلية في أسطح ZnO [20]. نلاحظ أيضاً وجود تيار تسرب بعد التشعيع متزايد عما قبل التشعيع. كما نلاحظ الانحناء المقعر للأسفل لمخطط التحيز الأمامي $I - V$ في الشكل السابق عند الفولتية الكبيرة يرجع بشكل رئيسي إلى المقاومة المتسلسلة R_S الناتجة بشكل رئيسي عن المادة الأساسية (الركيزة) للكاشف [19]. لذلك من أجل تقدير الثوابت الكهربائية لديود شوتكي ZnO/Al بدقة، عندما يتم قياس $I - V$ يجب تحليل الميزة من خلال أخذ تأثير المقاومة المتسلسلة في الاعتبار كما هو موضح فيما بعد.

5-2 دراسة تأثير أشعة غاما على ارتفاع حاجز الكمون وثابتة سلوك الوجه البيني اعتماداً على نظرية الانبعاث الحراري:

بالاعتماد على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري (TE)، تم استخراج ارتفاع الحاجز $\phi_{(B)}$ باستخدام المعادلة (2) والملاءمة الخطية لبيانات $I - V$.

$$I = I_s \exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right),$$

$$I_s = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (1)$$

إلى المعادلة التالية:

$$I \approx I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} \approx I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right\} \quad (2)$$

$$V > \frac{3kT}{q} \text{ من أجل}$$

حيث q هي شحنة الإلكترون، V هو الجهد المطبق، n هو عامل المثالية، k هو ثابت بولتزمان، R_s هي المقاومة المتسلسلة، A هي مساحة الديود، A^* هو ثابت ريتشاردسون المقدر $32 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ لـ $n - \text{ZnO}$ ، T درجة الحرارة المطلقة، I_s هو تيار الإشباع و $\phi_{(B)}$ هو ارتفاع الحاجز (بالفولت)، ويعطى $\phi_{(B)}$ بالعلاقة [19]، [21]، [22]:

$$\phi_{(B)} = \frac{(kT)}{q} \frac{\ln(AA^*T^2)}{I_s} \quad (3)$$

تعتمد ثابتة سلوك الوجه البيني (interface) على كثافة ومدى حالات الوجه البيني في الكاشف وتنشيط مستوى فيرمي، وهي تجعل ارتفاع حاجز الكمون لا يتغير بنفس مقدار تغير تابع العمل للمعدن، عندما تكون $S \approx 1$ يكون ارتفاع حاجز الكمون متغير بشكل خطي مع تابع العمل (نموذج شوتكي المثالي)، يحدث هذا عندما تكون كثافة حالات السطح ضعيفة. أما عندما $S = 0$ يكون مستوى فيرمي مثبتاً بشكل قوي بسبب وجود كثافة عالية من حالات السطح ويكون ارتفاع حاجز الكمون لا يتأثر بتغير تابع العمل للمعدن. وفي

الحالة التي تكون فيها $0 < S < 1$ يوجد تأثير لحالات السطح ولكن ليس تثبيطاً كاملاً لمستوى فيرمي وتحسب من العلاقة [23]، [24]، [25]:

$$S = \frac{\phi_B}{\phi_m} \quad (4)$$

يبين الجدول (2) قيم ارتفاع حاجز الكمون الكاشف وتيار الإشباع وثابت سلوك الوجه البيني.

5	t(days)
0.756	$\phi_B(\text{eV})$
0.772	$\phi_B(\text{eV}) + S$
1.4712	$I_s(\mu\text{A})$
0.7797	$I_s(\mu\text{A}) + S$
0.172	S
0.176	$S + S$

الجدول (2)

وفقاً لنظرية شوتكي-موت، فإن Φ_B المتوقع للبنات ZnO/Al تتراوح بين (0.7 – 1.2) eV. يُعزى الانحراف Φ_B في الجداول إلى تكون حاجز متباين من كاشف لآخر، ومفعول شوتكي والمناطق المظلمة التي لا تساهم في نقل التيار عبر حاجز شوتكي [17]. ووفقاً [17] نجد أن القيم الكبيرة لـ Φ_B قد تعزى إلى الحالات الإلكترونية التي قد تسبب انخفاضاً أو زيادة في تابع العمل المعدني في السطح البيني [19] ولكن يهيمن عليه في الغالب الحالات السطحية (العيوب) كما أشار باردين وآخرون التي تتحكم في سلوك التصحيح للميزة [26] I-V. كما تلعب التفاعلات الكيميائية بين الوجه البيني المعدني وأكسيد الزنك دوراً مهماً في تكون حاجز شوتكي. حيث تؤدي هذه التفاعلات إلى زيادة في كثافة شواغر الأكسجين (V_O) القريبة من الوجه البيني، يصبح نشوء شواغر الأكسجين أكثر فائدة. في الحقيقة يوجد العديد من الأسباب عن تكون حالات فجوية في الوجه البيني

تم اقتراحها لشرح تأثير ثبات مستوى فيرمي. وهي تشمل الحالات السطحية، وحالات الفجوة الناجمة عن المعادن، والحالات المرتبطة بالعيوب [27] [24]، [28]، [29].

حيث إن وجود عيوب الأكسجين قد يفسر الانخفاض الكبير الذي حصلنا عليه في ثابتة سلوك الوجه البيني S عن التوقعات النظرية، حيث تم تقدير قيمة S نظرياً لتتراوح بين 0.52-0.57 للواجهات المعدنية / ZnO الخالية من العيوب بينما في دراستنا كانت حوالي 0.1 مما يشير إلى ثبات مستوى فيرمي الكبير تحت عصابة الناقلية هذا يتوافق مع المرجع [23]، [24]. بشكل عام، يمكن فهم هذه الاختلافات في ϕ_B وتدفق تيار الإشباع عبر وصلات أنصاف النواقل المعدنية مثل أكسيد الزنك (وأنصاف النواقل الأخرى) من حيث آليات نقل الشحنة المتعددة في الوجه البيني المعدني. حيث يمكن أن تنتقل الشحنة من المعدن إلى نصف - الناقل إما عبر الحاجز (الانبعاث بالتأين الحراري) (TE) للشحنات فوق الجزء العلوي من الحاجز، أو من خلال الحاجز عن طريق النفق (انبعاث الحقلي البارد) (FE) أي نفق الشحنات عبر عرض الحاجز الكامل، أو مزيج من الاثنين، وأيضاً من خلال الحاجز عن طريق القفز عبر حالات الفجوة داخل منطقة شحنة الفضاء لأنصاف النواقل، وتسمى نفق مساعد وإعادة الاتحاد لحوامل الشحنة في منطقة النضوب. إن اختلاف ارتفاع حاجز الكمون بعد التشيع عما قبله يعود لذلك لأن التشيع يمكن أن يغير من عدد أو نوع أو تركيز حاملات الشحنة المحاصرة في الطبقة نصف الناقلية أو على السطح، بالإضافة إلى إمكانية حدوث أكسدة أو تفاعلات كيميائية جديدة بعد التشيع تؤثر على الوجه البيني.

كما لاحظنا اختلاف ثابتة سلوك الوجه البيني قبل التشيع عما بعده باختلاف ارتفاع حاجز الكمون وذلك نتيجة ارتباطهما بالعلاقة (4)، فعند ازدياد ارتفاع حاجز الكمون تزداد ثابتة سلوك الوجه البيني حيث مع مرور الزمن قد يحدث إعادة ترتيب أو تحسن في الواجهة بين طبقة الألمنيوم وطبقة نصف الناقل مما يؤثر على توزيع الشحنات ويغير من ارتفاع حاجز الكمون.

5-3 دراسة تأثير أشعة غاما على المقاومة للكواشف الإشعاعية ZnO/Al:

تحتسب مقاومة الكاشف من خلال رسم العلاقة بين الجهد V والتيار I وتمثل ميل الخط البياني الناتج.

يبين الجدول (3) قيم المقاومة الكهربائية قبل التشعيع وبعده عند زمن تقادم 5 أيام.

5	t(days)
0.816	$R(\mu\Omega)$
0.685	$R(\mu\Omega) + S$

الجدول (3)

نلاحظ من خلال الجدول (3) أن مقاومة الكاشف تنخفض بعد التشعيع وهذا يدل على مرور تيار أكبر نتيجة وجود أشعة غاما التي تعمل على توليد شحنات نتيجة تولد عيوب مشحونة في المادة نصف الناقلة أو في الوجه البيني، حيث هذه العيوب تعمل كمراكز مساعدة لتوليد أو تمرير حوامل الشحنة، وبالتالي تقلل من الجهد المطلوب لبدء النقل. كما أن التشعيع قد يسبب تعديل في توزيع الشحنات أو خصائص التماس مما يقلل من ارتفاع حاجز الكمون بين الطبقة نصف الناقلة ومعدن الألمنيوم، والأشعة ترفع عدد الإلكترونات أو الثقوب المتاحة للنقل مما يؤدي لخفض المقاومة. كما إن زيادة كمية شواغر الأكسجين، تعمل كجهات مانحة في ZnO، حيث تقدم طبقة رقيقة n^+ في واجهة ZnO/Al، مما يؤدي إلى انخفاض مقاومة الكاشف المحددة [30]. كما نلاحظ أن مقاومة الكاشف ترتبط بارتفاع حاجز الكمون وذلك بسبب ارتباطها بتيار الإشباع حسب العلاقة (3) بما يوافق المرجع [19]. عندما تبلغ قيمة عظمى يكون ارتفاع حاجز الكمون عند أعظم قيمة له والعكس بالعكس.

5-4 دراسة تأثير أشعة غاما على جهد التشغيل والتيار الفتح للكواشف الإشعاعية ZnO/Al:

يعرف جهد التشغيل هو قيمة الجهد الذي يستطيع عنده الكاشف أن يمرر تيار ويسمى هذا التيار بتيار الفتح، من خلال دراسة الميزة $I - V$ يمكننا الحصول على جهد التشغيل وتيار الفتح.

يبين الجدول (4) جهد التشغيل وتيار الفتح للكاشف المحضر عند زمن تقادم 5

يوم.

5	t(days)
15	V(V)
10	V(V) + S
0.7	I _{oc} (μA)
1.5	I _{oc} + S(μA)

الجدول (4).

يمكن ملاحظة أن جهد التشغيل بعد التشعيع قد تناقص، ويعزى ذلك إلى ازدياد تيار الإشعاع نتيجة وجود أشعة غاما التي عملت على توليد حوامل شحنة، حيث التشعيع خلق مستويات طاقة داخل الفجوة العنصرية أو عيوب تسهل حركة حوامل الشحنة، مما يقلل من الطاقة اللازمة لبدء النقل وبالتالي انخفاض جهد التشغيل. فمرر الكاشف تيار بقيمة جهد أقل من القيمة التي احتاجها قبل وجود الإشعاع وهذا ما يؤكد أيضاً امتلاك الكاشف قيم أكبر لتيار الفتح بعد التشعيع. عند أخذ مسقط جهد التشغيل على محور الجهد لاحظنا انخفاض جهد التشغيل في حالة التحيز الأمامي وانخفاض جهد الانهيار في حالة التحيز العكسي تحت تأثير أشعة غاما. إن انخفاض جهد التشغيل يشير إلى انخفاض ارتفاع حاجز شونكي كما هو مطابق للمرجع [26]. وتعود هذه الفروقات بين قيم جهد التشغيل قبل وبعد التشعيع بسبب اختلاف دقيق في جودة التحضير وتوزيع العيوب والتجانس بين الطبقات وهذه الفروقات تؤثر على خصائص الواجهة بين المعدن ونصف الناقل وبالتالي على جهد التشغيل. حيث مع مرور الزمن قد تتحسن الناقلية بسبب استقرار البنية الذرية أو انخفاض العيوب السطحية، مما قد يؤدي إلى انخفاض بسيط في جهد التشغيل (أسهل لتحفيز الديود) أو أحياناً قد يرتفع مؤقتاً إذا حدث تلوث أو تدهور.

5-5 دراسة تأثير أشعة غاما على عامل المثالية للكواشف الإشعاعية ZnO/Al

:

من المرغوب فيه أن يكون عامل المثالية مساوياً لـ 1، لكن عامل المثالية يمكن أن يأخذ قيمة $n < 1$. إذا كانت n قيمة بين 1 و 2، فإن آلية تيار النفق هي المهيمنة. إذا كانت $n = 2$ ، فإن آلية تيار إعادة الاتحاد هي المهيمنة. وتكون آلية تيار التسرب هي المهيمنة إذا كان $n > 2$ [31].

يمكن تحديد عامل المثالية (n) من خلال العلاقة:

$$n = \frac{q}{KT} \frac{\partial V}{\partial (\ln I)} \quad (5)$$

يبين الجدول (5) قيم عامل المثالية للكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.

5	t(days)
15.76	n
37.2	n + s

الجدول (5)

من خلال الأشكال السابقة نلاحظ أن عامل المثالية متغير قبل التشعيع عما بعده ، لقد لوحظ أن عوامل المثالية لـ ZnO/Al شوتكي القائمة على أكسيد الزنك المعالجة كيميائياً عادةً ما تكون أكبر بكثير من الواحد وهي موافقة للمرجع [14]، [31] وسبب انحرافه عن القيم الواردة في المراجع العلمية وعن الديود التقليدي، يعود إلى الأنفاق وحالات الوجه البيني و/أو تأثير مراكز إعادة الاتحاد [14]، [30]، [32]، [33] وإلى وجود طبقة أكسيد رقيقة بينية في واجهة ZnO و Al ، و ارتفاع حاجز شوتكي أو عدم تجانس الحاجز عند السطح البيني حسب ما ناقشها Güttler و Werner في المرجع [19]، [25]، [26]، وإلى تأثير المقاومة المتسلسلة أو لوجود العيوب الناجمة عن الحالات السطحية [26] أو عدم تجانس السطح العلوي لبينية الأوكسيد، وعدم انتظام توزيع الشحنات البينية وانخفاض الجهد عبر وصلة M / S وحالات خلل الوجه البيني [17]، [34]، [35]، [36] والانبعاث بالتأين

الحراري [30]. وتبين حسب المرجع [14] أن قيمة n إذا كانت ($n > 20$) المرصودة ترجع على الأرجح إلى وجود حالات عيب في شبكة ZnO و/أو وجود مصائد عند الوجه البيني من ناحية أخرى [37].

5-6 دراسة تأثير أشعة غاما على تغيرات ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة

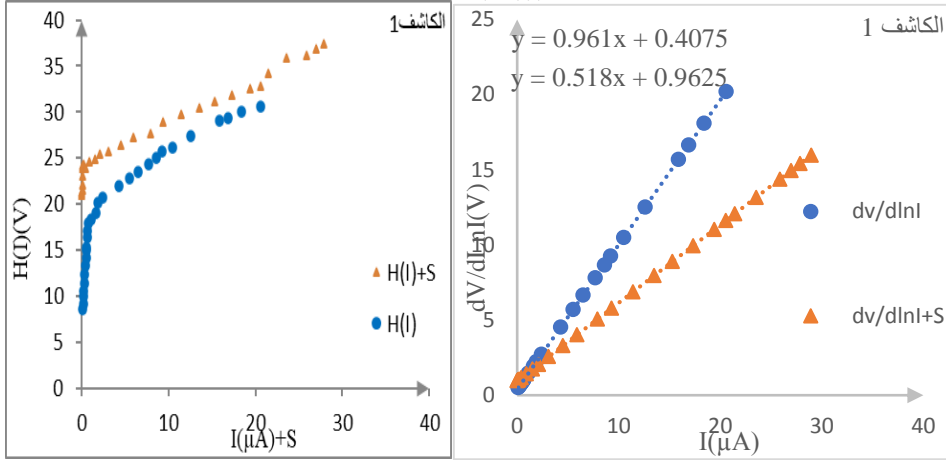
المتسلسلة اعتماداً على نظريتي الانبعاث بالتأين الحراري و Cheung- Cheung:

وفقاً ل Tung في [19] تمت دراسة الميزة $I - V$ لوصلة شوتكي التي تكون خطية عند جهد تحيز أمامي منخفض ولكنها تصبح غير خطية بشكل ملحوظ بطبيعتها عند جهد تحيز أمامي أعلى بسبب المقاومة المتسلسلة R_s الناتجة. من الواضح أنه في حين أن R_s لها تأثير صغير جداً في منطقة التحيز الأمامي المنخفض، إلا أن لها تأثيراً كبيراً في منطقة التيار الأعلى بسبب الانخفاض الكبير في الجهد IR_s [19]. اعتماداً على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري يتغير ارتفاع حاجز الكمون بعد إضافة المقاومة المتسلسلة للحسابات المأخوذة، ويتم حسابه اعتماداً على العلاقة (6) [5]، [8]، [19]، [35]، [38]، [39]، [40]، [41] برسم الخط البياني بين $H(I)$ و I ، نقطة التقاطع هي ارتفاع حاجز الكمون والميل هو المقاومة المتسلسلة، وعامل المثالية محسوب من العلاقة (5) [5]، [8]، [19]، [37]، [38]، [39]، [40]، [42]. وللتأكد من صحة النتائج تم أيضاً الاعتماد على نظرية Cheung- Cheung [5]، [8]، [18]، [23]، [37]، [38]، [39]، [41] حيث ترسم العلاقة (7) بين $\frac{dV}{d(\ln(I))}$ و I [5]، [19]، [23]، [39]، [41]، [43]، من خلال ميل المنحني يتم تحديد R_s ومن نقطة التقاطع نحدد عامل المثالية. ولمنع تكرار النتائج تمت الدراسة والنتائج للنظريتين معاً.

$$H(I) = V - n \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^* T^2} \right) = n\phi_B + IR_s \quad (6)$$

$$\frac{dV}{d(\ln(I))} = n \frac{KT}{q} + R_s I \quad (7)$$

يبين الشكل (2) العلاقة بين $H(I)$ و $\frac{dV}{d(\ln(I))}$ مع I للكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.



الشكل (2) العلاقة بين $H(I)$ و $\frac{dV}{d(\ln(I))}$ مع I للكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.

يبين الجدول (6) قيم ارتفاع حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة وثابتة سلوك الوجه البيني للكاشف الأول عند زمن تقادم 5 يوم.

S + S	S	$R_s(\mu\Omega)$ + S	$R_s(\mu\Omega)$	$\phi_B(\text{eV})$ + S	$\phi_B(\text{eV})$	Theor y
0.134	0.2109	0.518	0.961	0.59	0.924	TL
		0.518	0.961	0.59	0.924	Cheung-Cheung

الجدول (6)

من خلال الجدول السابق المعتمد في حساباته على نظرية الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheung-Cheung وجد أن ارتفاع حاجز الكمون للكاشف قد ازداد بعد إضافة المقاومة المتسلسلة قبل التشعيع. أما بعد التشعيع، كان ارتفاع حاجز الكمون أخفض نتيجة انخفاض قيم المقاومة المتسلسلة، نتيجة تأثير أشعة غاما التي تؤدي لتوليد حوامل شحنة مما يؤدي لزيادة التيار. ولقد تم التوصل أيضاً حسب نظرية Cheung-Cheung إلى ما تم التوصل إليه وفق نظرية الانبعاث بالتأين الحراري، كما لم نلاحظ تابعة اختلاف حاجز الكمون والمقاومة المتسلسلة بينهم. يشير الفرق النسبي بين قيم ارتفاعات حاجز الكمون التي تم

الحصول عليه من نموذج الانبعاث بالتأين الحراري (قبل إضافة المقاومة المتسلسلة) وطريقة Cheung- Cheung إلى حدوث مقاومة متسلسلة وحالات واجهة (العيوب) عبر المعادن وأنصاف - النواقل interface states [41]. ولكن وجدنا في النتائج بعد إضافة المقاومة المتسلسلة تطابق شبه تام بين النظريتين.

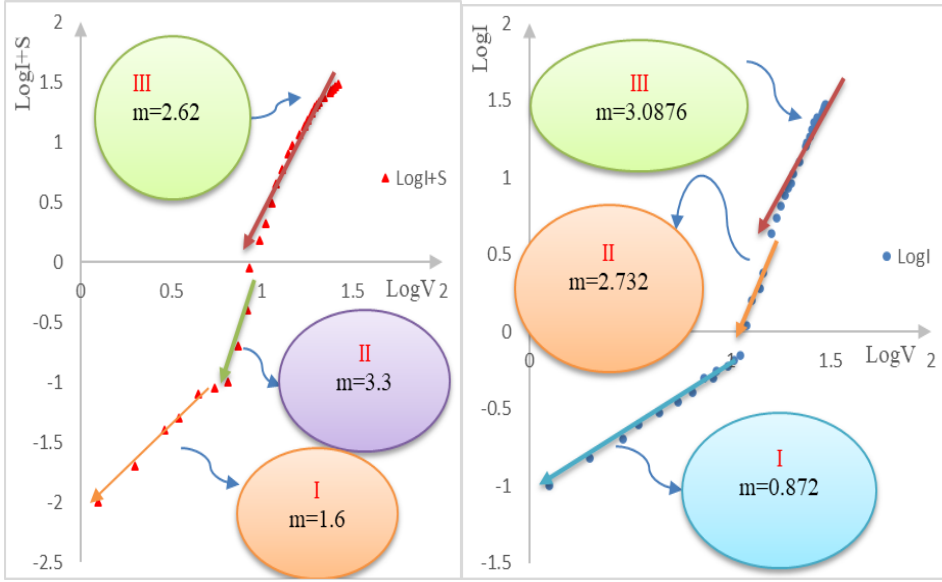
من المناقشة أعلاه، من الواضح أن المقاومة المتسلسلة R_S ليس لها أي تأثير يذكر على الثوابت المقدرة n ، I_S ولكن لوحظ تأثيرها على ارتفاع حاجز الكمون، حيث يتم تقديرها في منطقة التيار المنخفض حيث $I \sim I_S$. ومع ذلك، قد تلعب R_S دوراً مهماً في تحديد خصائص الكاشف في منطقة التيار العالي حيث لا يمكن إهمال انخفاض جهد الـ IR_S فيما يتعلق بجهد التحيز المطبق [19]. وهذا ما يؤكد صحة النتائج وتعتبر كلا النظريتين صحيحتان عند استخدامها في ديودات شوتكي وهو مطابق للمرجع [23]، [39]. كما لاحظنا اختلاف ثابتة سلوك الوجه البيني قبل التشعيع عما بعده، وذلك بسبب اختلاف ارتفاع حاجز الكمون، والتي ترتبط معه حسب العلاقة (4).

5-7 دراسة تأثير أشعة غاما على مناطق عمل الكواشف الإشعاعية

ZnO/Al:

تمت دراسة آليات النقل في الكاشف المصنعة باستخدام الميزة $I-V$ اللوغاريتمية للتحيز الأمامي كما هو موضح بالأشكال التالية. تم استخدام قانون الطاقة $I = kV^m$ ، حيث I هو التيار، و k ثابت، و V هو الجهد و m عبارة عن آلية نقل الشحنة التي تصف ثابتاً والتي تساوي ميل الرسم البياني $\log I - \log V$. عندما تكون تابعة التيار للجهد خطية، أي $I \propto V$ فإن قيمة الميل، من المخطط $m < 2$ ، تشير على الأرجح إلى أن ظاهرة النفق (النفذ الكمومي) هو آلية نقل الشحنة المهيمنة في هذه المنطقة وتسمح للإلكترونات بالمرور عبر الحاجز دون الحاجة إلى الطاقة الكافية لتجاوزه. في المنطقة التي يزداد فيها التيار بشكل كبير بدلالة $I \propto \exp(V)$ ($m = 2$) تكون آلية النقل السائدة هي الانبعاث بالتأين الحراري وذلك بسبب العيوب، تماماً كما هو متوقع في المنطقة التي يتبع التيار قانون الطاقة ($I \propto V^2$). أخيراً تشير العلاقة المميزة ($m > 2$) $I \propto V^m$ إلى أن آلية نقل التيار مرتبطة بالشحنة الفضائية (SCLC Region) (Space Charge Limited Current)،

حيث هنا التيار يكون محدوداً بكمية الشحنات المحصورة داخل الطبقة نصف الناقلة، وهذه الآلية تظهر عادةً في الطبقات السميكة التي تحتوي على عيوب أو شوائب كثيرة، وبالتالي يحدث تدفقاً قوياً لحاملات الشحنة مع تأثر بوجود المصائد والعيوب [29]، [30]، [34].
يبين الشكل (3) مناطق عمل الكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.



الشكل (3) مناطق عمل الكاشف عند زمن تقادم 5 يوم.

يتم نسب كل منطقة لآلية نقل شحنة مختلفة، تختلف قيم m في هذه المناطق باختلاف الكاشف المحضر وباختلاف زمن التقادم، كما كانت الاختلافات الناتجة بعد التشعيع نتيجة تأثر المادة بأشعة غاما حيث طاقتها تؤدي إلى زيادة عرض منطقة النضوب، مما يؤدي إلى ازدياد فعالية الديدود وبالتالي يؤثر ذلك على آلية نقل الشحنة. ومع ذلك، فإننا نرى أن الميول في المنطقة 1، 2، لمعظم الكاشف قد انخفضت قليلاً مقارنة بتلك الموجودة في المنطقة 3. وقد يكون هذا بسبب حقيقة أن الديدود يقترب مما يسمى الحد المملوء بالمصيدة [17]. التيار في المنطقة (I) له تابعة خطية للجهد، أي $I \propto V$ ويكون الميل من المخطط $m < 2$ يشير على الأرجح إلى أن ظاهرة النفق هو آلية نقل الشحنة المهيمنة في هذه المنطقة. في المنطقة (II)، يزداد التيار بشكل كبير مع العلاقة $m = \exp(V)$

2 تكون آلية النقل السائدة هي الانبعاث بالتأين الحراري. في المنطقة (III)، يتبع التيار قانون الطاقة ($I \propto V^2$)، تشير العلاقة المميزة ($I \propto V^m$ ($m > 2$) مما يشير إلى آلية نقل التيار مرتبط بالشحنة الفضائية [8]، [28]، [30].

6. النتائج و مناقشتها

- ❖ تمت دراسة الميزة جهد - تيار عند تعريض الديودات لأشعة غاما، لاحظنا تأثير واضح لأشعة غاما على الميزة.
- ❖ استنتجنا أن الانحناء المقعر في الميزة يعود إلى المقاومة المتسلسلة لذلك اقترحنا أن تتم الدراسة بأكثر من طريقة.
- ❖ حددنا قيم جهد الانهيار وتيار التسرب حيث لاحظنا اختلافهما بوجود الإشعاع عن قبله.
- ❖ لاحظنا تأثير واضح لأشعة غاما على ارتفاع حاجز الكمون وثابتة سلوك الوجه البيني اللذان يتناقضان، بينما كان تيار الإشعاع متزايد بوجود التشعيع.
- ❖ حسبنا قيم عامل المثالية قبل وبعد التشعيع ووجدنا أن القيم متزايدة بعد التشعيع ويعود ذلك إلى وجود عيوب في شبكة أكسيد الزنك ووفرة في شواغر الأوكسجين.
- ❖ يتناقص جهد التشغيل مع التشعيع بينما يزداد تيار الفتح وبهذا يظهر جلياً تأثير أشعة غاما على عمل هذه الديودات.
- ❖ توصلنا إلى أن قيم المقاومة المتسلسلة متناقصة بعد التشعيع عما قبله.
- ❖ تبين أن نظرية الانبعاث بالتأين الحراري غير كافي لمثل الديودات المحضرة، لم تظهر تأثير المقاومة المتسلسلة على تغير ارتفاع كمون الحاجز وعامل المثالية لذلك كان لابد من تطبيق نظرية الانبعاث وذلك بعد إضافة المقاومة المتسلسلة.

- ❖ بدراسة نظرية Cheunge و Cheunge ونظرية الانبعاث بالتأين الحراري بإدخال تأثير المقاومة المتسلسلة لاحظنا تناقص قيم ارتفاع كمون الحاجز والمقاومة المتسلسلة وثابتة سلوك الوجه البيني عند التشعيع.
- ❖ وجدنا تطابق في القيم المحسوبة بنظرية الانبعاث بالتأين الحراري ونظرية Cheunge و Cheunge قبل التشعيع وبعده.
- ❖ حددنا مناطق عمل الكاشف المحضر قبل التشعيع وبعده وتبين أن الآليات التي يعمل فيها هذا الكاشف هي ظاهرة النفق والانبعاث الحراري والتيار المحدود بالشحنة الفضائية.

المراجع

- [1]. J Rohlen, ENett, J Millet, **Studies of pulse shapes from semiconductor detectors**, Chalmers University of Technology and Göteborg University, Chapter 1-7, pp1-35.
- [2] OMAR, Ahmed, (2015)-**Metal oxide films/structures for gamma radiation detection**, *International Conference on Electronics, Circuits, and Systems (ICECS)*, p. 685-688.
- [3] SAADATKIA, Pooneh, VARNEY, Chris, SELIM, Farida, (2016)-**Trap Level Measurements in Wide Band Gap Materials by Thermoluminescence. Luminescence-An Outlook on the Phenomena and their Applications**, no10, Chapter 10.
- [4] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, John Wiley & Sons, Inc, Fourth edition, chapter 13, pp 415-467.
- [5]. AL-AHMADI, Noorah A, (2020)-**Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances**, *Materials Research Express*, Vol 7, No 3, Pp 032001.

- [6] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, *john wiley & sons, Inc*, Fourth edition, chapter 13, pp 415-467.
- [7] k Aswin, (2020)- **Gamma Ray Irradiation Enhances the Linkage of Cotton Fabrics Coated with ZnO Nanoparticles** *ACS Omega* 2020, 5, 15129-15135
- [8] SEMPLE, James; ROSSBAUER, Stephan, ANTHOPOULOS, Thomas D. (2015)- **Analysis of Schottky contact formation in coplanar Au/ZnO/Al nano-gap RF diodes processed from solution at low temperature**, *Department of Physics and Centre for Plastic Electronics*, vol 88, pp1-29.
- [9] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, *john wiley & sons, Inc*, Fourth edition, chapter 11, pp 415-467.
- [10] F. J. Ramírez-Jiménez, (2006) - **X-Ray Spectroscopy with PIN diodes**, *ResearchGate*, vol 57150.
- [11] Goran S. Ristić, RISTICJ, S. Goran, (2013)- **The digital flat-panel x-ray detectors**, *Ristic: The Digital Flat Panel X-Ray Detectors*, vol 621, no 4, pp65-71.
- [12] Glenn F, KNOLL, (2010)-**Radiation detection and measurement**, *john wiley & sons, Inc*, Fourth edition, chapter 2, pp 415-467.
- [13] S Das, A Chakraborty, A Mondal, K Shaw, A Sur, S Das, R Laha, (2015) -**Silicon PIN Diode for detection of electrons, alphas, X-rays and gamma rays**, *Indian Institute of Engineering Science and Technology*, Vol 60, Pp 976-977.
- [14] 35] j MA Jing, X JIN Ke, Ch LUO Bing, (2010)- **Rectifying and Photovoltage Properties of ZnO: Al/p-Si Heterojunction**, *Chinese physical society*, vol 27, no 10, pp194-197.
- [15] VOLK, J., et al, (2009)-**Highly uniform epitaxial ZnO nanorod arrays for nanopiezotronics**, *Nanoscale research letters*, Vol 4, pp 699-704.

- [16] ASGHAR, M. (2013)- **Growth and interface properties of Au Schottky contact on ZnO grown by molecular beam epitaxy.** *In: Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing*, p012031.
- [17] MWANKEMWA, Benard S., et al, (2018)-**Effects of surface morphology on the optical and electrical properties of Schottky diodes of CBD deposited ZnO nanostructures.** *Physical B: Condensed Matter*, Vol 535, Pp 175-180.
- [18] LORD, Alex M-(2020)-**Schottky contacts on polarity-controlled vertical ZnO nanorods.** *ACS applied materials & interfaces*, Vol 12, No11, Pp13217-13228.
- [19] SOMVANSI, Divya; JIT, Satyabrata. (2014)- **Effects of Sn and Zn seed layers on the electrical characteristics of Pd/ZnO thin-film Schottky diodes grown on n-Si substrates.** *IEEE Electron Device Letters*, Vol 35, No 9, Pp 945-947.
- [20] BRILLSON, L. J, (2007)-**Dominant effect of near-interface native point defects on ZnO Schottky barriers.** *Applied Physics Letters*, vol 90, no10.
- [21] D. C. Oh *et al*, (2005)-**Characteristics of schottky contacts to ZnO: N layers grown by molecular-beam epitaxy**, *Appl Phys Lett*, vol. 86, no. 4, pp 042110-1-042110-3.
- [22] ASGHAR, M, et al, (2013)-**Electrical characterization of Au/ZnO/Si Schottky contact.** *In: Journal of Physics: Conference Series*, pp 012030.
- [23] Gullu, H. H., Bayraklı Sürücü, Ö., Terlemozoglu, M. A. K. B. U. L. E., Yildiz, D. E., & Parlak, M, (2019)- **Investigation of electrical characteristics of Ag/ZnO/Si sandwich structure.** *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol 30, pp 15371-15378.
- [24] ,()-*Journal 2024 Resch ergate*, Vol 2401, no 06778, Pp1-23.
- [25] KRIEG, L., et al, (2020)- **Controlled formation of Schottky diodes on n-doped ZnO layers by deposition of p-conductive polymer layers with oxidative chemical vapor deposition.** *Nano Express*, Vol1, No 1, pp010013.

[26] CHENG, Ke, et al, (2007)-**Surface states dominative Au Schottky contact on vertical aligned ZnO nanorod arrays synthesized by low-temperature growth.** *New Journal of Physics*, Vol 9, NO7, PP 214.

[27] MENG, L Jianping, L Chengkuo (2024)-**Adjustment methods of Schottky barrier height in one-and two-dimensional semiconductor devices.** *Science Bulletin*, Vol 69, No9, Pp1342-1352.

[28] ALLEN, M. W., et al, (2009)-**Oxidized noble metal Schottky contacts to n-type ZnO.** *Applied Physics Letters*, 94NO10.

[29] I. Hussain, M. Y. Soomro, N. Bano, O. Nur. (2012) - **Interface trap characterization and electrical properties of Au-ZnO nanorod Schottky diodes by conductance and capacitance methods.** JOURNAL OF APPLIED PHYSICS. Vol 112, No 064506, Pp1-6

[30] L. J. Brillson and Y. Lu, (2011)- **ZnO Schottky barriers and Ohmic contacts,** *Journal of applied physics* Vol 109, No 12, Pp121301-121301-33.

[31] KESKENLER, E. F; HAIDAR, M, (2020)-**Schottky diode fabrication via cold substrate evaporated ag on sol-gel derived ZnO ultra-thin films for semiconductor devices.** *Journal of Ovonic Research*, Vol 16, no5, pp 309-321.

[32] KHAN, Muhammad Arif, (2020) -**ZnO nanowires based Schottky contacts of Rh/ZnO interfaces for the enhanced performance of electronic devices.** *Surfaces and Interfaces*, Vol 21, Pp100649.

[33] BRILLSON, Leonard J, (2012)- **Interplay of native point defects with ZnO Schottky barriers and doping.** *Journal of Vacuum Science & Technology B*, vol 30, no 5.

- [34] AHMED M, MEYER, E Walter, Jackie M, (2019)- **Structural, optical and electrical properties of the fabricated Schottky diodes based on ZnO, Ce and Sm doped ZnO films prepared via wet chemical technique.** *Materials Research Bulletin*, Vol 115, pp 12-18.
- [35] XU, Zhixing; ZHANG, Yongle; WANG, Zhaona. ZnO-based photodetector: from photon detector to pyro-phototronic effect enhanced detector. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52.22: 223001.
- [36] JIN, Jidong, et al. **Schottky diodes on ZnO thin films grown by plasma-enhanced atomic layer deposition.** *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64.3: 1225-1230.
- [37] KESKENLER, E. F; HAIDAR, M, (2020)-**Schottky diode fabrication via cold substrate evaporated ag on sol-gel derived ZnO ultra-thin films for semiconductor devices.** *Journal of Ovonic Research*, Vol 16, no5, pp 309-321.
- [38] Yadav, V. K. S., Raveesh, S., Daniel, T. T., & Paily, R. (2020)- **Microcantilever printed back-to-back ZnO single-nanowire Schottky diodes.** *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol 67, No8, 3309-3314.
- [39] Mayimele, M. A., van Rensburg, J. P. J., Aurret, F. D., Diale, M. (2016)- **Analysis of temperature-dependant current-voltage characteristics and extraction of series resistance in Pd/ZnO Schottky barrier diodes.** *Physica B: Condensed Matter*, Vol 480, pp 58-62.
- [40] Varma, T, (2017)-**Design and Development of Zinc Oxide thin film based Schottky Diodes and TFTs and their application as UV Detectors.** (Doctoral dissertation, MNIT Jaipur), Vol 2, No 5, PP1-23.

- [41] RAJAN, Lintu; PERIASAMY, C.; SAHULA, Vineet, (2016)-
Electrical characterization of Au/ZnO thin film Schottky diode on silicon substrate. *Perspectives in Science*, Vol 8, pp 66-68.
- [42] JIN, Jidong, (2018)-**A high speed PE-ALD ZnO Schottky diode rectifier with low interface-state density.** *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol 51, No 6, Pp 065102.
- [43] Faraz, S. M., Khranovskyy, V, Yakimova, R, Ulyashin, A., & Wahab, Q, (2011)- September). **Temperature dependent current transport in Schottky diodes of nano structured ZnO grown on Si by magnetron sputtering.** *Regional Symposium on Micro and Nano Electronics*, Vol 978, No1, pp. 48-51.

حركة وتحريك الآلة الخماسية المعدلة

إشراف: أ.د. مصطفى حسن

إعداد: سراء عبدالله

جامعة حمص، كلية العلوم، قسم الرياضيات

الملخص

تعتبر الآلة الخماسية المعدلة من أهم الآلات القضبانية في المجال التقني، نريد تزويد الآلة الخماسية بنواس، للاستفادة من الحرارة الناتجة عن حركة النواس من أجل تحويلها لاحقاً إلى طاقة كهربائية بواسطة مولد خاص لتصبح الآلة ذاتية الحركة. يهدف هذا العمل لإيجاد المعادلات التفاضلية لحركة الآلة الخماسية المعدلة ودراسة حركة النواس النسبية والجريّة.

الكلمات المفتاحية: الآلة الخماسية المعدلة، المعادلات التفاضلية، الطاقة الكهربائية، النواس، ذاتية الحركة.

Motion and dynamics of modified Five-bar mechanism

Dr .Mustafa Hasan

Sraa Abdullah

Homs University, Faculty of Science, Mathematics Department

Keyword: Modified Five-bar mechanism , Differential Equations,

Abstract

The modified five-bar mechanism is considered one of the most significant linkage-based systems in the technical field. This study proposes equipping the mechanism with a pendulum to harness the thermal energy generated by its motion and subsequently convert it into electrical energy using a dedicated generator, thereby enabling autonomous operation

The objective of this work is to derive the differential equations governing the motion of the modified five-bar mechanism and to analyze both the relative and translational dynamics of the .pendulum

Electrical energy, Pendulum, Self-Propelled.

المقدمة:

شهدت الآلات تطوراً كبيراً على مر العصور. بدأت الآلات البسيطة ثم تطورت إلى آلات أكثر تعقيداً. ومع تقدم التكنولوجيا، ظهرت آلات جديدة ومبتكرة، مثل الآلات الرقمية، والروبوتات، والذكاء الاصطناعي. ومن المتوقع أن يستمر تطور الآلات في المستقبل، مع ظهور تقنيات جديدة مثل الطباعة ثلاثية الأبعاد، والواقع الافتراضي والذكاء الاصطناعي. هذه التقنيات ستفتح آفاقاً جديدة لتطبيقات الآلات، مما سيؤثر بشكل كبير على حياتنا اليومية وفي مختلف الصناعات.

الآلة التقليدية: هي تصميم ناتج عن وصل جسمين صلبين أو أكثر بواسطة مفاصل حركية تتيح هذه المفاصل للأجسام قابلية الحركة، مع الأخذ بعين الاعتبار وجود جسم ثابت بين أجسام هذه الآلة، ويستخدم هذا التصميم لإنجاز عمل معين.

كمثال على هذه الآلات الشكل (1) آلة تقليدية (كماشة) مؤلفة من أجسام صلبة ومفاصل حركية.



الشكل (1) يمثل آلة تقليدية (كماشة)

الآلة المرنة: إن الآلات المرنة تتقل أو تعطي حركة، كما هو الحال في الآلات التقليدية، ولكن تختلف عن آلات التقليدية أنها تؤمن الحركة جزئياً أو كلياً اعتماداً على مرونة أجزائها المرنة، وليس فقط اعتماداً على المفاصل الحركية التقليدية، يظهر الشكل (2) آلة بأجزاء مرنة مناظرة للكماشة، إن القوة المعطاة هي باتجاه المخرج، كما

في الآلة التقليدية، ولكن يوجد هنا احتفاظ ببعض الطاقة في الأجزاء المرنة، فلو كانت الآلة صلبة بالكامل لتحولت إلى تركيب فقط (غير فعال بمفرده).



الشكل (2) يمثل آلة بأجزاء مرنة

أول من قام بدراسة خصائص النواصات بدءاً من عام 1602 هو العالم الإيطالي جاليليو جاليلي (Galileo Galilei)، وفي عام 1620 كان العالم البريطاني فرانسيس بيكون (Francis Bacon) من الأوائل الذي اقترحوا استخدام النواص لقياس الجاذبية حيث أخذ نواص إلى أعلى قمة جبل لمعرفة إذا كانت الجاذبية تختلف مع الارتفاع [1]، وفي عام 1656 أصبحت الساعة التي اخترعها كريستيان هويجنز (Christiaan Huygens) وهي أول ساعة تعتمد على النواص وهي الساعة المستعملة في المنازل والمكاتب لمدة 270 عاماً وحقت دقة تبلغ حوالي ثانية واحدة سنوياً قبل أن تحل محلها ساعة الكوارتز في العالم، وتم اختراع النواص المقاوم لدرجة الحرارة [2] والنواص الزئبقي [3] عام 1721 لأنهم وجدوا أن السبب الرئيسي للخطأ في الساعة التي تستعمل النواص هو أن قضيب النواص يتمدد وينكمش مع التغيرات في درجة الحرارة المحيطة به مما يؤدي إلى تغيير فترة التأرجح، أما في عام 1737 أجرى عالم الرياضيات الفرنسي بيير بوجوير (Pierre Bouguer) تجارب في جبال الأنديز في البيرو وفيها استخدم نواصاً نحاسياً على شكل مخروط مزدوج معلق بخيط حيث أرجح نفس النواص على ثلاثة ارتفاعات مختلفة عن مستوى سطح البحر إلى قمة مرتفعات البيرو ومقارنة ذلك مع جاذبية الأرض وتمكن من إجراء أول تقدير تقريبي لكثافة الأرض، وفي عام 1851 استخدم جان برنارد ليون فوكو (Jean Bernard Leon Foucault) النواص لإثبات دوران الأرض وذلك من خلال

تعليق ثقل قدره 28 كغ بسلك طوله 67 م (220 قدماً) إلى قبة كنيسة بانتيون في باريس مشكلاً بذلك نواساً عملاقاً، وقد لاحظ أن مستوى التآرجح يتقدم 360 درجة في اتجاه عقارب الساعة كل 32.7 ساعة وكان هذا أول دليل على دوران الأرض [4].

2- هدف البحث:

إيجاد المعادلات التفاضلية التي تعين حركة الآلة الخماسية المعدلة ودراسة حركة النواس النسبية والجريّة وربط حركته بحركة الآلة.

3- مواد وطرق البحث:

سوف نستخدم نظرية البيان ونظرية الطاقة الحركية ونظرية العزم الحركي ونظرية كمية الحركة.

- الآلة الخماسية: هي آلة مكونة من خمسة أجسام مرتبطة بخمسة مفاصل دورانية.

- الآلة الخماسية المعدلة: هي ذاتها الآلة الخماسية، ولكنها مزودة بنواس والهدف من هذه الزيادة هي الاستفادة من الطاقة الحرارية الناتجة عن حركة النواس وتحويلها بواسطة مولد خاص إلى طاقة كهربائية لتصبح الآلة ذاتية الحركة.

الدراسة التحريكية للآلة الخماسية المعدلة:

الشكل (3) يوضح لنا الآلة الخماسية المعدلة والوسطاء الكافية لتعيينها والقوى الخارجية المؤثرة عليها حيث OXY جملة مقارنة ثابتة قاعدتها (o, \vec{i}, \vec{j}) . تمثل المستوي الشاقولي الذي تتحرك فيه الآلة حيث المحور الأفقي OX ينطبق على القضيب الثابت OD, ويكون المحور OY عمودياً عليه في O, وهذه الآلة تتألف من خمسة قضبان ونواس وهي: OD, OA, AB, PN, BC, CD حيث OD قضيب ثابت، لنفرض أن كتلته كل من القضبان OA, AB, BC, CD هي m_1, m_2, m_3, m_4 على الترتيب ومراكز كتلها على

الترتيب أيضاً هي c_1, c_2, c_3, c_4 وطول كل من قضبان على الترتيب r_2, r_3, r_4, r_5 وكتلة النواس هي m_5 ومركز كتلته c_5 وطوله L ، أما طول القضيب OD فهو a ، ويكون وسطاء هذه الآلة: $\theta, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5$ ولكن هذه الوسطاء ليست مستقلة، بل يوجد بينها ارتباطات لتوفر طريقاً مغلقاً واحداً [5] هو:

$$q_1 + q_2 - q_3 - q_4 + q_5 = 0 \quad \dots(1')$$

بالإسقاط الشكل (3) على المحاور الاحداثية نجد:

$$\begin{aligned} r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + L \cos(q_1 + q_2 + \theta) + r_4 \cos(q_1 + q_2 + q_5) \\ + r_5 \cos q_3 - a &= 0 \\ r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) + r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_5) \\ + r_5 \sin q_3 &= 0 \quad \dots(2') \end{aligned}$$

نزيل الوسيط q_3 بتربيع العلاقة (2') وبالجمع ومنه نجد:

$$q_5 = f_1(q_1, q_2, \theta)$$

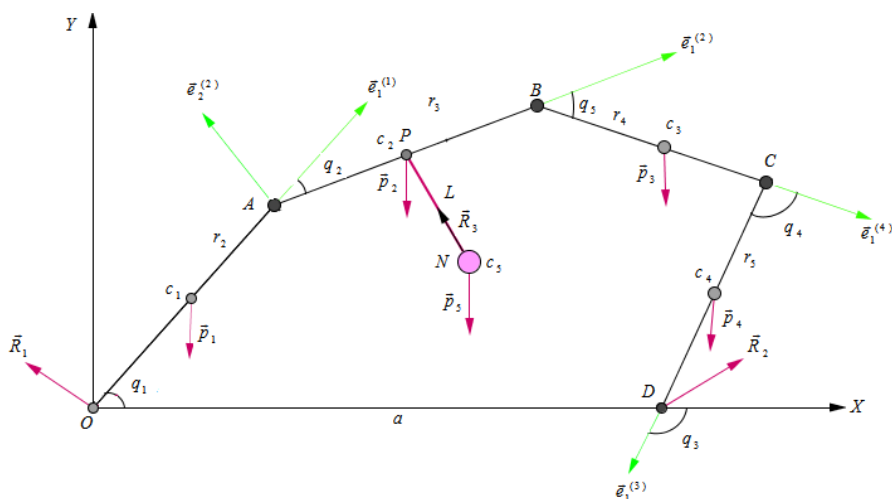
من العلاقة (2') لدينا:

$$q_3 = \frac{1}{r_5} \arctan \frac{r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) + r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_5)}{r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + L \cos(q_1 + q_2 + \theta) + r_4 \cos(q_1 + q_2 + q_5) - a}$$

$$\Rightarrow q_3 = f_2(q_1, q_2, \theta)$$

$$q_4 = f_3(q_1, q_2) \quad \text{من (1') لدينا}$$

⇐ إذا الآلة تتعين حركتها بالوسطاء θ, q_1, q_2



الشكل (3) يمثل آلة خماسية معدلة

لإيجاد المعادلات التفاضلية التي تعين حركة الآلة الخماسية المعدلة: هذه الآلة تتعين بمعرفة ثلاثة وسطاء مستقلة أي تملك ثلاث درجات حرية أي نحتاج لإيجاد ثلاث معادلات تفاضلية.

لإيجاد معادلة تفاضلية الأولى نطبق نظرية الطاقة الحركية وذلك بالشكل:

$$T_0(s) = U + h \dots (1)$$

حيث $T_0(s)$ الطاقة الحركية للمجموعة المادية المكونة للآلة الخماسية المعدلة أما U فهي مجموع أعمال القوى الخارجية أما h فهو ثابت يمكن حسابه من شروط البدء: إن الطاقة الحركية للآلة الخماسية المعدلة تحسب بالشكل:

$$T_0(s) = T_0(oA) + T_0(AB) + T_0(PN) + T_0(BC) + T_0(CD) \dots (2)$$

القضيب OA الذي كتلته m_1 وطوله r_2 ومركز كتله c_1 حركته دورانية حول المحور الأفقي العمودي على مستوي الحركة في O أي حول محور OZ بالزاوية الدوران q_1 إن طاقته الحركية تعطى بالشكل التالي:

$$T_0(oA) = \frac{1}{2} I_{0z} \cdot \dot{q}_1^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{m_1 \cdot r_2^2}{3} \right) \dot{q}_1^2 \Rightarrow T_0(oA) = \frac{1}{6} m_1 \cdot r_2^2 \cdot \dot{q}_1^2 \dots (3)$$

أما القضيب AB الذي كتلته m_2 وطوله r_3 فإن حركته عامة في المستوي OXY ولإيجاد طاقته الحركية نطبق نظرية كونيغ الثانية:

$$T_0(AB) = T_{c_2}(AB) + T_0(c_2)$$

حيث c_2 مركز كتل القضيب AB، إن حركة AB حول c_2 هي حركة دورانية بزواوية الدوران q_2 حول المحور المار من c_2 والعمودي على مستوي الحركة وبالتالي فإن:

$$T_{c_2}(AB) = \frac{1}{2} I_{c_2z} \dot{q}_2^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{m_2 \cdot r_3^2}{12} \right) \dot{q}_2^2$$

$$\Rightarrow T_{c_2}(AB) = \frac{1}{24} m_2 \cdot r_3^2 \cdot \dot{q}_2^2$$

أما الطاقة الحركية لمركز الكتل c_2 بالنسبة ل O فهي:

$$T_0(c_2) = \frac{1}{2} m_2 \cdot v^2(c_2)$$

ولحساب $\vec{V}(c_2)$ نوجد متجه الموضع $\overrightarrow{OC_2}$ بالشكل:

$$\overrightarrow{OC_2} = \overrightarrow{oA} + \overrightarrow{AC_2} =$$

$$\left[r_2 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 \cos(q_1 + q_2) \right] \vec{i} + \left[r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) \right] \vec{j}$$

$$\Rightarrow \overrightarrow{v}(c_2) = \left[-r_2 \dot{q}_1 \sin q_1 - \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) \right] \vec{i}$$

$$+ \left[r_2 \dot{q}_1 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) \right] \vec{j}$$

$$\Rightarrow v^2(c_2) = r_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{4} r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + r_2 r_3 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2$$

وبالتالي نجد أن $T_0(c_2)$ بالشكل:

$$T_0(C_2) = \frac{1}{2}m_2 \left[r_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{4}r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + r_2 r_3 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 \right]$$

وبالتالي الطاقة الحركية للقضيب AB هي:

$$T_0(AB) = \frac{1}{24}m_2 r_3^2 \dot{q}_2^2 + \frac{1}{2}m_2 \left[r_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{4}r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + r_2 r_3 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 \right] \dots (4)$$

لحساب الطاقة الحركية للنواس الذي كتلته m_5 وطوله L يتحرك حركة مستوية (دوراني وانسحابية) حيث زاوية دورانه θ نطبق نظرية كوينغ الثانية:

$$T_0(PN) = T_{c_5}(PN) + T_0(c_5)$$

$$T_{c_5}(PN) = \frac{1}{2}I_{c_5z} \dot{\theta}^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{3}m_5 L^2 \right) \dot{\theta}^2 = \frac{1}{3}m_5 L^2 \dot{\theta}^2$$

$$T_0(c_5) = \frac{1}{2}m_5 v^2(c_5)$$

حيث m_5 هي كتلة النواس PN وهي مجموع كتلة نقاط النواس وهي ثابتة، ومركز كتله c_5 .

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{oc_5} &= \overrightarrow{oA} + \overrightarrow{AP} + \overrightarrow{PN} \\
 \Rightarrow \overrightarrow{oc_5} &= \left[r_2 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 \cos(q_1 + q_2) + L \cos(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{i} + \\
 &\left[r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{j} \\
 \vec{v}(c_5) &= \frac{d\overrightarrow{oc_5}}{dt} = \\
 &\left[-r_2 \dot{q}_1 \sin q_1 - \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) - L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{i} \\
 &+ \left[r_2 \dot{q}_1 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) + L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{j} \\
 \Rightarrow v^2(c_5) &= r_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{4} r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + L^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} r_2 r_3 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 \\
 &+ \frac{1}{2} r_3 L (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos \theta + r_2 L \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_2 + \theta) \Rightarrow \\
 T_0(PN) &= \frac{1}{2} m_5 v^2(c_5) + \frac{1}{3} m_5 L^2 \dot{\theta}^2 \\
 &= \frac{1}{2} m_5 (r_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{4} r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + L^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta})^2 + \frac{1}{2} r_2 r_3 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 \\
 &+ \frac{1}{2} r_3 L (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos \theta + r_2 L \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_2 + \theta)) + \frac{1}{3} m_5 L^2 \dot{\theta}^2 \\
 &\dots(5)
 \end{aligned}$$

حساب الطاقة الحركية للقضيب BC:

إن القضيب BC الذي كتلته m_3 وطوله r_4 يتحرك حركة عامة في المستوى OXY وبالتالي لحساب الطاقة الحركية نطبق نظرية كونيغ الثانية بالشكل:

$$T_0(BC) = T_{C_3}(BC) + T_0(C_3)$$

إن القضيب BC يتحرك حركة دورانية آنية حول المحور المار من مركز كتلته C_3 والعمودي على مستوي الحركة أي حول المحور C_3Z بزاوية الدوران q_5 وبالتالي فإن طاقته الحركية حول C_3 هي:

$$T_{C_3}(BC) = \frac{1}{2} I_{C_3Z} \dot{q}_5^2$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{12} m_3 r_4^2 \right) \dot{q}_5^2 = \frac{1}{24} m_3 r_4^2 \dot{q}_5^2$$

أمّا الطاقة الحركية لـ C_3 يمكن حسابها بالشكل:

$$T_0(c_3) = \frac{1}{2} m_3 v^2(c_3)$$

$$\overrightarrow{OC_3} = \left[r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 \cos(q_1 + q_2 + q_5) \right] \vec{i}$$

$$+ \left[r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_5) \right] \vec{j}$$

$$\vec{V}(c_3) = \frac{d}{dt} \overrightarrow{OC_3} =$$

$$\left[-r_2 \dot{q}_1 \sin q_1 - r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) - \frac{1}{2} r_4 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \sin(q_1 + q_2 + q_5) \right] \vec{i} +$$

$$\left[r_2 \dot{q}_1 \cos q_1 + r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos(q_1 + q_2 + q_5) \right] \vec{j}$$

وبالتالي نجد أن القضييب BC طاقته الحركية هي:

$$T_0(BC) = \frac{1}{24} m_3 r_4^2 \dot{q}_5^2 + \frac{1}{2} m_3 r_2^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} m_3 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + \frac{1}{8} m_3 r_4^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5)^2$$

$$+ \frac{1}{2} m_3 r_3 r_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 + \frac{1}{4} m_3 r_4 r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos q_5$$

$$+ \frac{1}{4} m_3 r_2 r_4 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos(q_2 + q_5) \dots (6)$$

لنحسب الآن الطاقة الحركية للقضييب CD الذي كتلته m_4 وطوله r_5 ومركز كتله c_4 الذي حركته دورانية حول المحور الأفقي العمودي على مستوي الحركة بزاوية الدوران q_3 فإن طاقته الحركية:

$$T_0(CD) = \frac{1}{2} I_{CZ} \dot{q}_3^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{m_4 r_5^2}{3} \right) \dot{q}_3^2 = \frac{1}{6} m_4 r_5^2 \dot{q}_3^2 \dots (7)$$

نعوض العلاقات (3)، (4)، (5)، (6)، (7)، في العلاقة (2) نحصل على الطاقة الحركية للآلة الخماسية المعدلة:

$$T_0(S) = \frac{1}{6} [m_1 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_4 r_5^2 \dot{q}_3^2] + \left. \begin{aligned} & \frac{1}{24} (m_2 r_3^2 \dot{q}_2^2 + m_3 r_4^2 \dot{q}_5^2) \\ & + \frac{1}{2} (m_2 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_2 r_3 r_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_2) + m_5 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_5 L^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta})^2 + \\ & r_2 L m_5 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_2 + \theta) + m_3 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_3 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + m_3 r_3 r_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_2)) \\ & + \frac{1}{8} (m_2 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + m_3 r_4^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5)^2 + m_5 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2) \\ & + \frac{1}{3} m_5 L^2 \dot{\theta}^2 \\ & + \frac{1}{4} (m_5 r_3 r_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_2) + r_3 L m_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(\theta) + \\ & m_3 r_3 r_4 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos(q_5) + m_3 r_2 r_4 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos(q_2 + q_5)) \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

إن القوى الخارجية المؤثرة على المجموعة المادية المكونة للآلة الخماسية المعدلة وهي

قوى النقل $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3, \vec{P}_4$ للقضبان OA, AB, BC, CD وقوة نقل نواس \vec{P}_5

على الترتيب بالإضافة إلى قوة رد فعل المفصل الثابت O وقوة رد فعل في المفصل الثابت D وقوة شد الخيط \vec{R}_3 لنحسب أعمال هذه القوى:

القوة \vec{P}_1 هي قوة نقل القضيب OA نقطة تأثيرها C_1 وهي قوة شاقولية نحو الأسفل وتعطى $\vec{P}_1 = -m_1 \vec{g}j$ وعملها يساوي:

$$U(\vec{P}_1) = \int \vec{P}_1 d\vec{oc}_1 = \int -m_1 \vec{g}j d\left(\frac{1}{2}r_2 \cos q_1 \vec{i} + \frac{1}{2}r_2 \sin q_1 \vec{j}\right) \\ \Rightarrow U(\vec{P}_1) = -\frac{1}{2}m_1 g r_2 \sin q_1$$

القوة \vec{P}_2 هي قوة نقل القضيب AB نقطة تأثيرها C_2 وهي قوة شاقولية تتجه نحو الأسفل وتكتب $\vec{P}_2 = -m_2 \vec{g}j$ وعملها يساوي:

$$U(\vec{P}_2) = \int \vec{P}_2 d\vec{oc}_2$$

$$\Rightarrow U(\vec{P}_2) = -m_2 g \left(r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) \right)$$

القوة \vec{P}_3 قوة ثقل القضيب BC نقطة تأثيرها C_3 وهي قوة شاقولية تتجه نحو الأسفل نحسب عملها:

$$\vec{P}_3 = -m_3 \vec{g}$$

$$\Rightarrow U(\vec{P}_3) = -m_3 g \left[r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \right]$$

القوة \vec{P}_4 قوة ثقل القضيب CD وهي قوة شاقولية نحو الأسفل وتكتب:

$$\vec{P}_4 = -m_4 \vec{g}$$

$$\Rightarrow U(\vec{P}_4) = \int \vec{P}_4 d\vec{OC}_4 = -\frac{1}{2} m_4 g r_5 \sin q_3$$

أما \vec{P}_5 فهي قوة ثقل النواس PN :

$$U(\vec{P}_5) = -m_5 g \left(r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_2 + q_1) + L \sin(q_2 + q_1 + \theta) \right)$$

القوى \vec{R}_1 هي قوى رد فعل في المفصل الثابت O والتي عملها معدوم لأن نقطة تأثيرها ساكنة وبالتالي الانتقال الذي تسببه معدوم وبالمثل قوة \vec{R}_2 قوى رد فعل في المفصل الثابت D عملها معدوم لنفس السبب وقوة الشد الخيط \vec{R}_3 .

مما تقدم نجد أن مجموع أعمال القوى الخارجية المؤثرة بالمجموعة المادية:

$$\left(\begin{array}{l} U = -\frac{1}{2} m_1 g r_2 \sin q_1 - m_2 g \left(r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) \right) \\ -m_3 g \left(r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_3) - \frac{1}{2} m_4 g r_5 \sin q_3 \right) \dots (9) \\ -m_5 g \left(r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right) + \vec{R}_3 \end{array} \right)$$

نعوض (8) و (9) في (1) نحصل على المعادلة التفاضلية الأولى للحركة بالشكل:

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{6} [m_1 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_4 r_5^2 \dot{q}_3^2] + \frac{1}{24} (m_2 r_3^2 \dot{q}_2^2 + m_3 r_4^2 \dot{q}_5^2) + \frac{1}{2} (m_2 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_2 r_3 r_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_2) \\
 & + m_3 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_5 L^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta})^2 + r_2 L m_5 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_2 + \theta) + m_3 r_2^2 \dot{q}_1^2 + m_3 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \\
 & + m_3 r_3 r_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_2)) + \frac{1}{8} (m_2 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 + m_3 r_4^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5)^2 + m_5 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2) + \frac{1}{3} m_5 L^2 \dot{\theta}^2 + \\
 & \frac{1}{4} (m_5 r_3 r_2 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_2) + r_3 L m_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(\theta) + \\
 & m_3 r_3 r_4 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos(q_5) + m_3 r_2 r_4 \dot{q}_1 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos(q_2 + q_5)) = \\
 & -\frac{1}{2} m_1 g r_2 \sin q_1 - m_2 g \left(r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) \right) - m_3 g \\
 & \left(r_2 \sin q_1 + r_3 \sin(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 \sin(q_1 + q_2 + q_5) - \frac{1}{2} m_4 g r_5 \sin q_3 \right) \\
 & - m_5 g \left(r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right) + \bar{R}_3 + h \quad \dots(*)
 \end{aligned}$$

لإيجاد المعادلة التفاضلية الثانية نطبق نظرية العزم الحركي بالنسبة ل O وذلك كما يلي:

$$\frac{d}{dt} \overrightarrow{\sigma_o}(s) = \sum_{i=1}^5 \overrightarrow{M_o om}(\overrightarrow{p_i}) + \sum_{i=1}^3 \overrightarrow{M_o om}(\overrightarrow{R_i}) \dots (10)$$

تحسب العزم الحركي للقضيب OA الذي حركته دورانية:

$$\overrightarrow{\sigma_o}(oA) = I_{O_z} \dot{q}_1 \vec{k} = \frac{1}{3} m_1 r_2^2 \dot{q}_1 \vec{k}$$

أما العزم الحركي للقضيب AB الذي حركته عامة في المستوي oxy يحسب من نظرية كونيغ الأولى:

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{\sigma_o}(AB) &= \overrightarrow{\sigma_{c_2}}(AB) + \overrightarrow{\sigma_o}(C_2) = \\
 & I_{c_2 z} \dot{q}_2 \vec{k} + \overrightarrow{oc_2} \wedge m_2 \vec{v}(c_2) \\
 \Rightarrow \overrightarrow{\sigma_o}(AB) &= \left[\frac{1}{12} m_2 r_3^2 \dot{q}_2 + m_2 r_2^2 \dot{q}_1 + \frac{1}{4} m_2 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \frac{1}{2} m_2 r_3 r_2 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 \right]
 \end{aligned}$$

أما العزم الحركي للنواس pN الذي حركته عامة في المستوي oxy:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\sigma_0}(PN) &= \overrightarrow{\sigma_{C_5}}(PN) + \overrightarrow{\sigma_0}(C_5) = \\ I_{C_5} \dot{\theta} \vec{k} + \overrightarrow{OC_5} \wedge m_5 \vec{v}(C_5) &= \frac{2}{3} m_5 \dot{\theta} L^2 \vec{k} + \overrightarrow{OC_5} \wedge m_5 \vec{v}(C_5) \\ \overrightarrow{OC_5} \wedge m_5 \vec{v}(C_5) &= \left[\begin{aligned} &r_2^2 m_5 \dot{q}_1 + \frac{r_3^2}{4} m_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + m_5 L^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) + \frac{1}{2} r_2 r_3 m_5 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 + \\ &L m_5 r_2 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_2 + \theta) + \frac{1}{2} m_5 L r_3 (2\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(\theta) \end{aligned} \right] \vec{k} \\ \Rightarrow \overrightarrow{\sigma_0}(PN) &= \left[\begin{aligned} &\frac{2}{3} m_5 \dot{\theta} L^2 + r_2^2 m_5 \dot{q}_1 + \frac{r_3^2}{4} m_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + m_5 L^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) + \frac{1}{2} r_2 r_3 m_5 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 + \\ &L m_5 r_2 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_2 + \theta) + \frac{1}{2} m_5 L r_3 (2\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(\theta) \end{aligned} \right] \vec{k}\end{aligned}$$

أمّا العزم الحركي للقضيب BC حركته عامة في المستوي oxy:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{\sigma_0}(BC) &= \overrightarrow{\sigma_{C_3}}(BC) + \overrightarrow{\sigma_0}(C_3) = \\ I_{C_3} \dot{q}_3 \vec{k} + \overrightarrow{OC_3} \wedge m_3 \vec{v}(C_3) \\ &= \left[\begin{aligned} &\frac{1}{12} m_3 r_4^2 \dot{q}_3 - m_3 r_2^2 \dot{q}_1 - m_3 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ &-\frac{1}{4} m_3 r_4^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3) - m_3 (1 + \dot{q}_1 + \dot{q}_2) \left(r_2 r_3 \cos q_2 - \frac{1}{2} r_2 r_4 \cos(q_3 + q_2) - \frac{1}{2} r_3 r_4 \cos q_3 \right) \end{aligned} \right] \vec{k}\end{aligned}$$

أمّا العزم الحركة للقضيب CD حركته دورانية:

$$\overrightarrow{\sigma_0}(CD) = \frac{1}{3} m_4 r_5^2 \dot{q}_3 \vec{k}$$

لنحسب الآن عزوم القوى الخارجية المؤثرة في هذه الآلة وهي:

عزم القوة $\overrightarrow{p_1}$ قوة ثقل القضيب OA وتحسب بالشكل:

$$\overrightarrow{Mo_0 m(\overrightarrow{p_1})} = \overrightarrow{OC_1} \wedge \overrightarrow{p_1} = -\frac{1}{2} m_1 r_2 g \cos q_1 \vec{k}$$

وكذلك $\overrightarrow{p_2}$ قوة ثقل القضيب AB عزمها:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{Mo_0m}(\overrightarrow{p_2}) &= \overrightarrow{oc_2} \wedge \overrightarrow{p_2} \\ &= -m_2g \left(r_2 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 \cos(q_1 + q_2) \right) \vec{k}\end{aligned}$$

$\overrightarrow{p_5}$ قوة ثقل النواس PN وعزمها:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{Mo_0m}(\overrightarrow{p_5}) &= \overrightarrow{oc_5} \wedge \overrightarrow{p_5} \\ &= -m_5g \left(r_2 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 \cos(q_2 + q_1) + L \cos(q_2 + q_1 + \theta) \right) \vec{k}\end{aligned}$$

$\overrightarrow{p_3}$ قوة ثقل للقضيب BC وعزمها:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{Mo_0m}(\overrightarrow{p_3}) &= \overrightarrow{oc_3} \wedge \overrightarrow{p_3} = \\ &= -m_3g \left(r_2 \cos q_1 + r_3 \cos(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 \cos(q_1 + q_2 + q_5) \right) \vec{k}\end{aligned}$$

$\overrightarrow{p_4}$ قوة ثقل للقضيب CD وعزمها:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{Mo_0m}(\overrightarrow{p_4}) &= \overrightarrow{oc_4} \wedge \overrightarrow{p_4} = \\ &= -m_4g \left(a + \frac{1}{2} r_5 \cos q_3 \right) \vec{k}\end{aligned}$$

وبالتالي العزم الحركي للقضبان والنواس هو:

$$J_5 = \vec{\sigma}_0(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{12} m_3 r_4^2 \dot{q}_5 + \frac{1}{4} m_2 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \frac{1}{2} m_2 r_3 r_2 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 - m_3 r_2^2 \dot{q}_1 \\ -m_3 r_3^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + r_2^2 m_5 \dot{q}_1 + \frac{1}{3} m_4 r_5^2 \dot{q}_3 + \frac{r_3^2}{4} m_5 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + m_5 L^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \\ + \frac{1}{2} r_2 r_3 m_5 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos q_2 + \frac{2}{3} m_5 \dot{\theta} L^2 + \frac{1}{3} m_1 r_2^2 \dot{q}_1 + \frac{1}{12} m_2 r_3^2 \dot{q}_2 \\ + m_2 r_2^2 \dot{q}_1 + \frac{1}{4} m_3 r_4^2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) + L m_5 r_2 (2\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_2 + \theta) \\ + \frac{1}{2} m_5 L r_3 (2\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(\theta) - m_3 (1 + \dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \left(r_2 r_3 \cos q_2 - \frac{1}{2} r_2 r_4 \cos(q_5 + q_2) - \frac{1}{2} r_3 r_4 \cos q_5 \right) \end{bmatrix} \vec{k}$$

ولنبداً بحساب عزوم ردود الأفعال: \vec{R}_1 هي قوة رد فعل في مفصل ثابت O وعزمها يساوي الصفر وذلك لأن نقطة تأثير هذه القوة تنطبق على مركز العزم O أي أن:

$$\overrightarrow{Mo_0 m}(\vec{R}_1) = 0$$

أما قوة رد فعل في مفصل ثابت D وعزمها يساوي :

$$\overrightarrow{Mo_0 m}(\vec{R}_2) = \overrightarrow{OD} \wedge \vec{R}_2 = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ a & 0 & 0 \\ R_{2x} & R_{2y} & 0 \end{vmatrix} = a R_{2y} \vec{k}$$

حيث $a = OD$

\vec{R}_3 قوة شد خيط النواس عزمها يساوي

$$\begin{aligned} \overrightarrow{Mo_0 m}(\vec{\tau}) &= \overrightarrow{oc_5} \wedge \vec{R}_3 = \\ &= \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ r_2 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 \cos(q_1 + q_2) + L \cos(q_1 + q_2 + \theta) & r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) & 0 \\ \tau_{3x} & \tau_{3y} & 0 \end{vmatrix} \\ &= [[r_2 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 \cos(q_1 + q_2) + L \cos(q_1 + q_2 + \theta)] \tau_{3y} - [r_2 \sin q_1 + \frac{1}{2} r_3 \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta)] \tau_{3x}] \vec{k} \end{aligned}$$

و بالتالي أصبح العزم الحاصل للقوى الخارجية تعطى بالعلاقة:

$$J_6 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}m_1r_2g\cos q_1 - m_2g\left(r_2\cos q_1 + \frac{1}{2}r_3\cos(q_1 + q_2)\right) \\ -m_5g\left(r_2\cos q_1 + \frac{1}{2}r_3\cos(q_2 + q_1) + L\cos(q_2 + q_1 + \theta)\right) \\ -m_3g\left(r_2\cos q_1 + r_3\cos(q_1 + q_2) + \frac{1}{2}r_4\cos(q_1 + q_2 + q_5)\right) \\ + aR_{2y} - m_4g\left(a + \frac{1}{2}r_5\cos q_5\right) \\ + [r_2\cos q_1 + \frac{1}{2}r_3\cos(q_1 + q_2) + L\cos(q_1 + q_2 + \theta)]\tau_{3y} \\ - [r_2\sin q_1 + \frac{1}{2}r_3\sin(q_1 + q_2) + L\sin(q_1 + q_2 + \theta)]\tau_{3x} \end{bmatrix} \bar{k}$$

وبالتعويض في نظرية العزم الحركي وبالإسقاط على المحور OZ نجد:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \frac{1}{12}m_3r_4^2\dot{q}_5 + \frac{1}{4}m_2r_3^2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + \frac{1}{2}m_2r_3r_2(2\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\cos q_2 - m_3r_2^2\dot{q}_1 \\ -m_3r_3^2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + r_2^2m_5\dot{q}_1 + \frac{1}{3}m_4r_5^2\dot{q}_3 + \frac{r_3^2}{4}m_5(\dot{q}_1 + \dot{q}_2) + m_5L^2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \\ + \frac{1}{2}r_2r_3m_5(2\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\cos q_2 + \frac{2}{3}m_5\dot{\theta}L^2 + \frac{1}{3}m_1r_2^2\dot{q}_1 + \frac{1}{12}m_2r_3^2\dot{q}_2 \\ + m_2r_2^2\dot{q}_1 + \frac{1}{4}m_3r_4^2(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) + Lm_5r_2(2\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta})\cos(q_2 + \theta) \\ + \frac{1}{2}m_5Lr_3(2\dot{q}_1 + 2\dot{q}_2 + \dot{\theta})\cos(\theta) - m_3(1 + \dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ \left(r_2r_3\cos q_2 - \frac{1}{2}r_2r_4\cos(q_5 + q_2) - \frac{1}{2}r_3r_4\cos q_5\right) \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}m_1r_2g\cos q_1 - m_2g\left(r_2\cos q_1 + \frac{1}{2}r_3\cos(q_1+q_2)\right) \\ -m_5g\left(r_2\cos q_1 + \frac{1}{2}r_3\cos(q_2+q_1) + L\cos(q_2+q_1+\theta)\right) \\ -m_3g\left(r_2\cos q_1 + r_3\cos(q_1+q_2) + \frac{1}{2}r_4\cos(q_1+q_2+q_5)\right) \\ +aR_{2y} - m_4g\left(a + \frac{1}{2}r_5\cos q_5\right) \\ +[r_2\cos q_1 + \frac{1}{2}r_3\cos(q_1+q_2) + L\cos(q_1+q_2+\theta)]\tau_{3y} \\ -[r_2\sin q_1 + \frac{1}{2}r_3\sin(q_1+q_2) + L\sin(q_1+q_2+\theta)]\tau_{3x} \end{bmatrix} \vec{k}...(**)$$

وهي معادلة تفاضلية الثانية للحركة.

لإيجاد معادلة التفاضلية الثالثة نطبق نظرية كمية الحركة:

$$\frac{d}{dt}\vec{p}(s) = \sum_{i=1}^5 \vec{p}_i + \sum_{i=1}^3 R_i... (11)$$

إن كمية الحركة للقضيب OA تعطى بالعلاقة:

$$\vec{p}(oA) = m_1\vec{V}(c_1) = m_1\left[-\frac{1}{2}r_2\dot{q}_1 \sin q_1 \vec{i} + \frac{1}{2}r_2\dot{q}_1 \cos q_1 \vec{j}\right]$$

إن كمية الحركة للقضيب AB تعطى بالعلاقة:

$$\vec{p}(AB) = m_2\vec{V}(c_2) = m_2\left[-r_2\dot{q}_1 \sin q_1 - \frac{1}{2}r_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\sin(q_1+q_2)\right]\vec{i} \\ + \left[r_2\dot{q}_1 \cos q_1 + \frac{1}{2}r_3(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)\cos(q_1+q_2)\right]\vec{j}$$

إن كمية الحركة للقضيب BC تعطى بالعلاقة:

$$\begin{aligned}\vec{p}(Bc) &= m_3 \vec{V}(c_3) = \\ m_3 &\left[-r_2 \dot{q}_1 \sin q_1 - r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) - \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \sin(q_1 + q_2 + q_5) \right] \vec{i} \\ + m_3 &\left[r_2 \dot{q}_1 \cos q_1 + r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) + \frac{1}{2} r_4 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \cos(q_1 + q_2 + q_5) \right] \vec{j}\end{aligned}$$

إن كمية الحركة للقضيب CD تعطى بالعلاقة:

$$p(\overline{CD}) = m_4 \vec{V}(c_4) = m_4 \left[\left(-\frac{1}{2} r_5 \dot{q}_3 \sin q_3 \right) \vec{i} + \left(\frac{1}{2} r_5 \dot{q}_3 \cos q_3 \right) \vec{j} \right]$$

أما كمية الحركة للنواس PN :

$$\begin{aligned}\vec{P}(PN) &= m_5 \vec{v}(c_5) = \\ -m_5 &\left[-r_2 \dot{q}_1 \sin q_1 - \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) - L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{i} \\ + &\left[r_2 \dot{q}_1 \cos q_1 + \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) + L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{j}\end{aligned}$$

نجمع كميات حركة سابقة نحصل على كمية حركة هذه الآلة بتعويض في نظرية كمية الحركة والأسقاط على المحور OX نحصل:

$$\begin{aligned}& -\left(\frac{1}{2} m_1 + m_2 + m_3 \right) r_2 \dot{q}_1 \sin q_1 - \left(\frac{1}{2} m_2 + m_3 \right) r_3 (\dot{q}_2 + \dot{q}_1) \sin(q_1 + q_2) \\ & - \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_5) \sin(q_1 + q_2 + q_5) - \frac{1}{2} m_4 r_5 \dot{q}_3 \sin q_3 \\ & - m_5 (-r_2 \dot{q}_1 \sin q_1 - \frac{1}{2} r_3 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_2 + q_1) - L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \sin(q_1 + q_2 + \theta)) = \sum_{i=1}^3 R_{ix} \\ & \dots (***)\end{aligned}$$

إن معادلات (*) و (**) و (***) تمثل المعادلات التفاضلية للحركة.

-التحليل الدقيق للآلة بشكل كامل:

لنأخذ الجملة oe_0 كجملة مطلقة في الجسم الصفري، ولنرمز لها اختصاراً بالرمز oe يتعين موضع أي جسم بالنسبة لها بمساعدة نصف القطر المتجهي R_i لنقطة مثبتة فيه C_i وجملة متعامدة ونظامية فيه e^i حيث: $(i=1,2,...,n)$

لدينا درجة حرية واحدة للحركة النسبية في أي مفصل، ولهذا فإن وضع الجملة كاملةً يتعين بواسطة (m) وسيط معمم:

$$\underline{q} = (q_1, \dots, q_m)^T$$

من أجل أي جسمين اختياريين يمكن أن نكتب:

$$(R_{i^{+(a)}} + c_{i^{+(a)a}}) - (R_{i^{-(a)}} + c_{i^{-(a)a}}) = -z_a; a=1,2,...,m \dots (12)$$

وإذا أخذنا بعين الاعتبار تعريف مصفوفة التتالي يمكن كتابة العلاقة السابقة بالشكل:

$$\sum_{i=0}^n s_{ia} (R_i + c_{ia}) = s_{0a} c_{0a} + \sum_{i=1}^n s_{ia} (R_i + c_{ia}) = -z_a; a=1,...,m \dots (13)$$

الآن وبمساعدة مصفوفة التتالي سنعرف المصفوفة التالية:

$$\underline{j} = (s_{ia} c_{ia}) (i=0,1,...,n; a=1,2,...,m) \dots (14)$$

تتعين المتجهات C_{ia} من أجل $i = i^{\pm}(a)$ فقط وفيما عدا ذلك هذه المتجهات مساوية للصفر تملك المصفوفة \underline{j} نفس تركيب مصفوفة التتالي:

$$\underline{j} = \begin{bmatrix} \check{c}_0 & \hat{c}_0 \\ \check{c} & \hat{c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0 \\ c \end{bmatrix} \dots (15)$$

حيث:

$$\check{\underline{c}}_0 = (s_{0a}c_{0a}), (a = 1, \dots, n), \hat{\underline{c}}_0 = (s_{0a}c_{0a}), (a = n+1, \dots, m),$$

$$\check{\underline{c}} = (s_{ia}c_{ia}), (i, a = 1, \dots, n), \hat{\underline{c}} = (s_{ia}c_{ia})$$

$$(i = 1, \dots, n; a = n+1, \dots, m), \underline{c}_0 = (s_{0a}c_{0a}), (a = 1, \dots, m)$$

$$\underline{c} = (s_{ia}c_{ia}), (i = 1, \dots, n; a = 1, \dots, m)$$

وينفس الطريقة، نعرف المصفوفة:

$$\underline{J}^* = (s_{ia}^+ z_a); (i = 0, 1, \dots, n; a = 1, \dots, m) \quad \dots (16)$$

تملك المصفوفة (16) الشكل:

$$\underline{J}^* = \begin{bmatrix} \check{\underline{c}}_0^* & \hat{\underline{c}}_0^* \\ \check{\underline{c}}^* & \hat{\underline{c}}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{c}_0^* \\ \underline{c}^* \end{bmatrix} \quad \dots (17)$$

حيث:

$$\check{\underline{c}}_0^* = (s_{0a}^+ z_a), (a = 1, \dots, n), \hat{\underline{c}}_0^* = (s_{0a}^+ z_a), (a = n+1, \dots, m), \check{\underline{c}}^* = (s_{ia}^+ z_a), (i, a = 1, \dots, n)$$

$$\hat{\underline{c}}^* = (s_{ia}^+ z_a) (i = 1, \dots, n; a = n+1, \dots, m), \underline{c}_0^* = (s_{0a}^+ z_a), (a = 1, \dots, m),$$

$$\underline{c}^* = (s_{ia}^+ z_a), (i = 1, \dots, n; a = 1, \dots, m),$$

يمكن كتابة المتجه \underline{z}_a بالشكل:

$$\underline{z}_a = \sum_{i=0}^n s_{ia}^+ z_a$$

ومنه نجد من أجل المصفوفة:

$$\underline{Z} = (\underline{J}^*)^T \underline{1}_{n+1}$$

حيث $\underline{1}_{n+1}$ هي مصفوفة عمود من المرتبة $[(n+1) \times 1]$ ، جميع عناصرها تأخذ القيمة الواحدة وإذا استخدمنا الرمز $\underline{R} = (R_1, \dots, R_m)^T$ فإن العلاقة (13) تكتب بالشكل:

$$I^T \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{R} \end{bmatrix} + \underline{J}^T \underline{1}_{n+1} = -\underline{Z} \quad (18)$$

وباستخدام فالصيغة تأخذ الشكل:

$$I^T \begin{bmatrix} 0 \\ \underline{R} \end{bmatrix} + (\underline{J} + \underline{J}^*)^T \underline{1}_{n+1} = \underline{0}_{m \times 1} \quad \dots (19)$$

وبضرب طرفي العلاقة (19) من اليسار بـ $\underline{\psi}^T$ نجد:

$$\underline{\psi}^T I^T = (-1_n, \underline{E}_n) \quad \dots (20)$$

فتصبح العلاقة بالشكل:

$$\underline{R} = -\underline{\psi}^T (\underline{J} + \underline{J}^*)^T \underline{1}_{n+1} \quad \dots (21)$$

تعرف الصيغة (21) نصف القطر المتجهي $R_i (i=1, 2, \dots, n)$ للنقاط C_i المثبتة من الأجسام بالنسبة للجملة الإحداثية المطلقة من خلال المتجهات المفصلية وبالتالي من خلال الإحداثيات المعممة ويمكن ودون المس بعمومية المسألة وضع $C_0 = C_1$ وعندئذ $C_{01} = 0$ ونختار للجسم الخاص (المميز) الرمز R_{i^*} وبالتالي:

$$R_{i^*} = \sum_{i=1}^{i^*} z_i + \sum_{i=1}^{i^*-1} (c_{i,i+1} - c_{ii}). \quad \dots (22)$$

تعتبر العبارة الأخيرة عن نصف القطر المتجهي للنقطة C_i^* من الجسم الخاص بالنسبة للجملة الإحداثية المطلقة [6]. وإذا أخذنا بعين الاعتبار ان المتجهات C_{ia} من أجل الآلتين ذاتها تماماً ويعود الفرق في المواضع للقيم المختلفة للمتجهات Z_a (لحالة Z_a^r) لحالة المفاصل الدورانية و Z_a لحالة المفاصل عالية المرونة (فيمكننا كتابة (22) بالشكل:

$$\Delta R_i^* = \sum_{i=1}^{i^*} \Delta z_i \quad \dots(23)$$

وهي تعبر عن انزياح النقطة الخاصة (المميز).

لنطبق ما سبق على آلة الخماسية المعدلة فنجد:

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} c_{01} & 0 & c_{03} & 0 & 0 \\ -c_{11} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -c_{22} & 0 & 0 & c_{25} \\ 0 & 0 & -c_{33} & c_{34} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -c_{44} & -c_{45} \end{bmatrix}$$

وكذلك المصفوفة:

$$\underline{J}^* = \begin{bmatrix} z_1 & 0 & z_3 & 0 & 0 \\ 0 & z_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & z_5 \\ 0 & 0 & 0 & z_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

وبالتالي تكون مصفوفة أنصاف الأقطار المتجهية هي:

$$\underline{R} = - \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} z_1 + c_{01} - c_{11} \\ z_2 + c_{12} - c_{22} \\ z_3 + c_{03} - c_{33} \\ z_4 + c_{34} - c_{44} \\ z_5 + c_{25} - c_{45} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 + c_{01} - c_{11} \\ z_1 + z_2 + c_{01} + c_{12} - c_{11} - c_{22} \\ z_3 + c_{03} - c_{33} \\ z_3 + z_4 + c_{03} + c_{34} - c_{33} - c_{44} \end{bmatrix} \dots (24)$$

وتملك النقطة المميزة N الواقعة في نهاية النواس نصف القطر المتجهي التالي:

$$R_N = R_2 + he_1^{(2)}$$

ویمفاضلة العلاقة الأخيرة وأخذ (24) بعين الاعتبار نجد:

$$\Delta R_N = \Delta R_2 = \Delta Z_1 + \Delta Z_2$$

-دراسة حركة النواس في هذه الآلة.

إن النواس يملك حركتين:

-الحركة الأولى: نسبية (دورانية حول المحور OZ المعامد لمستوي الحركة) وسيط

حركتها زاوية دوران $\hat{\theta}$

-الحركة الثانية: حركة جرية بالنسبة لضلع r_3 ، فنتعين بمعرفة احداثيات نقطة

منها ولتكن N (نقطة نهاية النواس) نسقطها على جملة متماسكة مع ضلع r_3

حيث أن $\vec{e}_1^{(2)}$ ينطبق على الضلع r_3 ويكون $\vec{e}_2^{(2)}$ عمودياً عليه في A ولتكن

النقطة P نقطة تعليق النواس تبعد عن النقطة A بمقدار $\frac{r_3}{2}$ فيكون:

$$\vec{AN} = (\frac{r_3}{2} + L \sin \theta) \vec{i} - L \cos \theta \vec{j}$$

وبما أنو طول خيط النواس L ثابت فيوجد وسيط وحيد لحركة النواس هو زاوية

الدوران θ ، لنربط حركة النواس المطلقة بالجملة الثابتة اعتماداً على مفهوم مصفوفة

أنصاف الأقطار المتجهية (حيث أن معرفة نصف القطر المتجهي لمبدأ أي جملة

يحولنا بتعيين أي نقطة اختيارية من الجسم الموافق) لنأخذ النقطة (N) :

$$\begin{aligned}\overline{ON} &= R_2 + (AP + PN) \\ &= R_2 + \left(\frac{r_3}{2} + L \sin \theta\right) e_1^{(2)} - L \cos \theta e_2^{(2)}\end{aligned}$$

لنوجد الآن سرعة نواس اعتماد على تركيب الحركات بالشكل:

$$\vec{V}_a(N) = \vec{V}_r(N) + \vec{V}_e(N)$$

حيث $\vec{V}_e(N)$ سرعة جزئية

$\vec{V}_r(N)$ سرعة نسبية و تعطى بالعلاقة:

$$\vec{V}_r(N) = \frac{d}{dt} \vec{AN}$$

$$\vec{AN} = \left(\frac{r_3}{2} + L \sin \theta\right) \vec{i} - L \cos \theta \vec{j}$$

$$\Rightarrow \vec{V}_r(N) = L \dot{\theta} \cos \theta \vec{i} + L \dot{\theta} \sin \theta \vec{j} \quad \dots (12)$$

أما $\vec{V}_e(N)$ فهي السرعة الجرية للنقطة N وتعطى بالعلاقة:

$$\vec{V}_e(N) = \frac{d}{dt} \vec{ON}$$

$$\begin{aligned}\vec{ON} &= R_2 + \left[\frac{r_3}{2} \cos(q_1 + q_2) + L \cos(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{i} \\ &+ \left[\frac{r_3}{2} \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{j} \\ \vec{ON} &= Z_1 + Z_2 + \left[\frac{r_3}{2} \cos(q_1 + q_2) + L \cos(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{i} \\ &+ \left[\frac{r_3}{2} \sin(q_1 + q_2) + L \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{j} \\ \vec{V}_e(N) &= \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 - \left[\frac{r_3}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) + L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \sin(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{i} \\ &+ \left[\frac{r_3}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) + L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_1 + q_2 + \theta) \right] \vec{j} \quad \dots (13)\end{aligned}$$

بالاستفادة من العلاقتين (13)، (12) نجد أن:

$$\begin{aligned}\vec{V}_a(N) &= \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 - \left[\frac{r_3}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_1 + q_2) + L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \sin(q_1 + q_2 + \theta) + L\dot{\theta} \cos \theta \right] \vec{i} \\ &+ \left[\frac{r_3}{2} (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \cos(q_1 + q_2) + L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta}) \cos(q_1 + q_2 + \theta) + L\dot{\theta} \sin \theta \right] \vec{j}\end{aligned}$$

عندئذ يكون تسارع النواس:

$$\vec{\Gamma}_a(N) = \vec{\Gamma}_e(N) + \vec{\Gamma}_r(N)$$

التسارع النسبي هو:

$$\vec{\Gamma}_r(N) = \frac{d}{dt} \vec{V}_r(N)$$

$$\vec{\Gamma}_r(N) = (L\ddot{\theta} \cos \theta - L\dot{\theta}^2 \sin \theta) \vec{i} + (L\ddot{\theta} \sin \theta + L\dot{\theta}^2 \cos \theta) \vec{j}$$

أما التسارع الجري فيعطى بالعلاقة:

$$\vec{\Gamma}_e(N) = \frac{d}{dt} \vec{V}_e(N)$$

$$\vec{\Gamma}_e(N) = \ddot{Z}_1 + \ddot{Z}_2 - \left[\begin{array}{l} \frac{r_3}{2}(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2)\sin(q_1 + q_2) + \frac{r_3}{2}(q_1 + q_2)^2 \cos(q_1 + q_2) + \\ L(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{\theta})\sin(q_1 + q_2 + \theta) + L(q_1 + q_2 + \theta)^2 \\ \cos(q_1 + q_2 + \theta) + L\ddot{\theta}\cos\theta - L\dot{\theta}^2 \sin\theta \end{array} \right] \vec{i}$$

$$+ \left[\begin{array}{l} \frac{r_3}{2}(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2)\cos(q_1 + q_2) - \frac{r_3}{2}(q_1 + q_2)^2 \sin(q_1 + q_2) \\ + L(\ddot{q}_1 + \ddot{q}_2 + \ddot{\theta})\cos(q_1 + q_2 + \theta) - L(\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{\theta})^2 \\ \sin(q_1 + q_2 + \theta) + L\ddot{\theta}\sin\theta + L\dot{\theta}^2 \cos\theta \end{array} \right] \vec{j}$$

4-النتائج ومناقشتها:

أوجدنا في هذا العمل المعادلات التفاضلية للآلة الخماسية المعدلة كما قمنا بدراسة حركة النواس وربط حركته بهذه الآلة.

5-الاستنتاجات والتوصيات:

-دراسة حركة نواس معلق على آلة سداسية وإيجاد المعادلات التفاضلية لحركة هذه الآلة.

-إيجاد المعادلات التفاضلية لحركة آلة سباعية معدلة ومضاعفة.

6-المراجع:

- 1.BAKER, L, 2000- Chancellor Bacon, Introduction to Western Humanities, English Dept., Kansas State University, USA, 233p.
- 2.BECKETT, E, 1874- A Rudimentary Treatise on Clocks and Watches and Bells. 6th Ed, Britain, 50p.
3. GRAHAM, G, 1726- A contrivance to avoid irregularities in a clock's motion occasion'd by the action of heat

and cold upon the rod of the pendulum. Philosophical Transactions of the Royal Society, Britain, 34, (398–392)p.

4. TOBIN, W, 2003- The Life and Science of Leon Foucault: The man who proved the Earth rotates, UK: Cambridge University Press, (148–149)p.

5.SALEM, S,2019– Accurate, Analysis of Double Ten Bar Mechanism Linked by one joint, Homs University Journal,Vol.3, 14p.

(In Arabic المرجع)

6.HASAN, M, 2012–Accuracy of M.P.S ,with super elastic hinges, Generated by 5–bar Mechanism (Second Case–the link with one joint), Homs University Journal, Vol.34, 27p.

(In Arabic المرجع)

تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية على الطيف الذري لذرتي الهيدروجين والليثيوم

قسم الفيزياء – كلية العلوم – جامعة حمص

إشراف: أ.د.حسن المقدم

تقديم الطالب: عمر سلهب

الملخص:

يهدف البحث إلى دراسة تجاوبات الطيف الذري للهيدروجين والليثيوم بتطبيق حقول كهربائية ومغناطيسية متعامدة، حيث تم تحليل تأثيرات الحقول على مستويات الطاقة الإلكترونية للذرات، مع التركيز على الانقسامات والانزياحات الطيفية الناتجة عن تأثير ستارك وزيمان. تم الاعتماد على النظرية الكمية لفهم كيفية تفاعل الحقول مع العزم المغناطيسي للإلكترونات وإجراء مقارنة بين ذرتي الهيدروجين والليثيوم من حيث الانزياحات الطاقية والخطوط الطيفية والتصحيحات من الدرجة الأولى والثانية المرافقة

الكلمات المفتاحية: الطيف الذري، تأثير ستارك، تأثير زيمان، الانزياحات الطيفية، مستويات الطاقة الإلكترونية، التأثيرات الكمومية

Effect of electric and magnetic fields at atomic spectra for Hydrogen and lithium atoms

Abstract:

This research aims to study the atomic spectral resonance of hydrogen and lithium under the influence of perpendicular electric and magnetic fields.

The effects of the fields on the atomic electronic energy levels were analyzed, focusing on the spectral splitting and shifts resulting from the Stark and Zeeman effects.

Quantum theory was used to understand how the fields interact with the magnetic moment of electrons, and a comparison was made between hydrogen and lithium atoms in terms of energy shifts, spectral lines, and associated first- and second-order corrections.

Keywords: Atomic spectrum, Stark effect, Zeeman effect, spectral shifts, electronic energy levels, quantum effects.

1. مقدمة :

يُعتبر دراسة الطيف الذري من الأدوات الأساسية في فهم التركيب الإلكتروني للذرات والتفاعلات التي تحدث عند تعرضها لحقول خارجية حيث تُظهر الذرات، (مثل الهيدروجين والليثيوم) سلوكًا طيفيًا مميزًا عند تعريضها لحقول كهربائية ومغناطيسية، مما يوفر رؤى عميقة حول تأثيرات هذه الحقول على مستويات الطاقة الإلكترونية تُعرف هذه الظواهر بتأثير ستارك في حالة الحقل الكهربائي، وزيمان في حالة الحقل المغناطيسي.

عند تطبيق حقل كهربائي ومغناطيسي متعامدين على ذرة مثل الهيدروجين أو الليثيوم، تتفاعل الحقول مع العزم المغناطيسي للإلكترونات وتؤدي إلى انزياحات وانقسامات في مستويات الطاقة، هذه التفاعلات تُظهر تغيرات واضحة في الخطوط الطيفية، والتي يمكن قياسها وتحليلها لفهم الخصائص الكمية للذرة.

في هذه الدراسة، تمّ استعراض تجاوبات الطيف الذري للهيدروجين والليثيوم في وجود حقليْن كهربائي ومغناطيسي متعامدين، تمّ التركيز على كيفية تأثير هذه الحقول على مستويات الطاقة الإلكترونية، وكيفية تفسير الانزياحات الطيفية الناتجة باستخدام النظريات الكمية، وتمت المقارنة بين سلوك ذرة الهيدروجين التي تُعتبر أبسط الذرات وذرة الليثيوم التي تحتوي على إلكترونات أكثر وتعقيدات إضافية بسبب تأثيرات الحجب والتأثير بين الإلكترونات.

من خلال هذه الدراسة نهدف إلى فهم أعمق لتأثيرات الحقول الخارجية على الطيف الذري، وتقديم رؤى جديدة حول الخصائص الكمية للذرات في ظل ظروف مختلفة، هذا الفهم ليس فقط ذا أهمية أكاديمية، بل له تطبيقات عملية في مجالات مثل الفيزياء الذرية والليزر والتحليل الطيفي.

2. هدف البحث:

- دراسة تجاوبات الطيف الذري للهيدروجين والليثيوم في وجود حقليين كهربائي ومغناطيسي متعامدين، حيث يتم تحليل تأثيرات الحقول الخارجية على مستويات الطاقة الإلكترونية للذرات، مع التركيز على الانزياحات الطيفية الناتجة عن تأثير ستارك وتأثير زيمان
- الاعتماد على النظرية الكمية لفهم كيفية تفاعل الحقول مع العزم المغناطيسي للإلكترونات، وكيف تؤدي هذه التفاعلات لحدوث انقسامات وانزياحات في الخطوط الطيفية
- مقارنة سلوك ذرة الهيدروجين مع ذرة الليثيوم
- تعميق فهم تأثيرات الحقول الخارجية على الطيف الذري، وفتح آفاق جديدة للتطبيقات العملية في مجالات مختلفة.

3. مواد وطرائق البحث:

تم استخدام جهاز حاسوب مجهز ببرمجيات متخصصة (MATLAB) لإجراء الحسابات الرياضية، تحليل البيانات، ورسم الخطوط البيانية، كما تم الاعتماد على أدوات نظرية ومراجع علمية لتطوير النماذج الرياضية وتحليل النتائج.

4. ذرتي الهيدروجين والليثيوم في الحقول المتعامدة

ا. ذرة الهيدروجين في حقول متعامدة:

1.4 الهاملتوني لذرة الهيدروجين في الحقول الكهربائية والمغناطيسية:

يعطى الهاملتوني لذرة الهيدروجين تأثير حقول كهربائية ومغناطيسية متعامدة بالعلاقة

$$H = H_0 + H_E + H_B \quad (1)$$

H_0 الهاملتوني التقليدي لذرة الهيدروجين بدون حقول خارجية.

H_E التأثير الناجم عن الحقل الكهربائي.

H_B التأثير الناجم عن الحقل المغناطيسي.

هاملتوني ذرة الهيدروجين في غياب الحقول الخارجية H_0 [1]

$$H_0 = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (2)$$

2.4 تأثير ستارك في الهيدروجين (تأثير الحقل الكهربائي H_E):

عندما يتم تطبيق حقل كهربائي خارجي فإنه يؤثر على الإلكترون داخل الذرة لنفترض أن الحقل الكهربائي يطبق على طول المحور z ، وقيمته E_z يضاف التأثير الناجم عن الحقل الكهربائي إلى الهاملتوني كطاقة تفاعل بين العزم الكهربائي للإلكترون والحقل الكهربائي:

$$H_E = -eE_z \cdot z \quad (3)$$

E_z شدة الحقل الكهربائي المطبق على طول المحور .

هذا التأثير يغير طاقة الإلكترونات بناءً على مواقعها في الحقل الكهربائي [2] .

3.4 تأثير زيمان في الهيدروجين (تأثير الحقل المغناطيسي H_B):

بتطبيق الحقل المغناطيسي على الذرة وفق المحور x يتأثر الإلكترون بقوة لورنتز مما يضيف حد إضافي للهاملتوني ،ويمكن التعبير عنه من خلال التفاعل بين العزم الزاوي للإلكترون والحقل المغناطيسي:

$$H_B = \frac{e}{2m_e} B_x \cdot (r \times p) = -\mu \cdot B_x \quad (4)$$

p كمية حركة الإلكترون.

μ العزم المغناطيسي المداري الناتج عن حركة الإلكترون في المدار. هذا التفاعل يسبب تغيرات في مستويات الطاقة الذرية لذرة الهيدروجين بسبب التأثيرات المغناطيسية [3].

وبالتالي يصبح الشكل النهائي للهاملتوني بعد إضافة التأثيرات الكهربائية والمغناطيسية

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} - eE_z \cdot z + \frac{e}{2m_e} B_x \cdot (r \times p) \quad (5)$$

• تأثير زيمان الشاذ والانقسامات الطاقية

عندما يتم أخذ العزم المغزلي للإلكترون S في الاعتبار، فإن الانقسام في مستويات الطاقة يعتمد على كل من العزم الزاوي المداري L والعزم المغزلي S ، ويُعرف باسم تأثير زيمان الشاذ. ويعطى تصحيح الطاقة لتأثير زيمان الشاذ يُعطى بالعلاقة:

$$E_Z = g_J m_J \mu_B B_x \quad (6)$$

حيث:

g_J عامل لانندو، الذي يعتمد على كل من العزم المداري والمغزلي.

m_J الإسقاط المغناطيسي للعزم الزاوي الكلي J على اتجاه الحقل المغناطيسي.

ومن أجل حقول مغناطيسية أكبر من 20 تسلا يحدث فك ارتباط بين العزم الزاوي

المداري و السبيني وهو ما يدعى بمفعول باشن- باخ

• الانتقالات المسموحة (قواعد الاصطفاء):

بالنسبة للانتقالات الناتجة عن تأثير زيمان، فإنها تخضع لقواعد الاصطفاء وهي:

• $\Delta m_j = 0$ الانتقال الطيفي يسمى "خط π "

• $\Delta m_j = \pm 1$ الانتقال الطيفي يسمى "خطوط σ "

حيث أن تأثير زيمان يؤدي إلى انقسام مستويات الطاقة الكمية عند تطبيق حقل مغناطيسي خارجي، وهذا ما يؤدي إلى تغييرات في طاقة الذرة والتي تؤدي إلى انبعاث أو امتصاص فوتونات ذات أطوال موجية محددة، الانقسامات تعتمد على قيم العزم الزاوي الكلي والمغناطيسي، وشدة الحقل المغناطيسي

II. ذرة الليثيوم في الحقول المتعامدة:

4.4 هاملتوني ذرة الليثيوم في الحقول الكهربائية والمغناطيسية

الهاملتوني لذرة الليثيوم في وجود حقول كهربائية ومغناطيسية متعامدة

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}_E + \hat{H}_B \quad (7)$$

يعطى الهاملتوني الخاص لذرة الليثيوم يُعطى بالعلاقة:

$$\hat{H}_0 = \sum_{i=1}^3 \left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_i^2 - \frac{Z_{eff} e^2}{4\pi\epsilon_0 r_i} \right) + \sum_{i < j} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} \quad (8)$$

∇_i^2 هو لابلاسيان يمثل حركة الإلكترون i .

r_i هو المسافة بين الإلكترون i والنواة.

r_{ij} هو المسافة بين الإلكترونين i و j .

Z_{eff} العدد الذري لليثيوم ($Z_{eff} = 1.3$) [4].

5.4 تأثير ستارك في الليثيوم (تأثير الحقل الكهربائي) (\hat{H}_E) :

عندما يتم تطبيق حقل كهربائي خارجي، فإنه يؤثر على الإلكترونات داخل الذرة، لنفترض أن الحقل الكهربائي يطبق على طول المحور z ، وقيمه E_z التأثير الناجم عن الحقل الكهربائي يضاف إلى الهاملتوني كطاقة تفاعل بين العزم الكهربائي للإلكترون والحقل الكهربائي:

$$\hat{H}_E = - \sum_{i=1}^3 e \mathbf{E}_z \cdot \mathbf{r}_i \quad (9)$$

يؤدي هذا إلى تغير طاقة الإلكترونات بناءً على مواضعها في الحقل الكهربائي [2].

6.4 تأثير زيمان في الليثيوم (تأثير الحقل المغناطيسي) (\hat{H}_B) :

بتطبيق الحقل المغناطيسي على الذرة وفق المحور x يتأثر الإلكترون بقوة لورنتز مما يضيف حد إضافي للهاملتوني، ويمكن التعبير عنه من خلال التفاعل بين العزم الزاوي للإلكترون والحقل المغناطيسي:

$$\hat{H}_B = \sum_{i=1}^3 \frac{e}{2m_e} \mathbf{B}_x (\mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i) \quad (10)$$

$\mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i$ عزم الاندفاع الزاوي للإلكترون i بسبب حركته في المدار. هذا التفاعل يسبب تغيرات في مستويات الطاقة الذرية لذرة الليثيوم [3].

الشكل النهائي للهاملتوني:

$$\begin{aligned} \hat{H} = & \sum_{i=1}^3 \left(-\frac{\hbar^2}{2m_e} \nabla_i^2 - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r_i} \right) + \sum_{i<j} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ij}} - \sum_{i=1}^3 e \mathbf{E}_z \cdot \mathbf{r}_i \\ & + \sum_{i=1}^3 \frac{e}{2m_e} \mathbf{B}_x (\mathbf{r}_i \times \mathbf{p}_i) \quad (11) \end{aligned}$$

تؤدي الحقول الكهربائية والمغناطيسية المتعامدة إلى تغيرات في مستويات الطاقة الذرية لذرة الليثيوم، مما يؤدي إلى انقسامات طيفية معقدة، هذه التأثيرات تُستخدم في دراسة الخصائص الكمومية للذرات وتطبيقاتها في مجالات مثل البصريات الكمومية والتحكم الكمومي [5].

6.4 نظرية الاضطراب:

من أجل الأنظمة الذرية مثل ذرتي الهيدروجين والليثيوم تحت تأثير الحقول الخارجية، لا يمكن دائماً الحصول على حلول دقيقة لمعادلة شرودنغر لذا نستخدم نظرية الاضطراب لحساب تصحيحات لمستويات الطاقة بسبب تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية المتعامدة.

تُستخدم نظرية الاضطراب عند وجود هاميلتوني للمنظومة يمكن التعبير عنه كهاملتوني غير مضطرب (\hat{H}_0) مع تصحيحات صغيرة للاضطراب الأول والثاني ناتجة عن الحقول الخارجية (\hat{H}_{pert}) [6] على النحو التالي:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \lambda \hat{H}_{\text{pert}} \quad (12)$$

λ هو معامل صغير يمثل قوة الاضطراب.

\hat{H}_{pert} يمثل تأثير الحقول الخارجية، مثل الحقل المغناطيسي من تأثير زيمان والحقل الكهربائي من تأثير ستارك

• نظرية الاضطراب وتأثير زيمان

تعطى المعادلة العامة للطاقة المضطربة حيث أن الهاملتوني الكلي يتكون من الهاملتوني غير المضطرب (\hat{H}_0) والاضطراب الناتج عن الحقل المغناطيسي (\hat{H}'):

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}' \quad (13)$$

حيث

$$\hat{H}' = -\mu \cdot B \quad (14)$$

الحدود الأولى للطاقة ($E^{(1)}$):

يُحسب الحد الأول للطاقة عبر أخذ متوسط قيمة \hat{H}' في الحالة الذاتية غير المضطربة:

$$E^{(1)} = \langle \psi_n^{(0)} | \hat{H}' | \psi_n^{(0)} \rangle \quad (15)$$

وبافتراض أن الحقل المغناطيسي موجه على طول المحور z ($\mathbf{B} = B_x \hat{x}$) ، وبالتالي يصبح الاضطراب:

$$\hat{H}' = g\mu_B \frac{B_x J_x}{\hbar} \quad (16)$$

الحالة الذاتية غير المضطربة $\psi_n^{(0)}$ تكون أيضاً ذاتية لـ J_z مع القيمة الذاتية:

$$J_x | \psi_n^{(0)} \rangle = m_j \hbar | \psi_n^{(0)} \rangle \quad (17)$$

لذا:

$$E^{(1)} = g\mu_B B_x m_j \quad (18)$$

: الحدود الثانية للطاقة ($E^{(2)}$)

يُحسب الحد الثاني للطاقة كالتالي:

$$E^{(2)} = \sum_{m \neq n} \frac{|\langle \psi_m^{(0)} | \hat{H}' | \psi_n^{(0)} \rangle|^2}{E_n^{(0)} - E_m^{(0)}} \quad (19)$$

لأن \hat{H}' في تأثير زيمان يعتمد خطياً على \mathbf{B} ، وبالتالي لا يسبب انتقالاً بين الحالات المختلفة غير المضطربة ($m \neq n$) في الأنظمة ذات التقارن البسيط. لذلك ، غالباً $E^{(2)} = 0$ ، باستثناء حالات خاصة تعتمد على تعقيد البنية الطيفية

حيث تكون عناصر مصفوفة الاضطراب

$$\langle n, l, m_l, m_s | H_{\text{Zeeman}} | n, l, m_l, m_s \rangle$$

• نظرية الاضطراب و تأثير ستارك:

الهاملتوني الكلي يتكون من:

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}' \quad (20)$$

الحدود الأولى للطاقة ($E^{(1)}$) :

الحد الأول يُحسب عبر أخذ متوسط \hat{H}' في الحالة الذاتية غير المضطربة:

$$E^{(1)} = \langle \psi_n^{(0)} | -p \cdot E | \psi_n^{(0)} \rangle \quad (21)$$

إذا كانت الحالة متناظرة مركزيًا (مثل حالات s في الذرة الهيدروجينية) :

التوزيع الشحني متجانس حول النواة.

العزم ثنائي القطب المتوسط يساوي صفرًا:

$$E^{(1)} = 0$$

إذا كانت الحالة غير متناظرة (مثل حالات p أو حالات جزيئية):

يمكن أن يكون:

$$E^{(1)} \neq 0$$

الحدود الثانية للطاقة ($E^{(2)}$) :

التصحيح الثاني للطاقة يعتمد على التداخل بين الحالة $\psi_n^{(0)}$ والحالات الأخرى $\psi_m^{(0)}$:

$$E^{(2)} = \sum_{m \neq n} \frac{|\langle \psi_m^{(0)} | -p \cdot E | \psi_n^{(0)} \rangle|^2}{E_n^{(0)} - E_m^{(0)}} \quad (22)$$

حيث يمكن القول بأن:

تأثير ستارك يعتمد على التفاعلات بين الحالات المختلفة.

إنَّ الحقل الكهربائي E يمكن أن يمزج الحالات الذاتية، مما يؤدي إلى تصحيح في

الطاقة وذلك بالاعتماد على:

• شدة الحقل الكهربائي E

• الاختلافات الطاقية $E_n^{(0)} - E_m^{(0)}$

• تداخل الدوال الموجية $\langle \psi_m^{(0)} | -p \cdot E | \psi_n^{(0)} \rangle$

حيث تكون عناصر مصفوفة الاضطراب بشكلها العام كالتالي:

$$\langle n', l', m' | -ezE | n, l, m \rangle \quad (23)$$

وتحدد قيم البارامترات في المصفوفة وفقاً لكل حالة
فمثلاً صياغة مصفوفة الاضطراب للانتقال من $n = 1$ السوية الأساسية الأولى إلى
 $n = 2$ السوية الأساسية الثانية:

$$H'_{12} = \langle \psi_1^{(0)} | H' | \psi_2^{(0)} \rangle \quad (24)$$

• عند تأثير ستارك:

$$H' = -eEz$$

في اتجاه المحور z ، وبالتالي:

$$H'_{12} = -eE \langle \psi_1^{(0)} | z | \psi_2^{(0)} \rangle \quad (25)$$

• عند تأثير زيمان:

$$H' = \mu_B (L_x + g S_x) B \quad (26)$$

وبالتالي:

$$H'_{12} = \mu_B B \langle \psi_1^{(0)} | (L_z + g S_z) | \psi_2^{(0)} \rangle \quad (27)$$

كانت قيمة السوية الأساسية ($n = 1, l = 0$) للطاقة غير المضطربة:

$$E_1^{(0)} = -13.6 \text{ eV}$$

بينما السوية الثانية ($n = 2, l = 1$) كانت:

$$E_2^{(0)} = -3.40 \text{ eV}$$

إذن مصفوفة الاضطراب لهذه الحالة تأخذ الشكل العام:

$$H' = \begin{bmatrix} \langle 1s | H' | 1s \rangle & \langle 1s | H' | 2p \rangle \\ \langle 2p | H' | 1s \rangle & \langle 2p | H' | 2p \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta E_1 & H'_{12} \\ H'_{21} & \Delta E_2 \end{bmatrix} \quad (28)$$

5. النتائج والحسابات

تعتمد قيمة الطاقة الكلية E_{Total} للمنظومة المدروسة على الطاقة الأساسية للمنظومة بالإضافة إلى الطاقات الناتجة عن تأثير الحقول المتعامدة وتصحيحات الاضطراب وفق المعادلة التالية

$$E_{Total} = E_{n0} + E_{n1} + E_{n2} + \Delta E_{Stark} + \Delta E_{Zeeman} \quad (29)$$

وعند اجراء الحسابات وفق برنامج matlab كانت واجهة التشغيل كالتالي:

```
1 clc; clear;
2 % --- الكود الأول: تعريف المعطيات ---
3 n = [1; 1; 2; 2; 2; 2; 3; 3; 3; 3; 3; 3; 4; 4; 4; 4; 4; 4; 5; 5; 5; 5; 5; 5];
4 mj = [ 0.5; -0.5; 0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 2.5; -2.5;
5       0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 2.5; -2.5; 0.5; -0.5; 1.5; -1.5; 2.5; -2.5];
6 En0 = -13.6 ./ (n.^2); % eV
7 eC = 1.602176634e-19; % C
8 a0 = 5.29177210903e-11; % m
9 muB = 5.7883818e-5; % eV/T
10 E_field = 1e6; % V/m
11 B_field = 1; % Tesla
12 l = 1; s = 0.5;
13 g_j = 1 + ( (mj.^2) + s*(s+1) - l*(l+1) ) ./ (2*(mj.^2));
14 % الرتبة الأولى
15 En1_E = eC * E_field .* (1.5 .* (n.^2) .* a0) / eC; % eV
16 En1_B = muB .* g_j .* mj .* B_field; % eV
17 % الرتبة الثانية
18 energy_gap = 13.6 * (1./(n.^2) - 1./((n+1).^2));
19 delta_z = (1.5 .* (n.^2) .* a0);
20 En2_E = ((eC * E_field .* delta_z / eC).^2) ./ energy_gap;
21 En2_B = ((muB .* g_j .* mj .* B_field).^2) ./ energy_gap;
22 En1 = En1_E + En1_B;
23 En2 = En2_E + En2_B;
24 % --- الكود الثالث: ستارك وزيمان ---
25 alpha_n = 1.5 .* (n.^4) .* (a0^3); % m^3
26 alpha_eV = alpha_n / eC; % eV/(V/m)^2
27 DeltaE_Stark = -0.5 .* alpha_eV .* (E_field.^2);
28 DeltaE_Zeeman = muB .* g_j .* mj .* B_field;
29 % --- الكود الرابع: الطاقة الكلية ---
30 E_total_plus = En0 + En1 + En2 + DeltaE_Stark + abs(DeltaE_Zeeman);
31 E_total_minus = En0 + En1 + En2 + DeltaE_Stark - abs(DeltaE_Zeeman);
32 % عرض النتائج
33 fprintf(' n      mj      E_total_minus (eV)      E_total_plus (eV)\n');
34 for i = 1:length(n)
35     fprintf('%2d      %0.1f      %14.8f      %14.8f\n', ...
36           n(i), mj(i), E_total_minus(i), E_total_plus(i));
37 end
```

1.5 دراسة تغيرات الطاقة لذرة الهيدروجين من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته

$B = 1T$ وحقول كهربائية متغيرة الشدة:

قمنا بدراسة تغييرات الطاقة الكلية من أجل قيمة ثابتة للحقل المغناطيسي مقابل قيم متغيرة للحقل الكهربائي وذلك لتحديد التغييرات الطاقية للسويات

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^6 \text{V/m}$

كانت النتائج حسابات الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب وفق الجدول التالي

الجدول(1)الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-10}	-6.2×10^{-12}	-6.24×10^{-5}	$\pm 5.79 \times 10^{-5}$	-13.6001203 إلى -13.6000045
$n = 2$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-10}	-7.49×10^{-11}	-7.49×10^{-5}	$\pm 1.16 \times 10^{-4}$	-3.4001909 إلى -3.3999589
$n = 3$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-9}	-8.74×10^{-11}	-8.74×10^{-5}	$\pm 1.85 \times 10^{-4}$	-1.5102724 إلى -1.5099024
$n = 4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-9}	-9.99×10^{-11}	-9.99×10^{-5}	$\pm 3.85 \times 10^{-4}$	-0.8504849 إلى -0.8497149
$n = 5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-8}	-1.12×10^{-10}	-1.12×10^{-4}	$\pm 6.16 \times 10^{-4}$	-0.540728 إلى -0.539496

كم هو ملاحظ في هذا الجدول، حيث تمّ حساب عرض مستويات الطاقة المختلفة من $n = 1$ إلى $n = 5$ مع قيم الطاقة غير المضطربة والمصححة وذلك تحت تأثير الحقول الخارجية والتي تبدو تأثيراتها صغيرة.

إنّ تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تكون صغيرة نسبياً، هذا يشير إلى أن الحقول الخارجية المطبقة في هذا الجدول ضعيفة إلى حد ما، مما يؤدي إلى حدوث تغييرات طفيفة في

الطاقة الكلية، ونلاحظ أيضاً أنَّ التصحيحات تتزايد مع زيادة مستوى الطاقة n مما يشير إلى أن المستويات الأعلى أكثر تأثراً بالاضطرابات.

كما ويبين الجدول أن تأثير ستارك صغير للغاية ويظهر انزياح بسيط في مستويات الطاقة نتيجة الحقل الكهربائي، ولكن لا يزال في نطاق غير ملحوظ بشكل كبير.

وكان تأثير زيمان موجود لكنه أيضاً صغير، ويكون ثابت في الحسابات لأن الحقل المغناطيسي المطبق ثابت والقيم الصغيرة تشير إلى أن الحقل المغناطيسي المستخدم هنا ضعيف نسبياً

بعد حساب مجموع هذه التصحيحات، يتضح أن الطاقة الكلية لمستويات الطاقة المختلفة تتغير بشكل طفيف عن الطاقة غير المضطربة، مما يشير إلى أن تأثيرات الحقول الخارجية هنا محدودة

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$

يظهر الجدول التالي الحسابات العددية للطاقة وتصحيحات الاضطراب مع زيادة تأثير الحقل الكهربائي على النظام

الجدول (2) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-10}	-3.425×10^{-10}	-1.56×10^{-3}	$\pm 5.79 \times 10^{-5}$	-13.6016179 إلى -13.6015021
$n = 2$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-10}	-3.511×10^{-9}	-1.87×10^{-3}	$\pm 1.16 \times 10^{-4}$	-3.401986 إلى -3.401754
$n = 3$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-9}	-2.263×10^{-8}	-2.18×10^{-3}	$\pm 1.85 \times 10^{-4}$	-1.512365 إلى -1.511995
$n = 4$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-9}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm 3.85 \times 10^{-4}$	-0.852885 إلى -0.852115

تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية على الطيف الذري لذرتي الهيدروجين والليثيوم

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 5$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-8}	-1.561×10^{-7}	-2.80×10^{-3}	$\pm 6.16 \times 10^{-4}$	-0.543416 إلى -0.542184

كانت تصحيحات الاضطراب من المرتبة الأولى ثابتة بسبب ثبات شدة الحقل المغناطيسي أما الثانية فإنها تتزايد مقارنة بالجدول الأول وهذا يعكس زيادة تأثير الحقل الكهربائي الخارجي، حيث تصبح هذه التصحيحات أكثر وضوحًا.

كما يبين الجدول أن تأثير ستارك قد زاد بشكل ملحوظ، حيث أن الحقل الكهربائي المطبق أصبح أكثر قوة وهذا يسبب انزياحًا أكبر في مستويات الطاقة مع زيادة شدة الحقل، حيث تصبح التصحيحات أكثر وضوحًا، مما يعكس تأثيرًا أكبر على النظام.

بينما تأثير زيمان ما زال ثابتًا كما في الجدول (2)، وبالتالي لم يطرأ أي تغيير على هذا التأثير

أما بالنسبة للطاقة الكلية وبالمقارنة مع الجدول (2)، نجد أن الطاقة الكلية أصبحت أكثر تباعدًا عن الطاقة غير المضطربة وهذا يعكس تأثير الزيادة في الحقل الكهربائي وتزايد تصحيحات الطاقة المتعلقة بتأثير ستارك بينما تأثير زيمان لا يزال صغيرًا نسبيًا لكنه يساهم في التغيرات الكلية.

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^7 \text{ V/m}$

يظهر الجدول التالي الحسابات العددية للطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب والذي يظهر تأثير ستارك لأقصى انحراف له مع زيادة تأثير الحقل الكهربائي على النظام

الجدول (3) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_l	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-10}	-2.06×10^{-8}	-6.24×10^{-3}	$\pm 5.79 \times 10^{-5}$	-13.6062979 إلى -13.6061821
$n = 2$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-10}	-2.31×10^{-7}	-7.49×10^{-3}	$\pm 1.16 \times 10^{-4}$	- 3.407606 إلى -3.407374
$n = 3$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-9}	-6.24×10^{-7}	-8.74×10^{-3}	$\pm 1.85 \times 10^{-4}$	-1.518925 إلى -1.518555
$n = 4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-9}	-1.31×10^{-6}	-9.99×10^{-3}	$\pm 3.85 \times 10^{-4}$	-0.860375 إلى -0.859605
$n = 5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-8}	-2.18×10^{-6}	-1.12×10^{-2}	$\pm 6.16 \times 10^{-4}$	-0.551816 إلى -0.550584

إن تصحيحات الاضطراب من المرتبة الثانية تزداد بشكل كبير، حيث أن زيادة شدة الحقل الكهربائي تؤثر بشكل أكبر على مستويات الطاقة والتصحيحات تصبح أكبر، خاصة في المستويات العليا مع تزايد قيمة n حيث يكون للنظام استجابة أكبر للحقول الخارجية.

بينما تأثير ستارك قد تضخم بشكل كبير بسبب الزيادة في شدة الحقل الكهربائي والتي تؤدي إلى انزياحات كبيرة في مستويات الطاقة، كلما زادت شدة الحقل وبالتالي زيادة التأثير على الطاقة الكلية، وهذا ما يظهر بوضوح في هذا الجدول حيث انحرفت القيم بشكل أكبر مقارنة بالجدولين السابقين.

أما بالنسبة لتأثير زيمان يبقى كما هو وذلك بسبب ثبات شدة الحقل المغناطيسي المستخدم، وبالتالي يبقى تأثيره على النظام ثابتاً.

أما من أجل الطاقة الكلية كما يتضح في هذا الجدول فإنها تختلف بشكل ملحوظ عن القيم غير المضطربة، بسبب الزيادة الكبيرة في تأثير ستارك وهذا ما تظهره التصحيحات من المرتبتين الأولى والثانية وبالتالي فإن تأثير ستارك يسهم في انزياح أكبر في الطاقة الكلية، مما يعكس تأثير الحقول الكهربائية العالية على النظام الكمومي.

مما تقدم يمكن أن نورد التالي

- يظهر تأثير ستارك بشكل كبير مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، حيث أنه في البداية كان التأثير ضئيلاً لكنه أصبح أكثر وضوحاً في الجدول الثاني، وبلغ أقصى قيمة له في الجدول الثالث عند زيادة شدة الحقل بشكل كبير.
- يبقى تأثير زيمان ثابتاً عبر جميع الجداول لأن الحقل المغناطيسي لم يتغير، هذا يشير إلى أن تأثير الحقل المغناطيسي محدود في هذه الحسابات.
- تزداد تصحيحات الاضطراب مع زيادة شدة الحقل خاصة مع تأثير ستارك، مما يوضح أن الحقول الخارجية تؤثر بشكل أكبر على المستويات العليا للطاقة.
- تتباين الطاقة الكلية بشكل أكبر كلما زادت شدة الحقول، حيث تصبح التصحيحات أكبر وأكثر تأثيراً على المنظومة

باختصار، يمكن ملاحظة أن تأثير الحقول الخارجية وخاصة تأثير ستارك، حيث يلعب دوراً كبيراً في تعديل الطاقة الكلية للمنظومة الكمومية التي تستجيب بشكل أكبر للحقل الكهربائي مع زيادة شدته، في حين يبقى تأثير الحقل المغناطيسي ثابتاً.

2.5 دراسة تغيرات الطاقة لذرة الهيدروجين من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته

$B = 10T$ وحقول كهربائية متغيرة الشدة:

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$

يظهر الجدول التالي الدور الذي يلعبه تأثير زيمان القوي في حسابات الطاقة المكممة والتصحيحات مقابل الدور الضعيف لتأثير ستارك بسبب قيمة الحقل الكهربائي الصغيرة نسبياً

الجدول (4) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-9}	-6.2×10^{-12}	-6.24×10^{-5}	$\pm 5.79 \times 10^{-4}$	-13.6006414 إلى -13.5994834
$n = 2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-9}	-7.49×10^{-11}	-7.49×10^{-5}	$\pm 1.16 \times 10^{-3}$	-3.4012349 إلى -3.3989149
$n = 3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-8}	-8.74×10^{-11}	-8.74×10^{-5}	$\pm 1.85 \times 10^{-3}$	-1.5119374 إلى -1.5082374
$n = 4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-8}	-9.99×10^{-11}	-9.99×10^{-5}	$\pm 3.85 \times 10^{-3}$	-0.8539499 إلى -0.8462499
$n = 5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-7}	-1.12×10^{-10}	-1.12×10^{-4}	$\pm 6.16 \times 10^{-3}$	-0.546272 إلى -0.533952

إنَّ تصحيحات الاضطراب (E_{n1}) أصبحت أكبر بسبب زيادة شدة الحقل المغناطيسي أما (E_{n2}) في هذا الجدول صغيرة جداً مما يشير إلى أن الحقل الكهربائي المطبق ضعيف ولا يسبب اضطراباً كبيراً في النظام و التصحيحات تأخذ قيمة صغيرة متزايدة مع المستويات العليا n .

ولأن الحقل الكهربائي ضعيف فإن تأثير ستارك يبقى بسيطاً، مع انزياحات طفيفة جداً في الطاقة، الانزياح الناتج عن تأثير ستارك لا يزال لا يؤثر بشكل ملحوظ على الطاقة الكلية في هذا الجدول إن الانزياح الحاصل لا يؤثر بشكل ملحوظ على الطاقة الكلية.

وبسبب شدة الحقل المغناطيسي الكبيرة (10) تسلا، تأثير زيمان يبرز بشكل كبير جدًا، يحدث انقسام واضح في مستويات الطاقة بناءً على قيم m_j مستويات الطاقة لكل n تنقسم إلى عدة مستويات فرعية حسب قيمة m_j ، مما يزيد التباين بين الطاقة الكلية والغير مضطربة و هذا التأثير لزيمان يزداد بشكل خطي مع زيادة الحقل المغناطيسي، وبالتالي يؤدي إلى تغيرات ملحوظة في الطاقة الكلية.

أما بالنسبة للطاقة الكلية في هذا الجدول فهي تأتي بشكل أساسي من مفعول زيمان وتظهر انقسامًا واضحًا على مستويات الطاقة الفرعية، مما يعني أن الحقل المغناطيسي هو العامل الأكثر تأثيرًا في هذا الجدول بينما تأثير ستارك ضعيف، وبالتالي لا يضيف تغيرات كبيرة.

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$

يبين الجدول التالي تأثير زيادة شدة الحقل الكهربائي على حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات عند قيمة ثابتة للحقل المغناطيسي المطبق

الجدول (5) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-9}	-3.425×10^{-10}	-1.56×10^{-3}	$\pm 5.79 \times 10^{-4}$	-13.602139 إلى -13.600981
$n = 2$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-9}	-3.511×10^{-9}	-1.87×10^{-3}	$\pm 1.16 \times 10^{-3}$	-3.40303 إلى -3.40071
$n = 3$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-8}	-2.263×10^{-8}	-2.18×10^{-3}	$\pm 1.85 \times 10^{-3}$	-1.51403 إلى -1.51033
$n = 4$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-8}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm 3.85 \times 10^{-3}$	-0.85635 إلى -0.84865
$n = 5$	$\pm 1/2$ $\pm 3/2$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-7}	-1.561×10^{-7}	-2.80×10^{-3}	$\pm 6.16 \times 10^{-3}$	-0.54896 إلى -0.53664

تصححات الاضطراب (E_{n2}) تصبح أكثر وضوحًا مع زيادة شدة الحقل الكهربائي وتأخذ هذه التصحيحات من المرتبة الأولى والثانية قيمًا أكبر قليلًا، خاصة في المستويات العليا للطاقة و هذا يشير إلى تأثير أن النظام بالحقل الكهربائي المطبق.

ومع زيادة شدة الحقل الكهربائي، يظهر تأثير ستارك بوضوح أكبر من خلال الانزياح في مستويات الطاقة مقارنة بالجدول (4)، خاصة في المستويات العليا للطاقة، في حين أن هذا التأثير لا يزال أصغر من تأثير زيمان، إلا أنه بدأ يلعب دورًا ملحوظًا في تعديل الطاقة الكلية.

بينما تأثير زيمان يبقى ثابتًا نظرًا لأن شدة الحقل المغناطيسي لم تتغير، ولكنه لا يزال العامل الأكثر تأثيرًا في التغيير الكلي للطاقة، الانقسام في مستويات الطاقة لا يزال كبيرًا بناءً على قيمة m_j

وفي هذا الجدول الأخير (5)، يتم ملاحظة التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان، مع زيادة الحقل الكهربائي، حيث يؤدي تأثير ستارك إلى انزياح إضافي في الطاقة الكلية، ولكنه لا يزال أقل تأثيرًا من زيمان والطاقة الكلية تظهر انقسامًا واضحًا ناتجًا عن تأثير زيمان، مع تصحيحات إضافية نتيجة تأثير ستارك.

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^7 \text{ V/m}$

يظهر الجدول التالي الدور الذي يلعبه تأثير ستارك مع زيادة شدة الحقل الكهربائي على حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات

الجدول (6) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-13.6	-6.14×10^{-9}	-2.06×10^{-8}	-6.24×10^{-3}	$\pm 5.79 \times 10^{-4}$	-13.606819 إلى -13.605661
$n = 2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.40	-1.63×10^{-9}	-2.31×10^{-7}	-7.49×10^{-3}	$\pm 1.16 \times 10^{-3}$	-3.408865 إلى -3.40633

تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية على الطيف الذري لذرتي الهيدروجين والليثيوم

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 3$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.7×10^{-8}	-6.24×10^{-7}	-8.74×10^{-3}	$\pm 1.85 \times 10^{-3}$	-1.52059 إلى -1.51689
$n = 4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.9×10^{-8}	-1.31×10^{-6}	-9.99×10^{-3}	$\pm 3.85 \times 10^{-3}$	-0.85385 إلى -0.84615
$n = 5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.15×10^{-7}	-2.18×10^{-6}	-1.12×10^{-2}	$\pm 6.16 \times 10^{-3}$	-0.55122 إلى -0.53878

تصححات الاضطراب (E_{n2}) تأخذ قيمة كبيرة نسبياً في هذا الجدول بسبب شدة الحقل الكهربائي العالية، هذه التصحيحات تشير إلى أن النظام أصبح أكثر اضطراباً وتأثراً بالحقول الخارجية و خاصة الحقل الكهربائي.

إن تأثير ستارك مع شدة الحقل الكهربائي الكبيرة، تزداد بشكل كبير ويصبح له دور رئيسي في تعديل مستويات الطاقة والانزياحات الناتجة عن تأثير ستارك في هذا الجدول أصبحت كبيرة بما يكفي لتنافس تأثير زيمان في بعض المستويات ويلاحظ أنه كلما زادت شدة الحقل الكهربائي، يزداد الانزياح الناتج عن تأثير ستارك بشكل غير خطي، خاصة في المستويات العليا للطاقة.

بينما تأثير زيمان يبقى كما هو ثابتاً، نظراً لأن الحقل المغناطيسي لم يتغير 10 تسلا ولا يزال يؤثر بشكل رئيسي على مستويات الطاقة، ولكن تأثير ستارك الآن ينافس تأثير زيمان في تغيير الطاقة الكلية.

أما الطاقة الكلية فإنها تتأثر بشكل كبير بكل من تأثيري ستارك وزيمان، حيث أن شدة الحقل الكهربائي العالية أدت إلى انزياحات كبيرة في الطاقة الكلية، بينما تأثير زيمان يستمر في فرض انقسام كبير في مستويات الطاقة بناءً على m_j والنتيجة هي أن التفاعل بين الحقلين الكهربائي والمغناطيسي يصبح معقداً، و إن تأثير ستارك أصبح له دور كبير في تعديل الطاقة الكلية في المستويات العليا للطاقة.

اعتماداً على ما تقدم يكفي أن نورد الاستنتاجات التالية:

- مع زيادة شدة الحقل المغناطيسي إلى 10 تسلا، يبقى تأثير زيمان هو العامل الأكثر تأثيراً على مستويات الطاقة الكلية في الجداول الثلاثة، الانقسام الناتج عن هذا التأثير واضح ويزداد مع زيادة قيمة n وقيمة m_l تأثير زيمان يؤدي إلى انقسام كبير في مستويات الطاقة، مما يؤثر بشكل كبير على الطاقة الكلية.
- يزداد تأثير ستارك بشكل تدريجي مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، في الجدول الثالث، يصبح تأثير ستارك مهماً للغاية ويبدأ في منافسة تأثير زيمان على الطاقة الكلية، خاصة في المستويات العليا للطاقة، الانزياحات الناتجة عن تأثير ستارك تظهر بوضوح عند شدة الحقل الكهربائي العالية.

التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان هو الذي يحدد الطاقة الكلية للنظام، في الجداول (4) و(5) حيث تأثير زيمان هو المسيطر، بينما في الجدول (6)، خاصة عند شدة الحقل الكهربائي العالية يتداخل تأثير ستارك ويؤثر بشكل كبير على الحسابات النهائية للطاقة الأصلية

3.5 دراسة تغيرات الطاقة من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته $B = 1T$ و حقول كهربائية متغيرة الشدة لذرة الليثيوم:

سنقوم بهذه القسم بدراسة تغييرات الطاقة الكلية من أجل قيمة ثابتة للحقل المغناطيسي ونجعل قيم الحقل الكهربائي متغيرة وذلك من أجل أن نحدد التغييرات الطاقية للسويات

- من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^6 \text{V/m}$

يبين الجدول التالي حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات عند ثبات قيمة الحقل المغناطيسي وتغير طفيف في الحقل الكهربائي

الجدول (7) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-10}	-2.4×10^{-12}	-2.48×10^{-5}	$\pm 7.53 \times 10^{-5}$	-5.3901 إلى -5.3899
$n = 2$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-10}	-6.6×10^{-11}	-6.60×10^{-5}	$\pm 1.51 \times 10^{-4}$	-3.0003 إلى -2.9999
$n = 3$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-9}	-8.74×10^{-11}	-8.74×10^{-5}	$\pm 2.41 \times 10^{-4}$	-1.5104 إلى -1.5099
$n = 4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-9}	-9.99×10^{-11}	-9.99×10^{-5}	$\pm 3.01 \times 10^{-4}$	-0.8505 إلى -0.8497
$n = 5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-8}	-1.12×10^{-10}	-1.12×10^{-4}	$\pm 8.09 \times 10^{-4}$	-0.5409 إلى -0.5393

حيث يتم عرض مستويات الطاقة المختلفة $n = 1$ إلى $n = 5$ ، مع قيم الطاقة غير المضطربة والمصححة تحت تأثير الحقول الصغيرة.

والقيم الغير مضطربة هي الطاقة الأساسية لكل مستوى طاقة وتتناقص كلما زاد رقم المستوى n هذه القيم تعتبر الأساس الذي يتم عليه حساب التأثيرات اللاحقة.

تصحيحات الاضطراب (E_{n2} و E_{n1}) تكون صغيرة نسبياً، هذا يشير إلى أن الحقول الخارجية المطبقة ضعيفة إلى حد ما، مما يؤدي إلى تغيرات طفيفة في الطاقة الكلية أما التصحيحات تتزايد مع زيادة مستوى الطاقة n ، مما يشير إلى أن المستويات الأعلى أكثر تأثراً بالاضطرابات.

يظهر في الجدول (7) أن تأثير ستارك صغير للغاية ويظهر انزياح بسيط في مستويات الطاقة نتيجة الحقل الكهربائي، ولكن لا يزال في نطاق غير ملحوظ بشكل كبير.

بينما تأثير زيمان موجود لكنه صغير، ويكون ثابتاً لأن الحقل المغناطيسي ثابت الشدة

أما الطاقة الكلية بعد حساب مجموع التصحيحات، يتضح أن الطاقة الكلية لمستويات الطاقة المختلفة تتغير بشكل طفيف عن الطاقة غير المضطربة، مما يشير إلى أن تأثيرات الحقول الخارجية هنا محدودة.

من أجل حقل كهربائي شدته $E = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$

يظهر الجدول التالي زيادة في الحقل الكهربائي على النظام والذي ينعكس في حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات الناتجة عن تأثير ستارك

الجدول (8) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-10}	-3.425×10^{-10}	-6.18×10^{-4}	$\pm 7.53 \times 10^{-5}$	-5.3907 إلى -5.3905
$n = 2$	$\pm 1/2, \pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-10}	-3.511×10^{-9}	-1.65×10^{-3}	$\pm 1.51 \times 10^{-4}$	-3.002 إلى -3.0015
$n = 3$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-9}	-2.263×10^{-8}	-2.18×10^{-3}	$\pm 2.41 \times 10^{-4}$	-1.5125 إلى -1.5119
$n = 4$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-9}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm 3.01 \times 10^{-4}$	-0.8529 إلى -0.8522
$n = 5$	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-8}	-1.561×10^{-7}	-2.80×10^{-3}	$\pm 8.09 \times 10^{-4}$	-0.5436 إلى -0.5419

تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تتزايد مقارنة بالجدول (7)، هذا يعكس زيادة تأثير الحقل الكهربائي الخارجي، حيث تصبح هذه التصحيحات أكثر وضوحًا.

وهنا نجد أن تأثير ستارك قد زاد بشكل ملحوظ، حيث أن الحقل الكهربائي المطبق أصبح أكثر قوة وهذا يسبب انزياحًا أكبر في مستويات الطاقة مع زيادة شدة الحقل، تصبح التصحيحات أكثر وضوحًا، مما يعكس تأثيرًا أكبر على النظام.

وتأثير زيمان ما زال ثابتاً كما في الجدول (7)، هذا يشير إلى أن الحقل المغناطيسي المستخدم لم يتغير، وبالتالي لم يطرأ أي تغيير ملحوظ على هذا التأثير.

بالمقارنة بين الجدولين (7) و(8)، نجد أن الطاقة الكلية أصبحت أكثر تبايناً عن الطاقة غير المضطربة وهذا يعكس تأثير الزيادة في الحقل الكهربائي وتزايد تصحيحات الطاقة المتعلقة بتأثير ستارك أما تأثير زيمان لا يزال صغيراً نسبياً، لكنه يساهم في التغيرات الكلية.

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^7 \text{ V/m}$

يظهر الجدول التالي تأثير زيادة شدة الحقل الكهربائي على حساب الطاقة الكلية والتصحيحات المرافقة

الجدول (9) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52×10^{-10}	-2.06×10^{-8}	-2.48×10^{-3}	$\pm 7.53 \times 10^{-5}$	إلى -5.3926 -5.3924
$n = 2$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2$	-3.00	-1.24×10^{-10}	-2.31×10^{-7}	-6.60×10^{-3}	$\pm 1.51 \times 10^{-4}$	إلى -3.0068 -3.0064
$n = 3$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.6×10^{-9}	-6.24×10^{-7}	-8.74×10^{-3}	$\pm 2.41 \times 10^{-4}$	إلى -1.5190 -1.5184
$n = 4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-9}	-1.31×10^{-6}	-9.99×10^{-3}	$\pm 3.01 \times 10^{-4}$	إلى -0.8603 -0.8596
$n = 5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-8}	-2.18×10^{-6}	-1.12×10^{-2}	$\pm 8.09 \times 10^{-4}$	إلى -0.5520 -0.5503

تصحیحات الاضطراب (E_{n2}) تزداد بشكل كبير، حيث أن زيادة شدة الحقل الكهربائي تؤثر بشكل أكبر على مستويات الطاقة و التصحيحات تصبح أكبر، خاصة في المستويات العليا، حيث يكون للنظام استجابة أكبر للحقول الخارجية.

هنا نجد أن تأثير ستارك قد تضخم بشكل كبير بسبب الزيادة في شدة الحقل الكهربائي والتي تؤدي إلى انزياحات كبيرة في مستويات الطاقة كلما زادت شدة الحقل، وزيادة التأثير على الطاقة الكلية، والذي يظهر بشكل واضح بالمقارنة مع الجدولين (7) و(8).

بينما تأثير زيمان يبقى كما هو، نظراً لثبات الحقل المغناطيسي المطبق، وبالتالي يبقى تأثيره على النظام ثابتاً ولا يتأثر بزيادة شدة الحقل الكهربائي.

أما الطاقة الكلية فإنها تختلف بشكل ملحوظ عن القيم غير المضطربة، بسبب الزيادة الكبيرة في تأثير ستارك والتصحيحات من المرتبتين الأولى والثانية وكذلك تأثير ستارك تسهم في انزياح أكبر في الطاقة الكلية، مما يعكس تأثير الحقول الكهربائية العالية على النظام الكمومي.

مما تقدم ممكن أن نورد النتائج التالية:

- يظهر تأثير ستارك زيادة كبيرة مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، في البداية كان التأثير ضئيلاً، لكنه أصبح أكثر وضوحاً في الجدول الثاني، وبلغ أقصى قيمة له في الجدول الثالث عند زيادة شدة الحقل بشكل كبير.
- يبقى ثابتاً تأثير زيمان عبر جميع الجداول (7) و(8) و(9) لأن الحقل المغناطيسي لم يتغير وهذا يشير إلى أن تأثير الحقل المغناطيسي محدود في هذه الحسابات.
- تزداد تصحيحات الاضطراب مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، مما يوضح أن الحقول الخارجية تؤثر بشكل أكبر على المستويات العليا للطاقة.
- تتباين الطاقة الكلية بشكل أكبر كلما زادت شدة الحقول، حيث تصبح التصحيحات أكبر وأكثر تأثيراً على المنظومة

باختصار، يمكن ملاحظة أن تأثير الحقول الخارجية، وخاصة تأثير ستارك، يلعب دورًا كبيرًا في تعديل الطاقة الكلية للمنظومة الكمومية والتي تستجيب بشكل أكبر للحقل الكهربائي مع زيادة شدته، في حين يبقى تأثير الحقل المغناطيسي ثابتًا.

4.5 دراسة تغيرات الطاقة من أجل حقل مغناطيسي ثابت شدته $B = 10T$ و حقول كهربائية متغيرة الشدة لذرة الليثيوم:

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^6 \text{ V/m}$

يظهر الجدول التالي حسابات الطاقة الكلية والتصحيحات وتأثير ستارك وزيمان عند قيم محددة للحقلين الكهربائي والمغناطيس

الجدول (10) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

الطاقة الكلية E_{Total} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	E_{n2} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n0} (eV)	m_j	مستوى الطاقة n
-5.3908 إلى -5.3892	$\pm 7.53 \times 10^{-4}$	-2.48×10^{-5}	-2.4×10^{-12}	-5.52×10^{-9}	-5.39	$\pm 1/2$	$n = 1$
-3.0016 إلى -2.9985	$\pm 1.51 \times 10^{-3}$	-6.60×10^{-5}	-6.6×10^{-11}	-1.24×10^{-9}	-3.00	$\pm 1/2, \pm 3/2$	$n = 2$
-1.5125 إلى -1.5076	$\pm 2.41 \times 10^{-3}$	-8.74×10^{-5}	-8.74×10^{-11}	-7.6×10^{-8}	-1.51	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	$n = 3$
-0.8531 إلى -0.8470	$\pm 3.01 \times 10^{-3}$	-9.99×10^{-5}	-9.99×10^{-11}	-3.8×10^{-8}	-0.85	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	$n = 4$
-0.5482 إلى -0.5320	$\pm 8.09 \times 10^{-3}$	-1.12×10^{-4}	-1.12×10^{-10}	-1.14×10^{-7}	-0.54	$\pm 1/2, \pm 3/2, \pm 5/2$	$n = 5$

تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) هذه التصحيحات تبقى صغيرة جدًا في هذا الجدول، مما يشير إلى أن الحقل الكهربائي المطبق ضعيف ولا يسبب اضطرابًا كبيرًا في النظام، التصحيحات تأخذ قيمًا صغيرة متزايدة مع المستويات العليا n .

فإن تأثير ستارك يبقى بسيطاً لأن الحقل الكهربائي ضعيف، مع انزياحات طفيفة جداً في الطاقة، الانزياح الناتج عن تأثير ستارك لا يزال لا يؤثر بشكل ملحوظ على الطاقة الكلية في هذا الجدول.

وبسبب شدة الحقل المغناطيسي الكبيرة 10 تسلا، تأثير زيمان يبرز بشكل كبير جداً بحيث يحدث انقسام واضح في مستويات الطاقة بناءً على قيم m_j مستويات الطاقة لكل n تنقسم إلى عدة مستويات فرعية حسب قيمة m_j ، مما يزيد التباين بين الطاقة الكلية والغير مضطربة يزداد تأثير زيمان بشكل خطي مع زيادة الحقل المغناطيسي، وبالتالي يؤدي إلى تغيرات ملحوظة في الطاقة الكلية.

أما الطاقة الكلية تظهر انقساماً واضحاً على مستويات الطاقة الفرعية، مما يعني أن الحقل المغناطيسي هو العامل الأكثر تأثيراً في هذا الحالة بينما تأثير ستارك ضعيف، وبالتالي لا يضيف تغيرات كبيرة.

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 5 \times 10^6 \text{ V/m}$

يوضح الجدول التالي تأثير مفعول ستارك مع زيادة شدة الحقل الكهربائي في الحسابات المحددة مع بقاء شدة الحقل المغناطيسي ثابت ومساوٍ لـ $10T$

الجدول (11) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52 $\times 10^{-9}$	-3.425 $\times 10^{-10}$	-6.18 $\times 10^{-4}$	± 7.53 $\times 10^{-4}$	-5.3913 إلى -5.3898
$n = 2$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2$	-3.00	-1.24 $\times 10^{-9}$	-3.511 $\times 10^{-9}$	-1.65 $\times 10^{-3}$	± 1.51 $\times 10^{-3}$	-3.0032 إلى -3.0001
$n = 3$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.6 $\times 10^{-8}$	-2.263 $\times 10^{-8}$	-2.18 $\times 10^{-3}$	± 2.41 $\times 10^{-3}$	-1.5146 إلى -1.5097

تأثير الحقول الكهربائية والمغناطيسية على الطيف الذري لذرتي الهيدروجين والليثيوم

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.8×10^{-8}	-6.632×10^{-8}	-2.50×10^{-3}	$\pm 3.01 \times 10^{-3}$	-0.8556 إلى -0.8494
$n = 5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.14×10^{-7}	-1.561×10^{-7}	-1.80×10^{-3}	$\pm 8.09 \times 10^{-3}$	-0.5499 إلى -0.5337

إنَّ تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تصبح أكثر وضوحًا مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، التصحيحات من المرتبة الأولى والثانية تأخذ قيمًا أكبر قليلًا خاصة في المستويات العليا للطاقة، هذا يعني أن النظام بدأ يتأثر بالحقل الكهربائي المطبق.

يظهر تأثير ستارك بوضوح أكبر وذلك مع زيادة شدة الحقل الكهربائي، والانزياح في مستويات الطاقة يزداد مقارنة بالجدول (10)، خاصة في المستويات العليا للطاقة، في حين أن تأثير ستارك لا يزال أصغر من تأثير زيمان، إلا أنه يلعب دورًا ملحوظًا في تعديل الطاقة الكلية، الانزياح الذي يسببه تأثير ستارك يعتمد بشكل كبير على شدة الحقل الكهربائي، ويظهر بشكل أكبر في المستويات العليا n .

تأثير زيمان يبقى ثابتًا نظرًا لأن شدة الحقل المغناطيسي لم تتغير، ولكنه لا يزال العامل الأكثر تأثيرًا في التغيير الكلي للطاقة، والانقسام في مستويات الطاقة لا يزال كبيرًا بناءً على قيمة m_j .

بملاحظة التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان مع زيادة الحقل الكهربائي نلاحظ إن تأثير ستارك يؤدي إلى انزياح إضافي في الطاقة الكلية، ولكنه لا يزال أقل تأثيرًا من زيمان والطاقة الكلية تظهر انقسامًا واضحًا ناتجًا عن تأثير زيمان، مع تصحيحات إضافية نتيجة تأثير ستارك.

• من أجل حقل كهربائي شدته $E = 1 \times 10^7 \text{ V/m}$

يبين الجدول التالي تأثير شدة الحقل الكهربائي حيث يكون مفعول ستارك والتصحيحات الناتجة عنه على الطاقة أكثر وضوحاً

الجدول (12) الطاقة الكلية وتصحيحات الاضطراب

مستوى الطاقة n	m_j	E_{n0} (eV)	E_{n1} (eV)	E_{n2} (eV)	ΔE_{Stark} (eV)	ΔE_{Zeeman} (eV)	الطاقة الكلية E_{Total} (eV)
$n = 1$	$\pm 1/2$	-5.39	-5.52 $\times 10^{-9}$	-2.06 $\times 10^{-8}$	-2.48 $\times 10^{-3}$	$\pm 7.53 \times 10^{-4}$	-5.3929 إلى -5.921
$n = 2$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2$	-3.00	-1.24 $\times 10^{-9}$	-2.31 $\times 10^{-7}$	-6.60 $\times 10^{-3}$	$\pm 1.51 \times 10^{-3}$	-3.0081 إلى -3.0050
$n = 3$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-1.51	-7.6 $\times 10^{-8}$	-6.24 $\times 10^{-7}$	-8.74 $\times 10^{-3}$	$\pm 2.41 \times 10^{-3}$	-1.5211 إلى -1.5136
$n = 4$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.85	-3.8 $\times 10^{-8}$	-1.31 $\times 10^{-6}$	-9.99 $\times 10^{-3}$	$\pm 3.01 \times 10^{-3}$	-0.8630 إلى -0.8568
$n = 5$	$\pm 1/2,$ $\pm 3/2,$ $\pm 5/2$	-0.54	-1.14 $\times 10^{-7}$	-2.18 $\times 10^{-6}$	-1.12 $\times 10^{-2}$	$\pm 8.09 \times 10^{-3}$	-0.5593 إلى -0.5431

من الجدول السابق نلاحظ تصحيحات الاضطراب (E_{n2}) تأخذ قيمة كبيرة نسبياً في هذا الجدول بسبب شدة الحقل الكهربائي العالية، هذه التصحيحات تشير إلى أن النظام أصبح أكثر اضطراباً وتأثراً بالحقول الخارجية، خاصة الحقل الكهربائي.

يزداد تأثير ستارك بشكل كبير مع زيادة شدة الحقل الكهربائي الكبيرة، ويصبح له دور رئيسي في تعديل مستويات الطاقة والانزياحات الناتجة في هذا الجدول أصبحت كبيرة بما يكفي لتنافس تأثير زيمان في بعض المستويات بحيث كلما زادت شدة الحقل الكهربائي، يزداد الانزياح الناتج عن تأثير ستارك بشكل غير خطي، خاصة في المستويات العليا للطاقة.

بينما تأثير زيمان يبقى كما هو ثابتاً، نظراً لأن الحقل المغناطيسي لم يتغير عن 10 تسلا إلا أن تأثيره قائم بشكل رئيسي على مستويات الطاقة، ولكن تأثير ستارك ينافس تأثير زيمان في تغيير الطاقة الكلية.

أما الطاقة الكلية فإنها تتأثر بشكل كبير بكل من تأثيري ستارك وزيمان بحيث أن شدة الحقل الكهربائي العالية أدت إلى انزياحات كبيرة في الطاقة الكلية، بينما تأثير زيمان يستمر في فرض انقسام كبير في مستويات الطاقة بناءً على m_j والنتيجة هي أن التفاعل بين الحقلين الكهربائي والمغناطيسي يصبح معقداً، حيث أن تأثير ستارك أصبح له دور كبير في تعديل الطاقة الكلية في المستويات العليا للطاقة.

اعتماداً على ما تقدم يمكن أن نورد النتائج التالية:

- مع زيادة شدة الحقل المغناطيسي إلى 10 تسلا، يكون تأثير زيمان هو العامل الأكثر تأثيراً على مستويات الطاقة الكلية و الانقسام الناتج عن هذا التأثير لمستويات الطاقة واضح ويزداد مع زيادة قيمة n وقيمة m_j مما يؤثر بشكل كبير على الطاقة الكلية.
- كما هو مبين في الجداول (10) و (11) و (12)، يزداد تأثير ستارك بشكل تدريجي مع زيادة شدة الحقل الكهربائي وفي الجدول (12)، يصبح تأثير ستارك مهماً للغاية ويبدأ في منافسة تأثير زيمان على الطاقة الكلية، خاصة في المستويات العليا للطاقة، والانزياحات الناتجة عن تأثير ستارك تظهر بوضوح عند شدة الحقل الكهربائي العالية.
- إن التفاعل بين تأثيري ستارك وزيمان هو الذي يحدد الطاقة الكلية للنظام، ففي الجداول الأولى يكون تأثير زيمان هو المسيطر، بينما في الجداول اللاحقة خاصة عند شدة الحقل الكهربائي العالية، يتداخل تأثير ستارك ويؤثر بشكل كبير على الحسابات النهائية للطاقة الأصلية.
- بنظرنا أن الموضوع يستوفي الشروط نظراً لأنه تم دراسة المنظومتين عند تغيير الحقلين الكهربائي والمغناطيسي المتعامدين وهذا ما ينسجم مع مخطط البحث

- حيث تمت الدراسة عند قيم جديدة لكلا الحقلين ولم يتم دراسته فيما سبق بهدف الحصول على حالة أشمل يمكن اعتمادها في تطبيقات مختلفة
- تم ذكر انقسام السويات الطاقية مع تحديد قيم الحقول الموافقة

5.5 الاستنتاجات والتوصيات:

• الاستنتاجات:

1. تطبيق الحقول الكهربائية والمغناطيسية المتعامدة يؤدي إلى تغييرات معقدة في مستويات الطاقة الذرية لكل من ذرتي الهيدروجين والليثيوم، والنتيجة عن التفاعل بين العزم الكهربائي والمغناطيسية للذرات مع الحقول الخارجية.
2. تفاعل الحقول الكهربائية مع العزم الكهربائي للإلكترونات ينتج انزياحاً في مستويات الطاقة معتمداً على شدة الحقل المطبق (تأثير ستارك)
3. تفاعل الحقول المغناطيسية مع العزم المغناطيسي للإلكترونات ينتج انقساماً في مستويات الطاقة تتوقف على اتجاه الحقول وشدة المطبقة (تأثير زيمان)
4. تتأثر ذرة الليثيوم تتأثر بشكل أكبر بالحقول الكهربائية والمغناطيسية مقارنة بذرة الهيدروجين نظراً لبنيتها الأكثر تعقيداً والذي يسبب انقسامات أكبر في مستويات الطاقة
5. التصحيحات الطاقية المعتمدة على نظرية الاضطراب في الحسابات العددية تلعب دوراً حاسماً في فهم الظواهر الطيفية وما ينتج عنه من تطبيقات مباشرة في تقنيات الليزر وتحسين تصميم أجهزة الطيف الذري وزيادة دقتها في الكشف عن العناصر الكيميائية وتحليل المواد

• التوصيات:

1. إجراء مزيد من الدراسات على تأثير الحقول المتعامدة على ذرات أخرى، خاصة تلك التي لها بنية إلكترونية أكثر تعقيدًا، لفهم أعمق للتفاعلات بين الحقول والذرات.
2. دراسة تأثير درجات الحرارة على استقرار الذرات في الحقول المتعامدة لمعرفة كيف تتأثر الديناميكيات الحرارية بالحقول الخارجية.

المراجع:

1. Stark, J. (1914). **Observation of the separation of spectral lines by an electric field**. Annalen der Physik, 348(4), 965-982.
2. Bethe, H. A., & Salpeter, E. E. (1957). **Quantum mechanics of one- and two-electron atoms**. Springer.
3. Zimmerman, M. L., Littman, M. G., Kash, M. M. & Kleppner, D. (1979). **Stark structure of the Rydberg states of alkali-metal atoms**. Physical Review A, 20(6), 2251.
4. Sakurai, J. J., & **Napolitano, J. (2017). Modern quantum mechanics**. Cambridge University Press.
5. Gallagher, T. F. (1994). **Rydberg atoms**. Cambridge University Press.
6. Lorentz, H. A. (1895). Versuch einer **Theory of Electrical and Optical Phenomena in Moving Bodies**. E. J. Brill in Leiden.

تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في بعض الصفات المورفو فيزيولوجية والنوعية لنبات عباد الشمس *Helianthus annus L.*

كاتولين سكرية⁽¹⁾ و د. جورج غندور⁽²⁾ ود. فادي عباس⁽³⁾

- (1) طالبة ماجستير، قسم علم الحياة، كلية العلوم جامعة حمص.
- (2) أستاذ مساعد في قسم علم الحياة بكلية العلوم، جامعة حمص.
- (3) مدير بحوث في الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، مركز بحوث حمص.

الملخص:

نفذ البحث خلال العام 2024 في المنطقة الغربية من محافظة حمص في حقل خاص في قرية التلة، بهدف دراسة تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست بعدة تراكيز (0، 5، 10%) مع معدلين من السماد المعدني الآزوتي 50% و 100% من التوصية السمادية (60 و 120 كغ/هكتار) في بعض الصفات الشكلية والفيزيولوجية والنوعية لنبات عباد الشمس *Helianthus annus L.* تم تصميم التجربة وفق تصميم القطاعات المنشقة لمرة واحدة حيث توضع معاملات التسميد الآزوتي في القطع الرئيسية، ومعاملات الرش بشاي الفيرمي كمبوست في القطع المنشقة من الدرجة الأولى، وبثلاثة مكررات.

أظهرت النتائج تفوق معاملة الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 10% والتسميد الآزوتي 120 كغ/هكتار في جميع المؤشرات المدروسة، كما تفوقت معاملة التسميد المعدني (120 كغ/هكتار) من التوصية السمادية على المعاملة (60 كغ/هكتار)، وبالنتيجة حققت التسميد المعدني 100% مع الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 10% أفضل القيم، فقد بلغ ارتفاع النبات 235.7 سم، مساحة المسطح الورقي خلال الإزهار 17496.0 سم²/نبات

وخلال مرحلة النضج 13248.0 سم²/نبات، محتوى الكلوروفيل a 43.72 ملغ/غ والكلوروفيل b 14.45 ملغ/غ، خلال مرحلة الإزهار، ونسبة الزيت في البذور 41.88% كما أظهرت النتائج أنه يمكن توفير 50% من الأسمدة المعدنية مقابل الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 10% .

الكلمات المفتاحية: شاي الفيرمي كمبوست، التسميد الآزوتي، الصفات الفيزيولوجية، نسبة الزيت، عباد الشمس.

Effect of spraying with vermicompost tea and nitrogen fertilization on some morpho-physiological and Qualitative traits of sunflower *Helianthus annus L.*

Abstract:

The research was conducted in 2024 year at the western region of Homs Governorate, in a private field located in the village of Al-Talla, to study the effect of vermicompost tea spraying at different concentrations (0, 5, and 10%) and two levels of nitrogen mineral fertilizer, 50% and 100% of the recommended dose (60 and 120 kg N/ha on some morpho-physiological and qualitative traits of sunflower *Helianthus annuus L.*. The experiment was designed according to a split-plot layout with three replications. The main plots included mineral fertilization treatments ,while the split plots included vermicompost tea spraying treatments at concentrations with three replications.

The results showed that spraying with 10% vermicompost tea combined with nitrogen fertilization at 120 kg/ha significantly outperformed all other treatments across all studied indicators. the full nitrogen fertilization (120 kg/ha) was superior to the half dose (60 kg/ha). The combination of 100% mineral fertilization with 10% vermicompost tea spraying resulted in the

best values: average plant height reached 235.7 cm; leaf area during flowering was 17,496.0 cm²/plant and 13,248.0 cm²/plant at maturity; chlorophyll a content was 43.72 mg/g and chlorophyll b was 14.45 mg/g during flowering; and oil content in the seeds was 41.88%. The results also indicated that 50% of the mineral fertilizers could be saved by using 10% vermicompost tea spraying.

Keywords: Vermicompost tea, Nitrogen fertilization, Physiological Traits, Oil percent, Sunflower.

المقدمة والدراسة المرجعية:

ازدادت أهمية عباد الشمس (*Helianthus annuus* L.) الذي ينتمي إلى الفصيلة النجمية Asteraceae خلال السنوات الماضية فهو يحتل المرتبة الثانية بعد فول الصويا من حيث كمية الزيت النباتي المنتجة. إذ يزرع هذا المحصول بشكل أساسي بهدف استخراج الزيت من بذوره الذي تتراوح نسبته ما بين (35-60%)، إضافة إلى احتوائها على نسبة جيدة من البروتين تصل إلى 17% [1].

تعتبر أمريكا الشمالية الموطن الأصلي لعباد الشمس، ومنها انتقل إلى أوروبا بعد اكتشاف القارة الأمريكية في القرن السادس عشر، ويرجع الفضل في استخدامه كمحصول زيتي إلى الروس وقد استخدمه السكان الأصليون في أمريكا الشمالية كمصدر غذائي [2]. وتركزت زراعة عباد الشمس في الوطن العربي خلال السنوات الماضية في السودان والمغرب ومصر وسورية، وقد شهدت المساحة المزروعة بعباد الشمس في سورية تفاوتاً كبيراً خلال السنوات الماضية. فقد بلغت في عام 2013 نحو 6071 هـ (منها 5 هـ من عباد الشمس الزيتي)، ثم تراجعت عام 2023 إلى نحو 5245 هـ (منها 1006 هـ من عباد الشمس الزيتي) [3].

يعتبر زيت عباد الشمس من الزيوت النباتية المرغوبة في الاستهلاك نظراً لخلوه من المركبات السامة. [1] وهو ذو جودة عالية نظراً لاحتوائه على نسبة عالية من الأحماض

الدهنية غير المشبعة (حمض الأوليك 20% ، حمض اللينوليك 69%) وهذا يمنحه جودة غذائية ممتازة وثباتاً تأكسدياً وعدم احتوائه على الأحماض الضارة مثل الإيروسيك. [4] . يُعد الفيرمي كمبوست منتجاً عضوياً ناتجاً عن عملية التحلل الحيوي المتسارع للمخلفات العضوية بفعل التفاعل التكافلي بين ديدان الأرض والميكروبات، حيث تقوم ديدان الأرض بتحطيم المواد العضوية عبر جهازها الهضمي، و تسريع التحلل الميكروبي وزيادة أعداد الكائنات الحية الدقيقة، مع تحسين الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة الناتجة [5]، ويتميز هذا السماد بكونه مصدراً غنياً بكل من المغذيات النباتية ومضادات الأكسدة والمواد الدبالية والفينولات والهرمونات النباتية المحفزة للنمو [6].

ينتج مستخلص سماد الديدان عن طريق تخمير السماد العضوي الصلب من ديدان الأرض في الماء، وتحويله إلى سائل مغذي يحتوي على مغذيات كبرى وصغرى، وأحماض عضوية، وبكتيريا معززة لنمو النبات [7]. وعند تطبيقه على الأوراق، يعزز الخصائص الفيزيولوجية للنبات، مما يزيد من النمو والإنتاج [8]. بالإضافة إلى ذلك فإن شاي سماد الديدان غني بالإنزيمات والمواد القادرة على حماية النباتات من الآفات والأمراض [9].

يقدم سماد الديدان بديلاً فعالاً للأسمدة المعدنية وقد استخدم السماد الدودي الصلب والسائل بنجاح لزيادة إنتاجية وجودة العديد من النباتات [10]. فهو يحسن بنية التربة من خلال زيادة التهوية، واحتباس الماء، وتوافر العناصر الغذائية، ويؤدي تطبيقه إلى زيادة مسامية التربة، مما يسهل من نمو الجذور وامتصاص النباتات للعناصر الغذائية بشكل أفضل [11].

يحتوي شاي السماد الدودي على أحماض عضوية وغير عضوية تعمل كوسيط في عملية التنفس، مما ينعكس إيجاباً على نشاط الإنزيمات والهرمونات التي تسبب زيادة في نواتج عملية البناء الضوئي، مما يؤدي إلى زيادة نشاط انقسام الخلايا وزيادة حجمها إضافة لتكوين أجزاء جديدة، مؤدية لزيادة في الطول والكثافة [12]، كما يحتوي على أحماض أمينية تُساهم في تكوين جزيء الكلوروفيل في الأوراق، بالإضافة إلى دوره في زيادة مضادات الأكسدة، مما يحافظ على محتوى الكلوروفيل في الأوراق [13] .

ذكر [14] أنه يمكن من خلال استخدام المحسنات العضوية تحسين مقاومة النبات للجفاف مثل السماد الدودي السائل أو شاي الفيرمي كمبوست، وذلك لما يحويه السماد السائل من سكريات قابلة للذوبان، وسوربيتول، وبيتين، وأحماض أمينية، وأحماض عضوية أخرى، بالإضافة إلى أيونات النيتروجين، والفوسفور، والكالسيوم، والزنك، والبورون، والمغنيزيوم، والكبريت، والحديد [15].

تتسبب الزيادة الملحوظة في نمو النبات باستخدام مستخلص السماد الدودي عن طريق الرش الورقي بسبب احتواءه على عناصر غذائية أساسية تشارك في عمليات رئيسية مثل التركيب الضوئي، وبناء البروتوبلازم، والتنفس، وإنتاج الهرمونات النباتية. وقد أدى ذلك إلى تحسن ملحوظ في الحالة الفيزيولوجية للنبات، مما كان له تأثير إيجابي على المؤشرات الإنتاجية. كما لعب المستخلص دوراً في تنظيم أفضل لتوازن الماء وتوافر العناصر الغذائية، وبالتالي تعزيز نمو المحصول [16] [17].

درس [18] تأثير التسميد والرش الورقي بشاي الفيرمي كمبوست في بعض مؤشرات النمو والإنتاج للقمح القاسي، فوجد أن معاملة الرش بشاي الفيرمي كمبوست مع معاملة التسميد المعدني 50% تفوقت معنوياً على معاملة التسميد المعدني 100% في صفتي الغلة الحبية ونسبة البروتين في الحبوب. وبالتالي خلص البحث إلى أنه يمكن الاستغناء عن نصف كمية الأسمدة المعدنية مقابل ثلاث رشات بشاي الفيرمي كمبوست بدءاً من بداية مرحلة الإشتاء.

يعتبر استخدام الأسمدة الأزوتية التقليدية أمراً شائعاً لتحقيق الغلة المثالية للمحاصيل، إذ أنه لا يمكن الاستغناء عنها في عملية إنتاج المحاصيل، فإضافة الكمية المثلى منها لمحصول عباد الشمس أدى إلى زيادة كفاءة امتصاص الأزوت من التربة بمعدل 17.76 كغ/هـ وزيادة إنتاجيته بمعدل 3870.94 كغ/هكتار [19].

أكد [20] أن التسميد الآزوتي أدى إلى تحسين نمو النبات وزيادة محتوى الزيت في البذور وذلك من خلال دراسة أجريت لتقييم تأثير التسميد الآزوتي على إنتاج وامتصاص الآزوت ونوعية الزيت في نبات عباد الشمس.

هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست بعدة تراكيز مع معدلين من السماد المعدني في بعض الصفات الشكلية والفيزيولوجية والنوعية لنبات عباد الشمس.

مواد البحث وطرقه:

1-المادة النباتية:

تم استخدام الصنف البلدي من نبات عباد الشمس المميز بصفاته الإنتاجية، فهو من الأصناف المفتوحة التلقيح التي تزرع على نطاق واسع في سوريا، يبلغ عدد الأيام من الزراعة حتى الإزهار حوالي 60 يوم وحتى النضج حوالي 95 يوم. ويتميز هذا الصنف بإنتاجه الجيد من البذور حوالي 1500 كغ/هكتار من البذور والتي تحتوي على نسبة جيدة من الزيت تتراوح بين 25% إلى 30%، كما أنه يتحمل الظروف المناخية المختلفة وبعض الأمراض عفن القرص والساق، مما يقلل من الخسائر في المحصول. [21]

2- مكان تنفيذ البحث وزمانه:

تم تنفيذ التجربة خلال العام 2024 في المنطقة الغربية من محافظة حمص في حقل خاص في قرية التلة، يبين الجدول (1) الظروف المناخية السائدة خلال فترة تنفيذ البحث، وبدراسته نجد أن موقع التجربة كان حاراً وجافاً خلال فترة تنفيذ البحث حيث تراوحت درجة الحرارة العظمى بالمتوسط بين 37.5 °م في شهر حزيران و 39 °م في شهر آب، والصغرى بين 18 °م في شهر حزيران و 19 °م في شهر آب، وأن الهطول المطري كان مهماً لأن الزراعة صيفية. وبشكل عام كانت الظروف مناسبة لزراعة نبات عباد الشمس.

الجدول (1) درجات الحرارة العظمى والصغرى والهطول المطري في موقع الدراسة خلال فترة تنفيذ البحث من عام 2024.

الشهر	متوسط درجة الحرارة العظمى م°	متوسط درجة الحرارة الصغرى م°	الهطول المطري ملم
حزيران	37.5	18	0
تموز	38	19	0
آب	39	19	0

تم تحليل تربة الموقع قبل الزراعة في مخبر التربة في مركز البحوث العلمية الزراعية في مدينة حمص، وأظهرت النتائج (الجدول 2) أن التربة طينية لومية، ذات تفاعل قاعدي غير متملحة.

جدول (2) بعض الخصائص الفيزيائية والكيميائية لتربة موقع الزراعة

حموضة التربة pH	المادة العضوية %	البوتاس المتاح ppm	الفوسفور المتاح Ppm	النيتروجين المعدني ppm	قوام التربة	توزيع حجم جزيئات التربة		
						طين %	سلت %	رمل %
7.40	2.41	255.8	12.6	18.6	طينية لومية	57.6	24.6	17.8

3-إعداد الأرض وزراعتها:

تم اختيار أرض التجربة بحيث تكون متجانسة لضمان نجاح الإنبات وتجانسه، وتم تحضير التربة بفلاحتها على عمق 25 سم في شهر حزيران ومن ثم تعميمها لتأمين مهد مناسب للزراعة وتلا ذلك عملية تخطيط الأرض إلى خطوط بمسافة 70 سم بين الخط والآخر، ومن ثم زرعت بذور عباد الشمس يدوياً بمعدل حبتين في الجورة الواحدة على عمق زراعة 5 سم وتمّ تغطية البذور بشكل جيد، وكان عدد الخطوط ثلاثة ضمن القطعة الواحدة، وأعطيت الأرض رية خفيفة بعد زراعتها مباشرة، وأخرى بعد عدة أيام لتأمين إنبات كامل ومن ثم تمّ الريّ حسب الحاجة.

وأجريت عمليات التقريد والترقيع والتعشيب بشكل متساوي بين القطع التجريبية حسب الحاجة وبوقتها المناسب.

4-معاملات التجربة:

تضمنت معاملات التجربة التسميد باليوريا بالمستويين (60 و 120 كغ/هكتار) مفرداً أو بالمشاركة مع الرش بتركيزين من شاي الفيرمي كمبوست (5، 10%) بالتالي كانت المعاملات كالتالي:

1- معاملة الشاهد بدون رش (V1N2)، (V1N1).

2- الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 5% والتسميد الآزوتي بمعدل
(V2N1).60 kg N/ha

3- الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 5% والتسميد الآزوتي بمعدل
(V2N2)120kg N/ha

4- الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 10% والتسميد الآزوتي بمعدل
(V3N1) 60kg N/ha

5- الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 10% والتسميد الآزوتي
(V3N2) 120kg N/ha

تم استخدام الفيرمي كمبوست المحضر باستخدام ديدان الأرض وهي ديدان حمراء اللون مخططة تنتمي إلى عائلة *Lumbricidae*، ويتوافر منها في سورية حالياً نوعين: الأولى هي *Eisenea foeteda* والمسماة المتأرجحة الحمراء Red wiggler وذلك بسبب حركة ذيلها المتذبذب خلال تحركها في التربة، والثانية هي *Eisenea andrie* والمسماة الدودة النمر Tiger worm بسبب جسمها المخطط.

تم تحضير تراكيز شاي الفيرمي كمبوست قبل الرش مباشرة من خلال نقع 1 كغ فيرمي كمبوست في 10 و 20 لتر ماء نقي (خالٍ من الكلور)، مع إضافة 10 غ سكر طبيعي كبادئ للتخمير، وتوفير مصدر أوكسجين بواسطة مضخة هوائية لمدة 72 ساعة، وذلك لتنشيط الكائنات الحية الهوائية في الشاي المحضر.

تم الرش مرتين، الرش الأولى كانت بعد تشكل الورقة الحقيقية الرابعة، والرش الثانية بعد شهر من الأولى.

تم تحليل سماد الفيرمي كمبوست المستخدم في مركز البحوث العلمية الزراعية في مدينة حمص

جدول (3). بعض الخصائص الكيميائية والفيزيائية للفيرمي كومبوست المستخدم

البيانات	الفيرمي كمبوست
pH 1:10	8.1
EC 1:10 dS/m	1.88
C/N	14.48
مادة عضوية %	68.76
كربون عضوي %	40.54
أزوت كلي %	2.80
فوسفور كلي %	1.21
بوتاسيوم كلي %	0.98
الرطوبة %	25.07
الكثافة g/cm ³	0.56
% CaCO ₃	6.85

تصميم التجربة والتحليل الإحصائي:

تم تصميم التجربة وفق تصميم القطع المنشقة لمرة واحدة حيث ضم القطاع الرئيسي معدلي السماد الآزوتي والقطع المنشقة من الدرجة الأولى تراكيز الرش بالفيرمي كمبوست. وبثلاثة مكررات

عدد القطع التجريبية = 18 قطعة تجريبية.

عدد الخطوط في القطعة 3 خطوط وطول الخط 3 م.

المسافة بين الخطوط 70 سم وبين النباتات على الخط نفسه 50 سم.

مساحة القطعة التجريبية 6.3 م²

مساحة التجربة المزروعة فعلاً 151.2 م².

تم ترك ممر للخدمة 1 م بين القطع التجريبية والمكررات ونطاق للحماية 1م من كل الجهات.

تم تحليل كافة المؤشرات التي شملتها الدراسة باستخدام البرنامج الإحصائي Gen Stat 12 وتقدير قيمة أقل فرق معنوي (L.S.D) عند مستوى المعنوية 5%.
المؤشرات المدروسة:

-ارتفاع النبات في مرحلة النضج الفيزيولوجي (سم):

تم قياس ارتفاع النبات باستخدام شريط قياس من قاعدة الساق عند سطح التربة حتى قاعدة القرص الزهري، وذلك في مرحلة النضج الفيزيولوجي لثلاثة نباتات من الخط الأوسط لكل قطعة تجريبية من كل مكرر، ثم تم حساب المتوسط الحسابي لها.

-مساحة المسطح الورقي (سم²) في مرحلتي الازهار والعقد:

تم حساب مساحة الورقة (سم²) يدوياً باستخدام مسطرة مدرجة، وذلك بقياس العرض الأقصى لجميع الأوراق، لثلاثة نباتات وفق المعادلة الرياضية التالية:

مساحة أوراق النبات = مجموع مربعات العرض الأقصى للأوراق × 0.65 [22]

حيث 0.65: ثابت تصحيح مساحة الورقة لنبات عباد الشمس

ومن ثم تم حساب مساحة المسطح الورقي الكلي للنبات:

المسطح الورقي الكلي (سم / نبات) = مجموع مساحة جميع أوراق النبات.

- محتوى الكلورفيل a و b والكلورفيل الكلي في مرحلتي الازهار والعقد (ملغ/غ):

تم تقدير محتوى الكلوروفيل في الأوراق الخضراء خلال مرحلتي الإزهار والنضج الفيزيولوجي، بأخذ 1 غ من الأوراق النباتية التي تم سحقها بهاون البورسلان وأضيف إليها 10 مل أسيتون 85 % أولاً ثم أضيف إليها كميات أخرى من الأسيتون حتى الزوال التام للون الأخضر للبقايا النباتية وتحولها للون الأبيض، ثم تم الترشيح في كأس مدرج وأكمل الحجم إلى 100مل بإضافة الأسيتون.

ثم تم القياس باستخدام جهاز Spectrophotometer موديل 001141 على الموجتين 645 و 663 نانومتر، ثم حسب تركيز كل من الكلوروفيل a والكلوروفيل b حسب المعادلات التالية:

- تركيز الكلوروفيل a : $(OD \times 31.15 \text{ عند } 663) - (OD \times 9.57 \text{ عند } 645)$
 - تركيز الكلوروفيل b : $(OD \times 44.37 \text{ عند } 645) - (OD \times 11.89 \text{ عند } 663)$
- [23]

-نسبة الزيت في البذور %:

تم حساب نسبة الزيت في بذور عباد الشمس باستخدام جهاز السوكسوليت والمذيب العضوي الهكسان وذلك حسب المعيار الدولي للتوحيد القياسي ISO 659:2009 [24]

النتائج والمناقشة:

1. تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في ارتفاع نبات عباد

الشمس:

توضح نتائج الجدول (4) تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في ارتفاع نبات عباد الشمس، ومن دراسته نستنتج زيادة ارتفاع النبات مع زيادة تركيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست كانت الفروق معنوية فقط ($P \geq 0,05$) عند التركيز 10 % فقد بلغت قيمة ارتفاع النبات عنده (222.9 سم) بزيادة قدرها 11.0% مقارنةً بالشاهد الذي بلغ ارتفاع النبات عنده (200.9 سم).

كما أدت زيادة معدل التسميد الآزوتي إلى زيادة ارتفاع النبات معنوياً من (198.9 سم) عند التسميد بـ 60 كغ/هـ يوريا إلى (221.9 سم) عند بـ التسميد 120 كغ/هـ يوريا بزيادة قدرها 11.6%.

من خلال دراسة التأثير المشترك لعامل الرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل التسميد الآزوتي وجد أن المعاملة (120 كغ/هـ N والرش بـ 10 % V) حققت أعلى القيم لارتفاع النبات (235.7 سم) بزيادة معنوية قدرها 23.7 % مقارنةً بالمعاملة N1V1 (التركيز 0

تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في بعض الصفات المورفو فيزيولوجية
والنوعية لنبات عباد الشمس *Helianthus annus L.*

للرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل السماد 60 للسماد الآزوتي) والتي أعطت أدنى القيم
(190.5 سم) مقارنةً بباقي المعاملات.

الجدول (4): تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في ارتفاع النبات (سم).

متوسط V	معدل السماد الآزوتي N		الرش بشاي الفيرمي كمبوست V
	N2: 120kg N/ha	N1: 60kg N/ha	
200.9	211.2	190.5	V1:con
207.5	218.9	196.1	V2: 5%
222.9	235.7	210.0	V3: 10%
-	221.9	198.9	متوسط N
LSD _{0.05} N= 7.82, LSD _{0.05} V= 9.57 , LSD _{0.05} N*V= 13.54, CV= 3.6%			

2. تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في مساحة المسطح الورقي
(سم²) خلال مرحلة الإزهار:

توضح نتائج الجدول (5) تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في زيادة
مساحة المسطح الورقي لنبات عباد الشمس، ومن دراسته نستنتج زيادة مساحة المسطح
الورقي مع زيادة تركيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست بفروق معنوية ($P \geq 0,05$) فقد بلغت
قيمه (12464.7، 14052.5، 15684.3 سم²) عند التراكيز (0، 5، 10 %) على
الترتيب، بزيادة قدرها 12.7، 25.8 % للتركيزين 5 و 10% مقارنةً بالشاهد.

كما أدت زيادة معدل التسميد الآزوتي إلى زيادة مساحة المسطح الورقي معنوياً بالقيم (12072.1، 16062.3 سم²) لمعدلي التسميد 60 و 120 كغ/هـ يوريا على الترتيب بزيادة قدرها 33.1%.

من خلال دراسة التأثير المشترك لعاملي الرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل التسميد الآزوتي وجد أن المعاملة (120 كغ/هـ N والرش بـ 10% V) حققت أعلى القيم (17496.0 سم²) بزيادة معنوية قدرها 73.0% مقارنةً بمعاملة N1V1 (التركيز 0 للرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل السماد 60 كغ/هـ للسماد الآزوتي) والتي أعطت أدنى القيم (10115.8 سم²) مقارنةً بباقي المعاملات.

الجدول (5): تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في مساحة المسطح الورقي (سم²) خلال مرحلة الإزهار

متوسط V	معدل السماد الآزوتي N		الرش بشاي الفيرمي كمبوست V
	N2: 120kg N/ha	N1: 60kg N/ha	
12464.7	14813.7	10115.8	V1:con
14052.5	15877.3	12227.7	V2: 5%
15684.3	17496.0	13872.7	V3: 10%
-	16062.3	12072.1	متوسط N
LSD _{0.05} N= 993.7, LSD _{0.05} V= 1417.0, LSD _{0.05} N*V=1721.1, CV= 6.9%			

3. تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في مساحة المسطح الورقي (سم²) خلال مرحلة النضج:

توضح نتائج الجدول (6) تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في زيادة مساحة المسطح الورقي لنبات عباد الشمس خلال مرحلة النضج، ومن دراسته نستنتج زيادة مساحة المسطح الورقي مع زيادة تركيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست بفروق معنوية ($P \geq 0,05$) فقد بلغت قيمة مساحة المسطح الورقي (7830.4، 9205.7، 11066.1 سم²) عند التراكيز (0، 5، 10 %) على الترتيب، بزيادة قدرها 17.6 ، 41.3 % للتركيزين 5 و 10% مقارنةً بالشاهد.

كما أدت زيادة معدل التسميد الآزوتي إلى زيادة مساحة المسطح الورقي معنوياً بالقيم (7309.0، 11425.9) لمعدلي التسميد الآزوتي 60 و 120 كغ/هـ يوريا على الترتيب بزيادة قدرها 56.3%.

من خلال دراسة التأثير المشترك لعاملي الرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل التسميد الآزوتي وجد أن المعاملة (120 كغ/هـ N والرش ب 10 % V) حققت أعلى القيم (13248.0 سم²) متفوقة معنوياً على باقي المعاملات وبزيادة قدرها 132.9 % مقارنةً بمعاملة N1V1 (التركيز 0 للرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل السماد 60 كغ/هـ للسماد الآزوتي) والتي أعطت أدنى القيم (5688.9 سم²) مقارنةً بباقي المعاملات.

الجدول (6): تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في مساحة المسطح الورقي خلال مرحلة النضج

متوسط V	معدل السماد الآزوتي N		الرش بشاي الفيرمي كمبوست V
	N2: 120kg N/ha	N1: 60kg N/ha	
7830.4	9971.9	5688.9	V1:con
9205.7	11057.6	7353.7	V2: 5%

11066.1	13248.0	8884.2	V3: 10%
-	11425.9	7309.0	متوسط N
LSD _{0.05} N= 691.0, LSD _{0.05} V= 846.3, LSD _{0.05} N*V= 1196.8, CV= 7.2%			

من خلال دراسة كل من الجداول (4، 5، 6) نلاحظ حدوث زيادة في قيمة كل من ارتفاع النبات والمسطح الورقي مع زيادة تراكيز التسميد الآزوتي وتراكيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست لاحتواء شاي الفيرمي كمبوست على منظمات النمو الطبيعية مثل الأوكسينات، السيتوكينينات، والجبرلينات، والتي تحفز انقسام وتمدد الخلايا، مما يسهم في زيادة ارتفاع النبات وعدد الأوراق وحجمها وبالتالي تعزيز النمو الخضري والبناء الضوئي من خلال احتواء شاي الفيرمي على كميات متوازنة من العناصر المغذية الدقيقة مثل الحديد والمغنيزيوم والزنك، الذي ينعكس إيجاباً على دعم النمو وتكوين أوراق أكثر كفاءة وزيادة المسطح الورقي بشكل مستدام. وهذا يتفق مع كل من [25] و [26] و [27].

4. تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في محتوى الكلوروفيل a خلال مرحلة الإزهار:

توضح نتائج الجدول (7) تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في محتوى الكلوروفيل a خلال مرحلة الإزهار لنبات عباد الشمس، ومن دراسته نستنتج زيادة في محتوى الكلوروفيل a مع زيادة تركيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست بفروق معنوية ($P \geq 0.05$) فقد بلغت قيمته (33.84، 37.13، 39.94 ملغ/غ) عند التراكيز (0، 5، 10 %) على الترتيب، بزيادة قدرها 9.7، 18.0 % للتركيزين 5 و 10% مقارنةً بالشاهد. كما أدت زيادة معدل التسميد الآزوتي إلى زيادة محتوى الكلوروفيل a معنوياً بالقيم (32.84، 41.10 ملغ/غ) لمعدلي التسميد 60 و 120 كغ/هـ يوريا على الترتيب بزيادة قدرها 25.2%. من خلال دراسة التأثير المشترك لعامل الرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل التسميد الآزوتي وجد أن المعاملة (120 كغ/هـ N والرش ب 10 % V) حققت أعلى القيم لمحتوى الكلوروفيل a (43.72 ملغ/غ) بزيادة قدرها 50.6 % مقارنةً بالمعاملة N1V1 (التركيز 0

تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في بعض الصفات المورفو فيزيولوجية
والنوعية لنبات عباد الشمس *Helianthus annus L.*

للرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل السماد 60 للسماد الآزوتي) والتي أعطت أدنى القيم
(29.04 ملغ/غ) مقارنةً بباقي المعاملات.

الجدول (7): تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في محتوى الكلوروفيل a
خلال مرحلة الإزهار

متوسط V	معدل السماد الآزوتي N		الرش بشاي الفيرمي كمبوست V
	N2: 120kg N/ha	N1: 60kg N/ha	
33.84	38.64	29.04	V1:con
37.13	40.95	33.32	V2: 5%
39.94	43.72	36.16	V3: 10%
-	41.10	32.84	متوسط N
LSD _{0.05} N= 2.63, LSD _{0.05} V= 3.23, LSD _{0.05} N*V= 4.56, CV= 6.9%			

5. تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في محتوى الكلوروفيل b خلال
مرحلة الإزهار:

توضح نتائج الجدول (8) تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في محتوى
الكلوروفيل b خلال مرحلة الإزهار لنبات عباد الشمس، ومن دراسته نستنتج زيادة محتوى
الكلوروفيل b مع زيادة تركيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست بفروق معنوية ($P \geq 0,05$) فقد
بلغت قيمته (10.93، 11.94، 13.08 ملغ / غ) عند التراكيز (0، 5، 10 %) على
الترتيب، بزيادة قدرها 9.2، 19.7 % للتركيزين 5 و 10% مقارنةً بالشاهد.

كما أدت زيادة معدل التسميد الآزوتي إلى زيادة محتوى الكلوروفيل b معنوياً بالقيم (10.45، 13.51 ملغ/غ) لمعدلي التسميد 60 و 120 كغ/هـ يوريا على التوالي بزيادة قدرها 29.3%.

من خلال دراسة التأثير المشترك لعامل الرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل التسميد الآزوتي وجد أن المعاملة (120 كغ/هـ N والرش بـ 10% V) حققت أعلى القيم لمحتوى الكلوروفيل b (14.45 ملغ/غ) بزيادة قدرها 54.4% مقارنةً بمعاملة N1V1 (التركيز 0 للرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل السماد 60 كغ/هـ للسماد الآزوتي) والتي أعطت أدنى القيم (9.36 ملغ/غ) مقارنةً بباقي المعاملات.

الجدول (8): تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في محتوى الكلوروفيل b خلال مرحلة الإزهار

متوسط V	معدل السماد الآزوتي N		الرش بشاي الفيرمي كمبوست V
	N2: 120kg N/ha	N1: 60kg N/ha	
10.93	12.51	9.36	V1:con
11.94	13.58	10.30	V2: 5%
13.08	14.45	11.71	V3: 10%
-	13.51	10.45	متوسط N
LSD _{0.05} N= 1.10, LSD _{0.05} V= 1.35, LSD _{0.05} N*V= 1.91, CV= 9.0%			

من خلال دراسة كل من الجدولين (7 و 8) نلاحظ زيادة في قيمة متوسط كل من الكلوروفيل a والكلوروفيل b في مرحلة الإزهار مع زيادة تراكيز التسميد الآزوتي وتراكيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست وذلك بسبب وفرة العناصر الغذائية الصغرى والكبرى في شاي الفيرمي

كمبوست، لا سيما النيتروجين، المغنيزيوم، والحديد، والتي تُعد مكونات أساسية في تركيب جزيئات الكلوروفيل وتعزيز تكوينها، وتحفيز التمثيل الضوئي بواسطة المركبات العضوية التي يحتويها شاي الفيرمي كمبوست، مع زيادة استقرار جزيئات الكلوروفيل وتقليل تأكسدها، مما يُعزز من فعالية عملية البناء الضوئي. وهذا يتفق مع [28] و [29].

6. تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في نسبة الزيت في البذور %:
توضح نتائج الجدول (9) تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في نسبة الزيت في بذور نبات عباد الشمس، ومن دراسته نستنتج زيادة نسبة الزيت في البذور مع زيادة تركيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست بفروق معنوية عند ($P \geq 0,05$) فقد بلغت قيمتها (34.93، 35.56، 38.60 %) عند التراكيز (0، 5، 10 %) على التوالي، بزيادة قدرها 1.8، 10.5 % للتركيزين 5 و 10% مقارنةً بالشاهد.

كما أدت زيادة معدل التسميد الآزوتي إلى زيادة نسبة الزيت في البذور معنوياً بالقيم (33.75، 38.98 %) لمعدلي التسميد 60 و 120 كغ/هـ يوريا على التوالي بزيادة قدرها 15.5 %.

من خلال دراسة التأثير المشترك لعاملي الرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل التسميد الآزوتي وجد أن المعاملة (120 كغ/هـ N والرش بـ 10 % V) حققت أعلى القيم في نسبة الزيت في البذور (41.88 %) بزيادة قدرها 27.2 % مقارنةً بمعاملة N1V1 (التركيز 0 للرش بشاي الفيرمي كمبوست ومعدل السماد 60 كغ /هـ للسماد الآزوتي) والتي حققت أدنى القيم (32.91 %) مقارنةً بباقي المعاملات.

الجدول (9): تأثير الرش بشاي الفيرمي كمبوست والتسميد الآزوتي في نسبة الزيت في البذور %

متوسط V	معدل السماد الآزوتي N		الرش بشاي الفيرمي كمبوست V
	N2: 120kg N/ha	N1: 60kg N/ha	
34.93	36.95	32.91	V1:con

35.56	38.11	33.01	V2: 5%
38.60	41.88	35.33	V3: 10%
-	38.98	33.75	متوسط N
LSD _{0.05} N= 0.710, LSD _{0.05} V= 0.869, LSD _{0.05} N*V= 1.229, CV= 1.9%			

نلاحظ مما سبق زيادة في قيمة متوسط نسبة الزيت في البذور مع زيادة تراكيز التسميد الآزوتي وتراكيز الرش بشاي الفيرمي كمبوست ويعود تأثير شاي الفيرمي كمبوست في زيادة نسبة الزيت، بفضل المزيج المتكامل من العناصر الغذائية والأحماض الأمينية والفيتامينات والهرمونات النباتية (الأوكسينات والجبريلينات) التي تنشيط العمليات الفيزيولوجية وتحفز النمو الخضري والتكاثري، والتي تحسن كفاءة الإخصاب وتزيد من تكوين البذور ونسبة الزيت، وتحسين التمثيل الضوئي، إضافة إلى زيادة إنتاج الحموض الدهنية التي تعتبر من المكونات الأساسية لتخليق الزيوت داخل البذور. وهذا ما يتفق مع [26] و [29].

الاستنتاجات:

- تفوق معاملة الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 10 % والتسميد الآزوتي 120كغ/هكتار في كافة الصفات المدروسة.
- إمكانية الحصول على منتج صحي أكثر مع عدم وجود اختلاف معنوي في جميع المؤشرات المدروسة بين معاملة التسميد 120كغ/هـ N بلا رش ومعاملة التسميد 60 كغ/هـ N مع الرش 10% باستثناء نسبة الزيت، وبالتالي يمكن تخفيف كمية السماد الآزوتي الواجب إضافتها حتى النصف والتعويض عن ذلك بالرش بشاي الفيرمي كمبوست تركيز 10%.

التوصيات:

- التوسيع في إنتاج سماد الفيرمي كمبوست على مستوى القطر العربي السوري وإمكانية إنتاج سماد شاي الفيرمي كمبوست باعتباره من الأسمدة العضوية والصديقة للبيئة والتي تسهم في زيادة الصفات النوعية.
- توجيه المزارعين لتوفير 50% من الأسمدة المعدنية الآزوتية اللازمة لنبات عباد الشمس وذلك عن طريق استخدام الرش بشاي الفيرمي كمبوست بتركيز 10%.

المراجع:

- 1-الشباك، محمود، ومهنا، أحمد (2010). المحاصيل الصناعية. منشورات جامعة البعث، كلية الزراعة.
- 2- Vadlamudi, J. S., Anitha, S., Sawargaonkar, G. L., and Prameela, P. (2022). Effect of Combined Application of Non-Nano and Nano Fertilizers on the Growth, Yield and Oil Content of Sunflower under Semiarid Conditions. *Int. J. Plant Soil Sci*, 34(24), 1102-1111.
- 3-المجموعة الإحصائية الزراعية السنوية (2023). مديرية الإحصاء والتخطيط - وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي، الجمهورية العربية السورية.
- 4- Ghias, S., Waqas, M., Khan, M. A., Farooq, U., and Ahmad, I. (2018). Nutritional and therapeutic importance of sunflower oil: A review. *International Journal of Biosciences*, 12(2), 251-259.
- 5-Albanell, E., Plaixats, J., and Cabrero, T. (1988). Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia fetida*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes. *Biology and Fertility of Soils*, 6, 266-269.
- 6-Joseph, P. V. (2019). Efficacy of different substrates on vermicompost production. In M. Larramendy and S. Soloneski (Eds.), *Organic fertilizers - History, production and applications*. IntechOpen.
- 7-Blouin, M., Barrere, J., Meyer, N., Lartigue, S., Barot, S., and Mathieu, J. (2019). Vermicompost significantly affects plant growth: A meta-analysis. *Agronomy for Sustainable Development*, 39, 34.
- 8-Al-Khafaji, A. M.H. H., and K. D. H. Al-jubouri. (2023). Upgrading growth, yield, and folate levels of lettuce via salicylic acid and spirulina, vermicompost aqueous extracts. *Iraqi Journal of Agricultural Sciences*, 54(1). 235-241
- 9-Al-Silmawy, N. A. J. K., and H. A. Abdul-Ratha. (2023). Effect of biofertilizer vermicompost and phosphate fertilizer on growth and

yield of cauliflower (*Brassica oleraceae* Var. botrytis). Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 54(2): 505- 515.

10-elliturk, K. (2018). Vermicomposting in Turkey: Challenges and opportunities in future. Eurasian Journal of Forest Science, 6(4), 32–41

11-Chattpadhyay, A. (2014). Effect of vermiwash and vermicompost on an ornamental flower, *Zinnia* sp. Journal of Horticulture, 1(3), 1000112

12-Sewhag, M. (2020). Yield and yield components of barley as influenced by various combinations of nitrogen fertilizer, vermicompost and biomix. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. 34(3): 1–9.

13-Al-Halfi, D. A. N., and S. S. J. Al-Azzawi (2022). Effect of organic fertilizer sources and chemical fertilization on some soil physical traits and yield of summer squash (*Cucurbita Pepo* L.). Iraqi Journal of Market Research and Consumer Protection 14(2): 74-81.

14-Ahmad A., Aslam Z., Awan T.H., Syed S., Hussain S., Bellitürk K and S. Bashir (2025). Drought stress in wheat: mechanisms, effects and mitigation through vermicompost. Pak. J. Bot., 57(1): 47-60.

15-Hosseinzadeh, S.R., H. Amiri and A. Ismaili. (2018). Evaluation of photosynthesis, physiological, and biochemical responses of chickpea (*Cicer arietinum* L. cv. Pirouz) under water deficit stress and use of vermicompost fertilizer. *J. Integr. Agric.*, 17(11): 2426-2437.

16-Hussein, M. (2023). Performance of N, P and K plant uptake, as affected by application both compost tea, vermicompost tea, and rhizobia for faba bean plant. Menoufia Journal of Agricultural Biotechnology. 8(3): 58-66

17-Imenu, T., A. Tolera, and L. Kinde. (2023). Amalgamated NPS fertilizer on crop performance and nodulation of soybean varieties on acidic soil. Iraqi Journal of Agricultural Sciences. 54(2):399- 412

18-عباس، فادي وسعدية سلوى والشباط حسان وفؤاد وسوف (2025). تأثير التسميد بالفيرمي كمبوست والرش بشاي الفيرمي كمبوست في بعض مؤشرات النمو والإنتاج للقمح القاسي. المجلة السورية للبحوث الزراعية، المجلد 12.

19- Ren W., Xianyue L., Tingxi L., Ning C., Maoxin X., Qi, Q and B. Liu (2025). Controlled-release fertilizer improved sunflower yield and nitrogen use efficiency by promoting root growth and water and nitrogen capacity. *Industrial Crops and Products* 226 (2025) 120671

20-فواز كردعلي، ف.، العين، ف.، وعطار، ج. (2008). تأثير التسميد الآزوتي في إنتاج وامتصاص الآزوت ونوعية الزيت في نبات عباد الشمس. هيئة الطاقة الذرية، قسم الزراعة.

21-Abdul Kader, A., Al-Ali, M., & Al-Hassan, S. (2020). Evaluation of local and introduced sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes under Syrian conditions. *Syrian Journal of Agricultural Research*, 7(2), 115-124.

22-Elsahookie, M. M. and E. E. Eldabas. 1982. One leaf dimension to estimate leaf area in sunflower. *J. of Agron. & Crop Sci.* 151: 199-204.

23-Ali, K.A., S.S. Noraldeem and A.A. Yaseen. (2021). An evaluation study for chlorophyll estimation techniques. *Sarhad Journal of Agriculture*, 37(4): 1458-1465.

24-International Organization for Standardization. (2009). ISO 659:2009. Oilseeds — Determination of oil content (Reference method). ISO. Retrieved from <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/43169/243e7ce26c0f407b8986eaca798f965c/ISO-659-2009.pdf>

25-Atiyeh, R. M., Subler, S., Edwards, C. A., Bachman, G., Metzger, J. D., and Shuster, W. (2002). Effects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil. *Pedobiologia*, 46(5), 731–735.

26-Arancon, N. Q., Edwards, C. A., Bierman, P., Metzger, J. D., and Lucht, C. (2005). Effects of vermicomposts produced from cattle manure, food waste and paper waste on the growth and yield of peppers in the field. *Pedobiologia*, 49, 297-306.

27-Chatterjee, R., and Bandyopadhyay, S. (2013). Effect of vermicompost and vermicompost tea on growth and yield of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Journal of Crop and Weed*, 9(1), 20–25.

28-Edwards, C. A., Arancon, N. Q., and Greytak, S. (2006). Standardization and effects of aerated vermicompost teas on plant growth and disease suppression. *Ohio State University Research Report*.

29-Zaller, J. G. (2007). Vermicompost as a substitute for peat in potting media: Effects on germination, biomass allocation, yields and fruit quality. *Scientia Horticulturae*, 112 (2), 191–199.

استراتيجية جديدة في الإرجاع الأميني المباشر للأدهيدات والكيتونات باستخدام المغنسيوم/ميتانول وحفاز البالاديوم المحمل على الكربون

الباحث: محمد باسل البهره - كلية العلوم - جامعة دمشق

الملخص: لقد قمنا بتطوير نهج جديد وفعال لتصنيع الأمينات الثانوية من خلال الإرجاع الأميني لمركبات الكربونيل مع الأمينات الأولية، تستخدم عملية الإرجاع معدن المغنسيوم في الميتانول، بوجود البالاديوم/كربون كمحفز في درجة حرارة الغرفة، والجدير بالذكر أنه لم تظهر الأمينات الثالثية أو الأغوال كمنتج ثانوي أثناء التفاعل، بالإضافة إلى ذلك، تظل المجموعات الوظيفية الأخرى، بما في ذلك $-OH$ و $-OCH_3$ و $-CH_3$ ، سليمة، فهذه الطريقة فعالة من حيث التكلفة، سريعة نسبياً، سهلة التنفيذ، ومناسبة للإنتاج على نطاق واسع.

الكلمات المفتاحية: الأمينات الثانوية، الإرجاع الأميني، معدن المغنسيوم، مركبات الكربونيل، بالاديوم/كربون.

A novel strategy for direct reduction of aldehydes and ketones using magnesium/methanol and carbon-loaded palladium catalyst

Abstract: We have developed a new and efficient approach for the synthesis of secondary amines through the reductive amination of carbonyl compounds with primary amines. This reduction process employs metallic magnesium in methanol, utilizing palladium /carbon as a catalyst at room temperature. Notably, there is no formation of tertiary amines or alcohols during the reaction. Additionally, other functional groups, including $-OH$, $-OCH_3$, and $-CH_3$, remain undamaged. This method is cost-effective, relatively fast, easily application, and suitable for large-scale production.

Key words: Secondary amines - Reductive amination - Metallic magnesium - Carbonyl compounds - Pd/C.

1- مقدمة:

تلعب الأمينات الثانوية دور هام في التركيب الكيميائي للعديد من المواد الصيدلانية والمبيدات الزراعية، وتتجلى أهميتها في الكيمياء المعاصرة من خلال دورها الأساسي في تكوين العديد من المركبات النشطة بيولوجياً.

غالباً ما تفتقر الطرق التقليدية لاصطناع الأمينات الثانوية إلى الانتقائية، فطريقة الألكلة للأمينات الأولية من خلال آلية SN_2 ، حيث تعمل الأمينات الأولية كنيوكليوفيلات في تفاعلات الاستبدال النيوكليوفيلية مع هاليدات الألكيل، مما ينتج عنه أمينات ثانوية، لكن ينشأ تحدٍ كبير من الميل إلى المزيد من الألكلة overalkylation، مما يؤدي إلى تكوين أمينات ثالثة ورباعية، وهذا يستلزم خطوات تنقية إضافية، وبالتالي تزيد تكلفة الإنتاج.[1]

يمكن اصطناع الأمينات الثانوية بشكل بديل من خلال استخدام مجموعات الحماية، يتضمن هذا النهج حماية الأمينات من خلال زمرة السيلينيوم، حيث يتم معالجة الأمين بكلوريدات السيلينيوم، مثل كلوريد ثلاثي إيثيل السيلينيوم (TES-Cl) أو كلوريد ثلاثي ميثيل السيلينيوم (TMS-Cl)، في وجود أساس، تعمل الأسس على تعزيز تنشيط الأمين، وبالتالي تسهيل تكوين إيثر السيلينيوم الأكثر استقراراً، والذي يحمي الأمين بشكل فعال من التفاعلات الجانبية غير المرغوب فيها أثناء خطوات التصنيع اللاحقة، على الرغم من أنه يمكن إزالة مجموعة الحماية السيلينيوم لاحقاً، مما يؤدي إلى انتقائية عالية للأمين الثانوي المطلوب، إلا أن هذه المنهجية تتميز بتكاليف مرتفعة وضرورة خطوات إجرائية إضافية.[2]

ورغم أن الطرق السابقة في تصنيع الأمينات الثانوية أثبتت فعاليتها، فإنها كثيراً ما تتطلب استخدام حجوم كبيرة من الكواشف الكيميائية، الأمر الذي يؤدي إلى إنتاج كميات كبيرة من النفايات waste (إعادة تدوير المذيبات وزمر الحماية وتنقيتها) وتؤكد التطورات الأخيرة في طرائق الكيمياء الخضراء Green Chemistry Methods المستخدمة في تصنيع الأمينات الثانوية على العواقب البيئية الخطيرة المرتبطة بهذه التقنيات التقليدية، الأمر الذي يؤكد على ضرورة تطوير بدائل أكثر استدامة[3].

ظهرت تطورات حديثة استجابة للتحديات السائدة في الكيمياء التركيبية، تؤكد بشكل خاص على تبني الأنظمة الحفزية، وقد اكتسب استخدام محفزات المعادن الانتقالية اهتماماً

كبيراً، [5,4] لأن هذه المحفزات تعمل بشكل فعال في ظل ظروف أكثر اعتدالاً، وبالتالي تقلل من الحاجة إلى الكواشف المفرطة وزمر الحماية، لا يعمل هذا النهج على تحسين انتقائية التفاعل فحسب، بل يخفف أيضاً من توليد المنتجات الثانوية غير المرغوب فيها مثل الأمينات التالفة. [6,7]

استناداً إلى هذه الاعتبارات، قمنا بدراسة المغنسيوم المعدني كعامل إرجاع محتمل، يُعرف المغنيزيوم في الميتانول منذ فترة طويلة بأنه يُظهر فعالية كعامل مناسب للعديد من التفاعلات الإرجاع، وكانت أولى الاكتشافات التي أظهرت فائدة المغنيزيوم والميتانول كعامل نقل إلكترون نتائج أبحاث العالم زيشمايستر [8].



يُعتبر استخدام المغنسيوم كعامل إرجاع في عملية إرجاع الأمينات لتصنيع الأمينات الثانوية موضوعاً ذا أهمية كبيرة، نظراً لفعاليته من حيث التكلفة وكذلك الظروف المعتدلة التي يتطلبها التفاعل، هذه الخصائص تجعل من المغنسيوم خياراً مناسباً للتطبيقات الصناعية، حيث يساهم في تحقيق كفاءة اقتصادية وعملية دون الحاجة إلى شروط قاسية، [9] علاوة على ذلك، من الممكن تحقيق تحسينات في كفاءة وإنتاجية التفاعلات المحفزة بالبلاديوم، مما يشير إلى إمكانية التوصل إلى منهجيات جديدة في اصطناع مشتقات الأمين المعقدة. [10]

تشير الدراسات على فعالية استراتيجيات الإرجاع الأميني في الاصطناع العضوي، وضرورة الاستمرار في البحث للوصول لمزيد من التحسين والتطبيقات الأوسع في الاصطناع العضوي.

2- هدف البحث:

الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو تطوير منهجية مباشرة وفعالة لطريقة الإرجاع الأميني للألدهيدات والكيلونات باستخدام نظام المغنسيوم /ميتانول بالاشتراك مع البلاديوم الحفزي على

الكربون (Pd/C)، وتحسين شروط التفاعل لزيادة المردود والانتقائية، عبر مختلف الركائز لتحقيق طريقة آمنة صديقة للبيئة وفعالة في الاصطناع العضوي.

3- مواد وطرائق البحث:

جميع الكواشف والمواد الكيميائية المستخدمة في الاصطناع العضوي الألدھيدات والكيتونات والأأمينات من شركة Merck، Aldrich وقد استخدمت مباشرة بدون تنقية.

حفاز بالاديوم محمل على الكربون من شركة Sigma-Aldrich مواصفاته: pH : 6 – 7, ACTIVATED(10% Pd)

الكثافة: 3.71 g/cm³ ، معدن المغنيزيوم من شركة Sigma-Aldrich مواصفاته: الكثافة: 1.74 g/cm³، الميتانول: من شركة Merck نقاوة 99.99%.

الاجهزة المستخدمة: قياس نقاط الانصهار باستخدام جهاز Reichert Thermovar، أطياف الرنين المغناطيسي النووي (NMR) باستخدام مطياف Bruker AC-300، بتردد 300MHz للكشف عن البروتون ¹H مع استخدام CDCl₃ كمذيب واستخدام رباعي ميثيل السيلان (TMS) كمعيار داخلي، التعبير عن الإنزياحات الكيميائية بوحدات δ أجزاء في المليون، وثابت الاقتران (J) بالهرتز، أطياف كروماتوغرافيا الغازية GC باستخدام جهاز Varian model 3400 مزودة بعمود شعري غير قطبي DB-5.

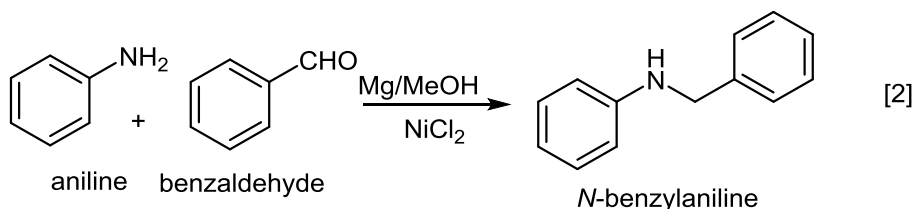
تفاعل اصطناع نموذجي: تم إضافة البنزالدهيد (0.106 g, 1.0 mmol) والأنيلين (0.930 g, 1.0 mmol) في حوجة التفاعل، مصحوباً بكمية محفزة من NiCl₂ (1 mmol) و Pd/C 5%.

ثم يحريك المزيج الناتج في درجة حرارة الغرفة لمدة 30min، وبعد ذلك تم تحديد كمية التحويل إلى-N- بنزليدين أنيلين باستخدام مطيافية الرنين المغناطيسي النووي ¹H ، بعد ذلك يتم إضافة المغنيزيوم (10mmol) والميتانول (15ml) في خليط التفاعل مع الحفاظ على التحريك عند نفس درجة الحرارة، وبعد التحقق من اكتمال التفاعل من خلال مراقبة كروماتوغرافيا الطبقة

الرقيقة (TLC) يتم استخلاص باستخدام ثنائي إيثيل الأثير (30 mL × 3)، و تبخير المذيب، ثم التنقية عبر كروماتوغرافيا الطبقة الرقيقة على هلام السيليكا (Hexane: AcOEt 5:1)، المنتج النهائي أصفر شاحب اللون درجة الانصهار 37-40 °C المردود (0.170 g ; yield 93%).

4- النتائج ومناقشتها:

في هذه الدراسة، استخدمت طريقة الإرجاع الأميني للأنيلين ومشتقاته باستخدام الألدهيدات والكتونات. وتحفيز هذا التفاعل بواسطة البلاديوم على الكربون (Pd/C) ويستخدم المغنيزيوم في الميثانول (Mg/MeOH) كمصدر للهيدروجين Hydrogen donor، لتحسين شروط التفاعل، قمنا بدراسة التفاعل بين الأنيلين - و البنزالدهيد، وينسب مولية متكافئة، العامل المرجع Mg/MeOH بالتزامن مع الكميات التحفيزية من كلوريد النيكل (NiCl₂) و Pd /C 5% وفق التفاعل التالي:



تتضمن عملية الارجاع الأميني المباشر خطوتين رئيسيتين:

الخطوة الأولى: التكوين الأولي للإيمين (المركب الانتقالي) من خلال تكاثف الأمين الأولي مع مركب الكربونيل، والذي يتم تسهيله عن طريق إزالة الماء في وجود محفز من حمض لويس، وهذه الخطوة بالغة الأهمية لأنها تمهد الطريق للاختزال اللاحق.

الخطوة الثانية: إرجاع الإيمين الناتج للحصول على الأمين الثانوي النهائي، حيث يسهل توليد الهيدروجين مباشرة من المغنيزيوم /الميثانول عملية الارجاع، ويلعب محفز البلاديوم دوراً محورياً في هذه العملية، حيث يعزز كفاءة نقل الهيدروجين ويعزز التفاعل الكلي.

في التجارب الأولية، قمنا بتقييم تأثير أحماض لويس مختلفة على تكوين الإيمين من خلال مطيافية الرنين النووي المغناطيسي للبروتون ^1H NMR، من خلال مقارنة الانزياح الموافق للرابطة $-\text{CH}$ في كل من الألدهيد والإيمين ، الموضحة في الجدول 1.

n	$\text{MCl}_2(1\text{mmol})$	yield (%)
1	FeCl_2	80
2	ZnCl_2	75
3	NiCl_2	100

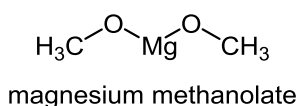
جدول رقم 1 : تأثير حمض لويس على نسبة التحويل من أمين أولي إلى إيمين

أظهرت النتائج أن كلوريد الزنك ZnCl_2 أعطى أقل نسبة تحويل، بينما كلوريد النيكل NiCl_2 أعلى إنتاجية، وبالتالي تم استخدامه في التجارب اللاحقة. في المجموعة الثانية من التجارب، درسنا تأثير النسبة المغنيزيوم المثلّي وتأثيرها على تفاعل الإرجاع الجدول 2.

n	$\text{Mg}(\text{mmol})$	yield (%)
1	5	60
2	10	100
3	15	92

جدول رقم 2 : تأثير نسبة المغنسيوم في تفاعل الإرجاع للإيمين المتشكل

أشارت النتائج باستخدام 5 mmol من المغنسيوم لم يكن هناك إنتاج كافٍ من الهيدروجين، وهو ما ثبت أيضاً باستخدام 10 mmol من المغنيزيوم تصل نسبة التحويل إلى 100%. بينما أظهرت الزيادة الإضافية في المغنسيوم 15 mmol انخفاضاً في تفاعل الإرجاع، بسبب ضعف نشاط جزيئات المغنسيوم نتيجة الزيادة الكبيرة لتشكل ميثانولات المغنسيوم $\text{Mg}(\text{OMe})_2$ كبيرة الحجم. [11]



تُظهر جسيمات المغنيزيوم الأصغر، وخاصة تلك الموجودة في نطاق $0.1 - 0.5\mu m$ ، معدل تحويل 100% يمكن أن يُعزى هذا الأداء الأمثل إلى مساحة السطح الأكبر التي توفرها الجسيمات الصغيرة، مما يعزز التفاعل بين المغنيزيوم والميثانول، مما يؤدي إلى نقل الهيدروجين بكفاءة أكبر.

على العكس من ذلك، أدت جسيمات المغنيزيوم الأكبر، في نطاق $0.75 - 1.5\mu m$ ميكرومتر، إلى معدل تحويل أقل بنسبة 75% فقط، يمكن تفسير هذه الظاهرة بعاملين رئيسيين:

- انخفاض مساحة السطح: تتمتع الجسيمات الأكبر بنسبة مساحة سطح إلى حجم أصغر، مما يقلل من مساحة التلامس المتاحة للتفاعل مع الميثانول، وبالتالي يقلل من معدل التفاعل الإجمالي.
- تكوين التكتلات: تميل جزيئات المغنيزيوم الأكبر إلى تكوين كميات كبيرة من تكتلات ميثانولات المغنيزيوم، لا تعيق هذه التكتلات الصلبة التلامس المباشر بين المغنيزيوم المتبقي والميثانول فحسب، بل قد تعمل أيضاً كحواجز مادية، مما يمنع نقل الهيدروجين الفعال [12].

علاوة على ذلك، فإن المعدل الظاهري لتكوين ثنائي الهيدروجين سيعتمد على التوافر الكلي لمواقع المغنيزيوم غير المتفاعلة، والتي ستزداد عموماً مع زيادة مساحة السطح، نفترض أن كلوريد النيكل لا يسهل تكوين مركب الإيمين الوسيط، بل إنه يعدل البيئة الفيزيائية الدقيقة للمغنيسيوم، مما يسهل اقتراب الركيزة العضوية، كما يعمل كمحفز لتعزيز إنتاج الهيدروجين.

في غياب محفز البالاديوم/الكربون، لم يحدث أي اختزال، باستثناء تطور الهيدروجين، في حين أظهرت نسبة 0.5mol% من الحفاز تحويلاً كاملاً بنسبة 100%، موضحاً في الجدول رقم 3.

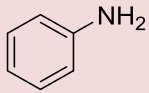
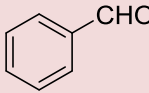
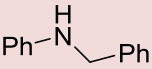
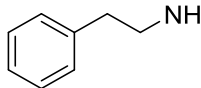
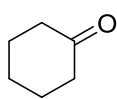
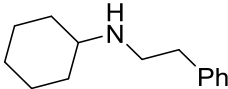
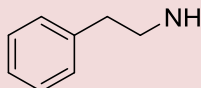
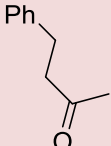
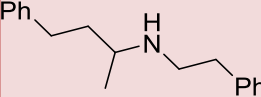
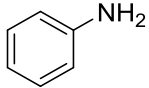
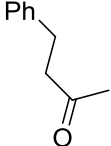
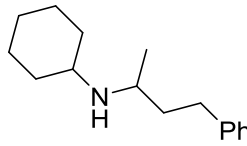
n	Pd(mol%)	yield (%)
1	None	0
2	0.05	80
3	0.50	100
4	1.00	100

جدول رقم 3 : تأثير نسبة الحفاز Pd/C على نسبة التحويل

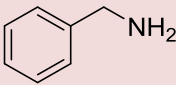
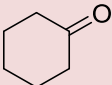
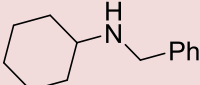
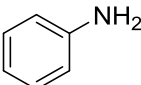
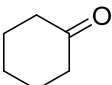
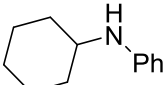
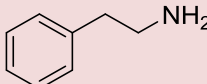
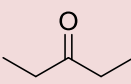
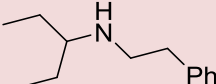
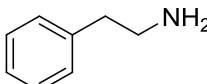
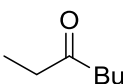
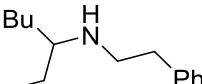
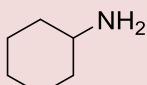

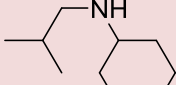
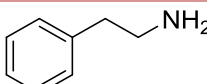

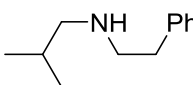
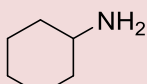
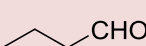
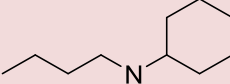
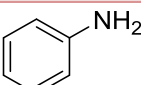

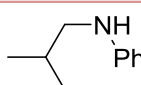
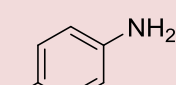
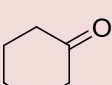
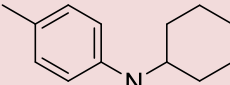
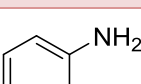
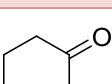
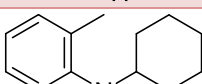
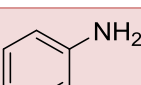
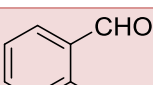
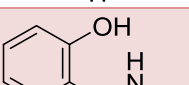
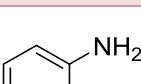
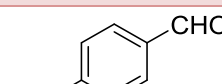
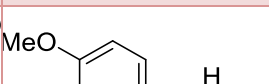
في حين أظهر وجود الحفاز بنسبة 0.05mol% تحويلاً بنسبة 80% وهذا يشير بوضوح إلى وجود عدم كفاية في كمية المحفز لإكمال التفاعل، بينما زيادة النسبة إلى 1.0mol% لم تظهر تأثير على نسبة التحويل.

لدراسة تأثير التفاعل بالبنية للأمين الأولي وتأثير المتبادلات أيضاً بنية الألدهيد أو الكيتون وتأثير المتبادلات على مردود التفاعل، تم اختزال العديد من الأمينات ومركبات الكربونيل، يلخص الجدول 4 النتائج:

جدول رقم 4 : نتائج الإرجاع الأميني باستخدام مركبات كربونيل مختلفة

n	Amine	Carbonyl	product	Yield (%)	m.p or b.p (C°) reported - observed
1				93	37 ^[13] 37
2				79	199 ^[14] 200
3				70	172 ^[15] 175
4				65	170 ^[16] 172

استراتيجية جديدة في الإرجاع الأميني المباشر للألدهيدات والكتونات باستخدام المغنزيوم/ميتاتول وحفاز البالاديوم المحمل على الكربون

5				65	218 ^[17] 118
6				75	192 ^[18] 193
7				48	183 ^[19] 184
8				45	135 ^[20] 135
9				72	228 ^[21] 230
10				75	236 ^[22] 236
11				52	185 ^[23] 210
12				58	154 ^[24] 155
13				81	182 ^[25] 182
14				60	228 ^[26] 230
15				96	112 ^[27] 113
16				93	48 ^[28] 49

يؤدي التفاعل بين الأنيلين ومركبات الكربونيل إلى تكوين الإيمين imines أسس شيف من خلال الهجوم النكليوفيلي المحبب للمجموعة الأمينية للأنيلين على ذرة الكربون الكربونيل، يتأثر مردود هذه التفاعلات بالبنية والمستبدلات الموجودة في مركبات الكربونيل.

كان التركيز الأساسي للتحقيق هو تقييم تأثير هياكل الألدريد والكيون المختلفة مع الحفاظ على الأنيلين كأمين أساسي ثابت، تؤكد النتائج التي تم الحصول عليها على اختلافات المردود بناءً على الخصائص الإلكترونية والفراغية لمركبات الكربونيل:

1. الألدريدات العطرية المردود 93% (رقم 1 و 16) يمكن أن يُعزى المردود الملحوظ المرتبط بالألدريدات العطرية إلى تثبيت الترافق، حيث يعمل النظام العطري الغني بالإلكترونات على تثبيت الشحنة الموجبة على ذرة الكربون الكربونيل، مما يزيد من محبتها للإلكترون ويجعلها أكثر عرضة للهجوم المحب للنواة بواسطة الأنيلين.

2. الكيوتونات الحلقية المردود 75% (الرقم 6) المردود المنخفض الملحوظ مع الكيوتونات الحلقية يرجع السبب الأول إلى العائق الفراغي والاستقرار المتأصل في بنية الكيوتون، الكيوتونات الحلقية يكون كربون الكاربونيل أقل كهروسلبية مقارنة بالألدريدات، مما يؤثر على تفاعليته ويؤدي إلى انخفاض المردود.

3. الألدريدات الأليفاتية المتفرعة المردود 58% (الرقم 12) يتأثر انخفاض العائد في الألدريدات الأليفاتية المتفرعة بالعائق الفراغي المرتبط بالتفرع. بالإضافة إلى ذلك، فإن الافتقار إلى استقرار الطنين الملحوظ في هذه الألدريدات مقارنة بنظيراتها العطرية يساهم بشكل أكبر في انخفاض المردود.

4. الألدريدات العطرية أورثو هيدروكسي: 96% (الرقم 15) بارا هيدروكسي: 93% (الرقم 16) وجود مجموعة هيدروكسي في موضع أورثو أ، بارا يعزز بشكل كبير من المردود بسبب

ستقرار الحالة الانتقالية، ويتم تعزيز هذا الاستقرار بشكل أكبر من خلال تأثيرات الطنين، مما يزيد من الكهرسلبية لكربون الكربونيل.

يقدم هذا القسم تحليلاً مقارناً لتأثير الأمينات المختلفة وركائز الكربونيل على المردود في التفاعلات، تأثير متبادلات الأمين على مردود التفاعل ودراسة تأثير الأمينات المختلفة على التفاعل مع تثبيت الكيتون الحلقي سيكلوهكسانون:

1. تأثير وجود متبادل على الأنيلين: أنيلين بارا-ميثيل: المردود 81% (الرقم 13) أنيلين: المردود 75% (الرقم 6) أنيلين أورثو-ميثيل: المردود 60% (الرقم 14) تشير النتائج إلى أن أنيلين بارا-ميثيل مردوده أعلى مقارنة بالأنيلين. ويمكن أن يعزى هذا الارتفاع إلى انخفاض العائق الفراغي عند موضع البار، مما يسمح بتفاعلات إلكترونية أكثر ملاءمة أثناء الهجوم على كربون الكاربونيل في الكيتون الحلقي، وعلى النقيض من ذلك، يتعرض أنيلين أورثو-ميثيل، مع مجموعة الميثيل المجاورة للأمين، لعائق فراغي كبير، مما يعيق اقتراب النيتروجين من الكاربونيل ويؤدي إلى انخفاض المردود.

2. تأثير وجود فاصل بين حلقة البنزن والزمرة الأمينية: فينيل ميثيل أمين المردود 79% (الرقم 2) وهو ما يفوق المردود من الأنيلين ولكنه أقل من إيثيل فينيل أمين المردود 65% (الرقم 5). ويؤكد هذا الاتجاه أيضاً أن العوامل الفراغية تلعب دوراً حاسماً؛ فعندما يتم تقليل العوائق الفراغية، يصبح التفاعل أكثر فعالية.

3. الكيتونات العطرية مقابل الأليفاتية: الكيتونات الأليفاتية العطرية: المردود 70% (الرقم 3) و الكيتونات الأليفاتية: المردود 45% و 48% (الرقم 7 و 8) فالكيتونات الأليفاتية أقل بشكل ملحوظ، مما يعكس زيادة استقرار البيئة الإلكترونية للكربونيل، مما يقلل من قابليته للهجوم النووي. إن العائق الفراغي الذي تفرضه المجموعات الأليفاتية الضخمة يزيد من تعقيد التفاعل، مما يؤدي إلى انخفاض المردود بشكل كبير.

4. الأداء المقارن للألدهيدات: ألدهيد إيزوبوتيل مع إيثيل فينيل أمين: المردود 75% (الرقم 10) و مقارنة مع فينيل إتان أمين: المردود 58% (الرقم 12) تكشف النتائج أن الألدهيدات أكثر تفاعلية بشكل عام من الكيتونات بسبب مجموعة الكربونيل الأقل إعاقة فراغياً، مما يسهل الهجمات النكليوفيلية الأكثر كفاءة، تساهم ذرات الكربون الإضافية بين مجموعات الأمين والفينيل في إيثيل فينيل أمين في تعزيز الاستقرار والمردود مقارنة بالأنيلين.

- دراسة تأثير الكيتونات والألدهيدات على التفاعل باستخدام السيكلوهكسيل أمين: الكيتون الأليفاتي العطري المردود 65% (الرقم 4) إن ارتفاع محبة الكيتونات العطرية للإلكترونات بسبب استقرار الطنين، مما يسهل الهجوم النووي بواسطة الأمين، مثال انخفاض مردود التفاعل مع ألدهيد أليفاتي خطي ألدهيد بوتيل المردود 52% (الرقم 11).

على النقيض من ذلك، أعطى تفاعل مع ألدهيد بوتيل الخطي 52% فقط، يمكن أن يعزى المردود المنخفض إلى كل من العوامل الفراغية والتأثيرات الإلكترونية المحتملة، يوفر الهيكل الخطي عائقاً فراغياً أقل مقارنة بنظيراته المتفرعة؛ ومع ذلك، فإنه يفتقر إلى تثبيت الطنين، إن غياب مثل هذا الاستقرار أدى إلى انخفاض المردود.

5- الاستنتاجات والتوصيات:

في هذه الدراسة، نجحنا في تطوير طريقة جديدة وفعالة لاصطناع الأمينات الثانوية من خلال الإرجاع الأميني لمركبات الكربونيل مع الأمينات الأولية، ويتمثل جوهر هذا النهج في استخدام المغنيزيوم المعدني في الميثانول، إلى جانب البالاديوم/الكربون كمحفز، وكل ذلك يتم في درجة حرارة الغرفة، تتمثل إحدى المزايا المهمة لعملية الاختزال هذه في التكوين الانتقائي للأمينات الثانوية، دون ظهور أي منتجات ثانوية غير مرغوب فيها مثل الأمينات الثلاثية أو الكحولات أثناء التفاعل. هذه الخصوصية ضرورية للحفاظ على سلامة منتجات الأمين المطلوبة. وعلاوة على ذلك، تظهر الطريقة قوة في وجود مجموعات وظيفية مختلفة، بما في ذلك زمر الهيدروكسيل OH- والميثوكسي OCH_3 - الميثيل CH_3 - والتي تظل غير متأثرة طوال التفاعل، تؤكد الكفاءة الإجمالية لهذه الطريقة على فعاليتها من حيث التكلفة والسرعة والبساطة، مما يجعلها مستقبلاً في الاصطناع العضوي للأمينات الثانوية لاستخدام أوسع في التطبيقات الصناعية.

لمزيد من تحسين تخليق الأمينات الثانوية من خلال تفاعلات التكثيف، يتم اقتراح التوصيات التالية:

- استخدام الألدهيدات المتفرعة: نظراً لعوائدها المواتية، يجب إعطاء الألدهيدات المتفرعة الأولية في استراتيجيات التصنيع المستقبلية، ويمكن أن تكون خصائصها الفراغية الفريدة مفيدة في زيادة كفاءة التفاعل النكليوفيلي.
- استكشاف الكيتونات البديلة: في حين تظهر الكيتونات العطرية نتائج واعدة، فإن استكشاف هياكل الكيتون الأخرى، بما في ذلك المتغيرات المتفرعة، قد يؤدي إلى رؤى إضافية وتفاعلات محسنة بشكل أكبر.
- الدراسات الحركية: قد يوفر إجراء دراسات حركية مفصلة حول معدل التفاعل مع ركائز مختلفة رؤى أعمق في الآليات التي تعمل، مما يساعد في التنبؤ بالعائدات بشكل أكثر دقة بناءً على بنية مركب الكربونيل.

من خلال تنفيذ هذه التوصيات، يمكن تعزيز كفاءة وفعالية اصطناع الأمين الثانوي في الكيمياء العضوية الاصطناعية، مما يساهم في تطوير منتجات كيميائية أكثر تنوعاً وقيمة، ولا تعمل طريقة التوليف المبتكرة هذه على تعزيز مجموعة الأدوات المتاحة لاصطناع الأمينات الثانوية فحسب، بل تساهم أيضاً في التقدم المستمر في الكيمياء الخضراء، وتعزيز الممارسات المستدامة في التصنيع العضوي.

6- المراجع

1. CAREY, F 2007- Advanced Organic Chemistry: Part A: Structure and Mechanisms Springer, 5th Edition, United States, p 752.
2. GRENE, W 2007 Protective Groups in Organic Synthesis Wiley 4th Edition P 800.
3. SMITH, J 2023 - Green Chemistry Approaches in the Synthesis of Secondary Amines Journal of Sustainable Chemistry vol. 12, no 3, 210-220.
4. ZHANG, J 2024 - Catalytic Continuous Reductive Amination with Hydrogen in Flow Reactors Chem.CatChem 16(11).
5. BROWN, J 2023 - Catalytic Methods for the Synthesis of Secondary Amines: A Comprehensive Review Chemical Reviews, vol 115, no. 4, pp. 330-350.
6. BERDINI, J V 2012 - A Modified Palladium-Catalyzed Reductive Amination Procedure Tetrahedron 58(28):5669 - 5674
7. XANG, J 2020 - Transition-Metal-Catalyzed Reductions of Carbonyl Compounds: A Review Chem. Soc. Rev, 49, 1, PP.123-163.
8. MUMAMMAD, O 2008 - Palladium/Carbon Catalyzed Hydrogen Transfer Reactions using Magnesium/Water as Hydrogen Donor Catalysis Letters 125(1):46-51.
9. ZHU, D 2020 - Magnesium as a Reducing Agent in Organic Synthesis: Applications in the Synthesis of Amines Chemical Reviews, 120(4) PP.1234-1260.
10. KNAUS, T 2012 - Recent Advances in the Pd-Catalyzed Synthesis of Amines Synthesis, 44(2), PP163-173.
11. GOWAN, K 2008 Magnesium Compounds in Organic Synthesis Wiley, 1st Edition, P820.

12. ABBOT, K 2012 - Effects of Particle Size on the Reactivity of Magnesium in Chemical Reactions Journal of Materials Chemistry, Volume: 22 Pages: 12345-12354.
13. KAWAKAMI,T 1995 Reactions of Magnesium with Alcohols: Mechanistic Studies and Synthesis of Magnesium Alkoxides Journal of Organic Chemistry, 60, 2677-2682.
14. HARRIS, D 2009 - Characterization of N-phenethylcyclohexanamine and Related Compounds Elsevier Journal of Chemical Thermodynamics, vol. 41, no. 2, pp. 203-210.
15. RONG, J 2013 - Synthesis and Characterization of N-Phenethyl-4-phenylbutan-2-amine: A New Potential Psychoactive Substance Elsevier Forensic Science International, vol. 230, no. 1-3, pp 150-156..
16. DOLEZEL, P 2014 - Synthesis and Physicochemical Properties of N-(4-phenylbutan-2-yl)cyclohexanamine and Related Compounds Wiley European Journal of Organic Chemistry, vol.no. 16, pp. 3510-3520.
17. XIE, Y 2018 -Thermodynamic and Kinetic Study of N-Benzyl cyclohexanamine Molecules, vol. 23, no. 4, 2018, p. 847.
18. VASUVEDAN, S 2016 - Thermodynamic Properties of N-Cyclohexylaniline: Experimental Measurements and Theoretical Predictions. Elsevier Journal of Chemical Thermodynamics, vol. 92, pp. 184-192.
19. CZECHOVSKY, J 2021 - Synthesis, Structure, and Thermochemical Properties of N-Phenethylpentan-3-amine Elsevier Journal of Molecular Structure, vol. 1234.
20. MAYNARD, R 2019 - thermodynamic Properties of N-Phenethylheptan-3-amine: Experimental and Computational Study Journal of Chemical Physics, vol. 150, no. 5.

21. HOFFMAN, R 2017 - Synthesis and Characterization of N-Isobutyl Derivatives of Cyclohexanamine: Structural and Thermodynamic Properties Journal of Organic Chemistry, vol. 82, no. 14, pp. 6971-6980.
22. SANTOS, M 2018 - Thermal and Spectroscopic Characterization of Substituted Amines: 2-Methyl-N-phenethylpropan-1-amine Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 134, no. 3, pp. 1275-1282.
23. ALDRICH, C 2021- Cyclohexanamine, N-butyl." Aldrich Chemical Company, Inc.
24. SHIRLEY, D 2017 - Thermodynamic Properties of N-Isobutyl aniline Journal of Chemical Thermodynamics, vol. 113, pp. 140-145.
25. JIANG, Z 2019 - Thermal Properties and Phase Transitions of N-Cyclohexyl-4-methylaniline: A Study of Phase Change Materials Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 135, no. 1, pp. 145-153.
26. WONG, W 2019 - Thermal Analysis of N-Cyclohexyl-2-methylaniline and Its Derivatives Journal of Chemical & Engineering Data, vol 64, no. 3, pp. 1019-1026.
27. GONZALEZ,J 2020 - Synthesis and Characterization of 2-((Phenylamino)methyl)phenol Derivatives: Thermodynamic Properties and Melting Points Journal of Organic Chemistry, vol. 85, no. 12, pp. 7620-7629.
28. KHAN, M 2018 Synthesis and Characterization of N-(4-Methoxybenzyl)aniline Derivatives: Study of Thermal Properties Asian Journal of Chemistry, vol. 30, no. 6, pp. 1355-1360.

أطياف التحليل:

