

# مجلة جامعة البعث

سلسلة العلوم الأساسية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 44 . العدد 12

1443 هـ - 2022 م

الأستاذ الدكتور عبد الباسط الخطيب

رئيس جامعة البعث

المدير المسؤول عن المجلة

رئيس هيئة التحرير	أ. د. ناصر سعد الدين
رئيس التحرير	أ. د. درغام سلوم

مديرة مكتب مجلة جامعة البعث

بشرى مصطفى

عضو هيئة التحرير	د. محمد هلال
عضو هيئة التحرير	د. فهد شريباتي
عضو هيئة التحرير	د. معن سلامة
عضو هيئة التحرير	د. جمال العلي
عضو هيئة التحرير	د. عباد كاسوحة
عضو هيئة التحرير	د. محمود عامر
عضو هيئة التحرير	د. أحمد الحسن
عضو هيئة التحرير	د. سونيا عطية
عضو هيئة التحرير	د. ريم ديب
عضو هيئة التحرير	د. حسن مشرقي
عضو هيئة التحرير	د. هيثم حسن
عضو هيئة التحرير	د. نزار عبشي

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة البعث

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

. هاتف / فاكس : ++ 963 31 2138071

. موقع الإنترنت : [www.albaath-univ.edu.sy](http://www.albaath-univ.edu.sy)

. البريد الإلكتروني : [magazine@ albaath-univ.edu.sy](mailto:magazine@albaath-univ.edu.sy)

**ISSN: 1022-467X**

## شروط النشر في مجلة جامعة البعث

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
  - طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
  - 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 وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:  
آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة . 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 البعث:

1. دفع رسم نشر (20000) ل.س عشرون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (50000) ل.س خمسون 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 (3000) ل.س ثلاثة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

## المحتوى

الصفحة		
32-11	أسيل العبيد د.فانز حزواني	اصطناع ودراسة طيفية لمعقدات الإيميدازول وبارا نثرو فنيل إيميدازول مع بعض العناصر الانتقالية ( $Co^{++}, Cu^{++}$ )
68-33	بتول السماعيل د.جورج غندور د.محمود الحمدان د.حسين سليمان	أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا ( <i>Glycine max L.</i> ) ضمن ظروف محافظة حمص
102-69	بلال علي د.عبدالله رستناوي د.سليمان ديبو	طريقة لتقدير العمر التشغيلي الآمن لمحطة استطاعة نووية وآليات إطالة عمر المنشأة
126-103	بنان كاخيا د. محمد العلي	نظرية ميلنيكوف وتطبيقها على معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة
166-127	حامد برهوم د.عبدالله رستناوي د.سليمان ديبو	دراسة نظرية وتجريبية لتأثير تركيز الإلكترونات في المعادن على المقطع العرضي لتشتت الفوتون





# اصطناع ودراسة طيفية لمعقدات الإيميدازول وبارا نتر و فنيل إيميدازول مع بعض العناصر الانتقالية (Co<sup>++</sup>, Cu<sup>++</sup>)

\* أسيل العبيد ، \*\* د. فائز حزواني

## ملخص البحث

تم في هذا البحث اصطناع مرتبطة (NAI) من مشتقات الإيميدازول (بارا نتر و فنيل أزو إيميدازول)، و معقدات معدنية لكل من (NAI) و الإيميدازول مع معدني النحاس و الكوبالت، فكانت نسبة الارتباط (1:1) عند استخدام المرتبطة (NAI)، و (1:2) (إيميدازول: معدن) عند استخدام الإيميدازول، مما أدى إلى تشكل معقدات معدنية أحادية النوى .

دُرست بعض الخصائص الفيزيائية والطيفية للمرتبطة (NAI)، والمعقدات المصنعة بواسطة مطيافية الأشعة ما تحت الحمراء (FT-IR)، ومطيافية الرنين النووي المغناطيسي الكربوني والبروتوني ومطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-visible)، وبينت نتائج هذه الدراسة أنها كانت متفقة مع الصيغة المقترحة لهذه المركبات.

كلمات مفتاحية: إيميدازول، معقدات أحادية النوى، أزو إيميدازول، نسبة ارتباط

(\* طالبة ماجستير - قسم الكيمياء - كلية العلوم - جامعة البعث - حمص - سوريا

(\*\*) أستاذ مساعد في الكيمياء اللاعضوية في قسم الكيمياء - كلية العلوم - جامعة البعث - حمص - سوريا

# Synthesis and Spectral Study of imidazole and 4-(nitroPhenyl azo)Imidazole Complexes with Some Transition Metal [ $\text{Co}^{\text{II}}, \text{Cu}^{\text{II}}$ ]

<sup>1)</sup>Aseel Alobeed , <sup>2)</sup> faez hazwani

## Abstract

In this research, ligand (NAI) (para-nitrophenyl azo imidazole) was prepared, and metal complexes for each of (NAI) and imidazole with copper and cobalt, the ligand ratio was (1:1) when using linked (NAI) , and (2:1) (imidazole: a metal) when imidazoles were used, which led to the formation of mono dentate metal complexes.

Some of the physical and spectroscopic properties of the NAI and the synthetic complexes were studied by infrared (FT-IR), carbon and proton nuclear magnetic resonance spectroscopy and UV-visible spectroscopy, and the results of this study showed that they were in agreement with The ulcerated formulation of the prepared complexes..

**Keywords:** Imidazole, Azo Imidazole, metal complexes, ligand ratio

---

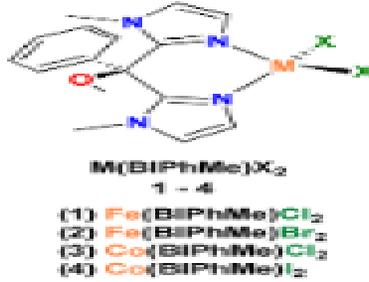
1) Master student at Albaath university, faculty of science, department of inorganic chemistry.

2) Prof. at Albaath university, faculty of science, department of inorganic chemistry.

## 1- مقدمة:

احتلت المركبات الحلقية غير المتجانسة مكانة بارزة بين الفئات المختلفة من المركبات العضوية، وذلك بفضل أنشطتها البيولوجية المتنوعة وفعاليتها الكيميائية [1]. تعتبر مركبات الإيميدازول من المركبات الحلقية غير المتجانسة والنشطة بيولوجياً [2]، والتي تحظى باهتمام كبير لتطبيقاتها البيولوجية والسريرية المتنوعة، مما دفع الباحثون إلى اصطناع مجموعة متنوعة من مشتقات الإيميدازول، وتشخيصها بحثاً عن أنشطتها البيولوجية المختلفة كمضادات للسرطان، والجراثيم، ولفيروس نقص المناعة البشري، و لالتهابات، لمرض السكري [3-6]، ويعد الإيميدازول أحد مكونات الهستامين والهستيدين [7-8].

في عام 2014 تم من قبل الباحث Eric ومجموعته اصطناع مرتبطة (BIPhMe) bis(1-methylimidazol-2-yl)phenylmethoxymethane ومن ثم تعقيدها مع أيوني  $Fe^{II}$  و  $Co^{II}$  وفق الشكل (1)، حيث استخدمت هذه المعقدات في أجهزة الاستشعار اللونية لاكتشاف إطلاق غازات أكسيد الأزوت من محاليل التفاعل [9].



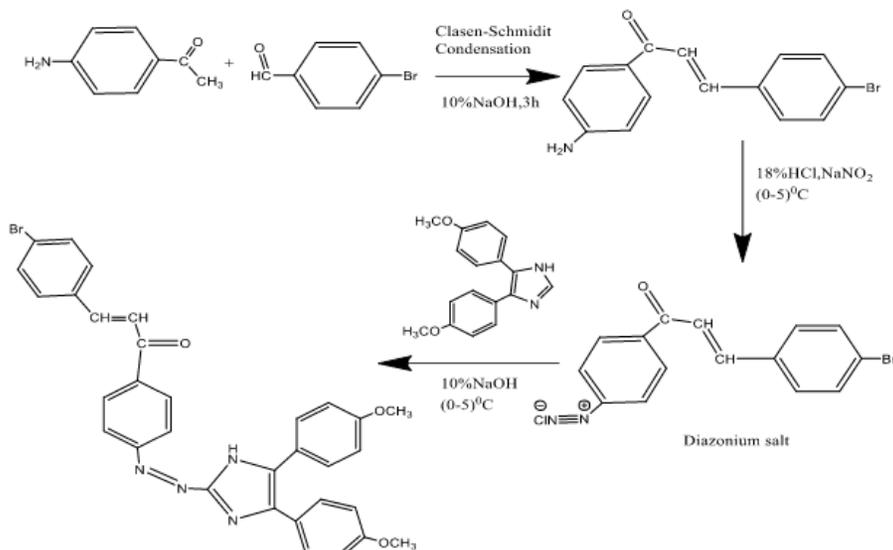
الشكل (1): معقدات المرتبطة (BIPhMe) مع أيوني  $Fe^{II}$  و  $Co^{II}$

وفي عام 2022 تم من قبل مجموعة من الباحثين اصطناع مرتبطة جديدة لأزو إيميدازول (LBr):

1-(4-((4,5-bis (4-methoxy phenyl)-1H-imidazol-2-yl)diazanyl)phenyl)-3-(4-bromophenyl)prop-2-en-1-one

وفق المخطط (1)، ومعقداتها مع كل من [Co, Ni, Cu, Zn, Hg and Pd (II)]، فكانت نسبة الارتباط (1:2)، وبينت نتائج الدراسة أن بنية جميع المعقدات ثماني الوجوه

باستثناء معقد Pd (II) مربع مستوي، الذي درست فعاليته كمضاد للأورام السرطانية [10].



المخطط (1): اصطناع المرتبطة (LBr)

## 2- الهدف من البحث:

- ❖ اصطناع مرتبطة (NAI) من مشتقات الإيميدازول.
- ❖ تحضير معقدات معدنية للمرتبطة (NAI) والإيميدازول، وذلك بتفاعلها مع كلوريدات النحاس والكوبالت اللامائية.
- ❖ التأكد من هوية المرتبطة طيفياً من خلال مطيافية الرنين النووي المغناطيسي الكربوني والبروتوني  $^1\text{H-NMR}$ ,  $^{13}\text{C-NMR}$  والمعقدات المصنعة باستخدام مطيافية الأشعة تحت الأحمر (FT-IR) ومطيافية الأشعة المرئية -فوق البنفسجية (UV-Vis).

## 3- مواد وطرائق البحث:

### 3-1- الأجهزة والأدوات المستخدمة:

- جهاز الطنين النووي المغناطيسي بروتوني نموذج 400MHz من شركة Bruker السويسرية.

- جهاز الامتصاص الضوئي ما تحت الأحمر نموذج FT-IR-4100 من شركة Jasco اليابانية.
  - صفائح كرماتوغرافيا الطبقة الرقيقة من الألمنيوم مطلية بالسليكا جل 60F<sub>254</sub> قياس 20 X 20 من شركة Merck الألمانية.
  - جهاز قياس درجة الانصهار Electrothermal Melting Point Apparatus .
  - ميزان حساس من النوع Sartorius BL-210S.
  - سخان مزود بمحرك مغناطيسي Agimatic P-Selecta 243.
  - مصباح UV مزود بلمبتين 254nm,366nm من شركة DESAGA الألمانية.
- 3-2-المواد الكيميائية المستخدمة:**

إيميدازول، حمض كلور الماء المركز، إيتانول مطلق، ، نترتيت الصوديوم، هيدروكسيد البوتاسيوم، ، كلوريد النحاس اللامائي ، دي كلورو الايتان ، ميتانول، كلوريد الكوبالت اللامائي .

### **3-3- تحضير المرتبطة (NAI):** تم تحضيرها وفق مرحلتين:

#### **المرحلة الأولى:** تحضير ملح الديازونيوم:

يوضع في دورق أحادي العنق (1.381gr;0.01mol) من بارا نترو الأنيلين و 10ml ماء مقطر و 5ml من حمض كلور الماء المركز، ويوضع في حمام ثلجي درجة حرارته (0-5°C) ويحرك حتى تمام الانحلال ثم يضاف بالتدريج قطرة قطرة 15ml محلول مائي من نترتيت الصوديوم (0.689gr) عند درجة الحرارة نفسها، حيث يصبح لون المحلول أصفر فاتح دليل على تشكل ملح الديازونيوم. بعد ذلك يترك المزيج عند درجة حرارة التفاعل نفسها مع التحريك لعدم تحرب الملح.

#### **المرحلة الثانية:** ازدواج ملح الديازونيوم مع الإيميدازول:

يوضع في دورق آخر (0.68gr) من الإيميدازول بعد إذابته بـ 10ml إيتانول، ومحلول 3gr من كربونات الصوديوم بأقل كمية ممكنة من الماء حوالي (15ml)، ومحلول 1gr من هيدروكسيد الصوديوم و 5ml من الماء مع التحريك لمدة ربع ساعة،

بعد ذلك يضاف هذا المحلول ببطء قطرة -قطرة إلى ملح الديازونيوم المحضر سابقاً وعند نفس درجة الحرارة المنخفضة حمام ثلجي درجة حرارته ( $0-5^{\circ}C$ ) ليبدأ تفاعل الازدواج، حيث لوحظ تغير اللون من الأصفر إلى البرتقالي الغامق، واستمر التحريك لمدة 4 ساعات عند نفس درجة الحرارة. يُضاف حمض كلور الماء لتحويل الأساس الفائق إلى ملح صوديومي وعندما يصبح ( $PH=6$ ) يترسب الناتج، ويُفصل بالترشيح، يغسل الراسب بالماء المقطر ومن ثم بالإيثانول، فيتم الحصول على راسب بني محمر وزنه ( $1.3gr$ ) بمردود  $59,9\%$  ، ودرجة انصهار ( $300^{\circ}C-Dec$ ) .

### 3-4- تحضير معقدي النحاس والكوبالت باستخدام المرتبطة (NAI):

يوضع في حوجة كروية سعة (  $100ml$  ) مزودة بقضيب مغناطيسي ومبرد عكوس و حمام مائي ، (  $0.0726 gr, 0.001mol$  ) من المرتبطة المحضرة سابقاً والمنحلة في ( $25ml$ ) من الايتانول المطلق، ويضاف بالتنقيط ( $1mmol$ ) من كلوريد المعدن اللامائي المنحل في ( $5ml$ ) من الايتانول المطلق مع التحريك والتسخين المستمر عند الدرجة (  $78^{\circ}C$  ) لمدة ( $5h$ ) .

وفي نهاية التفاعل تم الحصول على راسب يضاف إليه قطرات من محلول  $KOH$  لتعديل  $pH$  الوسط بالنسبة على معقد الكوبالت ، يُرشح و يُنقى عن طريق غسله بالايثانول المطلق ويُجفف، ويحدد المردود ودرجة الانصهار.

ويبين الجدول (1) بعض الخواص الفيزيائية للمرتبطة المصنعة ومعداتها.  
**الجدول (1):** الخواص الفيزيائية للمرتبطة (NAI) ومعداتها المعدنية

Comp.	Formulas (MW) g.mol <sup>-1</sup>	Color	M.p (°C)	Yield (%)
NAI	(217)	بني محمر	300-Dec	59.9
[Cu (NAI) Cl <sub>2</sub> ]	(351.45)	بني	300 <	66.5
[Co (NAI) Cl <sub>2</sub> ]	(346.839)	بني داكن	300 <	70.8

### 3-5- تحضير معقدي النحاس والكوبالت باستخدام الإيميدازول:

يوضع في حوالة كروية سعة ( 100ml ) مزودة بقضيب مغناطيسي ومبرد عكوس و حمام مائي، (0.1361 gr,0.001mol) من الإيميدازول والمنحل بـ (10ml) من الإيثانول، ثم يضاف بالتنقيط ( 0.001mol ) من كلوريد المعدن اللامائي المنحل في (5ml) من الإيثانول مع التحريك والتسخين المستمر عند الدرجة (78°C).  
 يعدل pH الوسط لمعدد الكوبالت فقط بإضافة نقاط من محلول هيدروكسيد البوتاسيوم في الإيثانول، مع الاستمرار بالتسخين والتحريك عند نفس الدرجة لمدة (6h). للحصول على راوسب تُرشح و تُنقى بغسلها الإيثانول وتُجفف.

وبين الجدول (2) بعض الخصائص الفيزيائية لمعقدات الإيميدازول المصنعة.

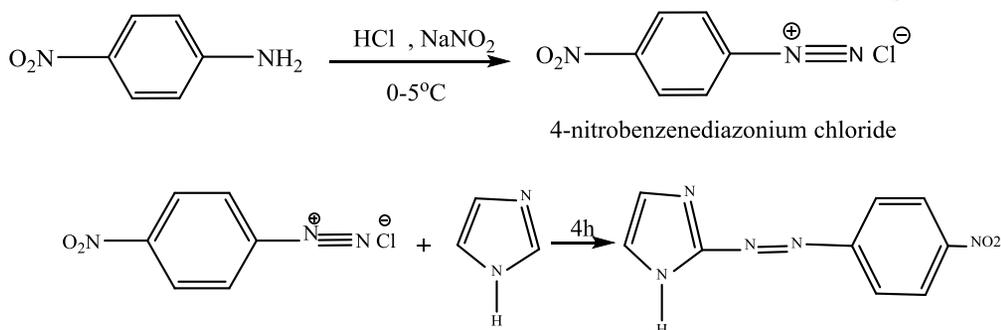
الجدول (2): الخصائص الفيزيائية لمعقدات الإيميدازول

المركب	الوزن الجزيئي $\text{g.mol}^{-1}$	اللون	درجة الانصهار ( $^{\circ}\text{C}$ )	المردود (%)
$[\text{Cu} (\text{Im})_2 \text{Cl}_2]$	270.54	بني فاتح	224-225	51.8
$[\text{Co} (\text{Im})_2 \text{Cl}_2]$	265.93	أزرق نبلي	150	49.8

#### 4- النتائج والمناقشة:

#### 4-1- دراسة بنية المرتبطة (NAI):

تم اصطناع المرتبطة: 4-Nitrophenyl Azo Imidazole وفق المخطط (2) التالي:

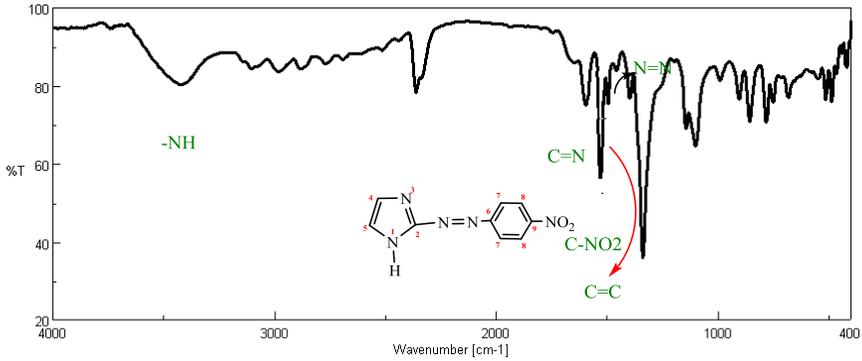


#### المخطط (2): اصطناع المرتبطة (NAI)

وحددت هوية المرتبطة باستخدام المطيافيات الآتية:

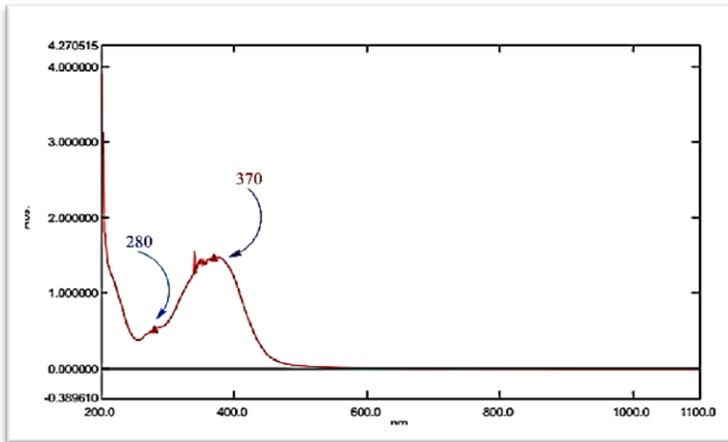
$^1\text{H-NMR}$ ,  $^{13}\text{C-NMR}$  و (UV-Vis) و (FT-IR).

حيث أظهر طيف الأشعة ما تحت الحمراء الشكل (2) للمرتبطة وجود عصابات امتصاص رئيسية عند الأعداد الموجية  $1457\text{Cm}^{-1}$  عائدة إلى امتصاص مجموعة الأزو ( $\text{N}=\text{N}$ )، وعند  $1598\text{Cm}^{-1}$  عائدة إلى امتصاص مجموعة ( $\text{C}=\text{N}$ ) لحلقة الأيميدازول.



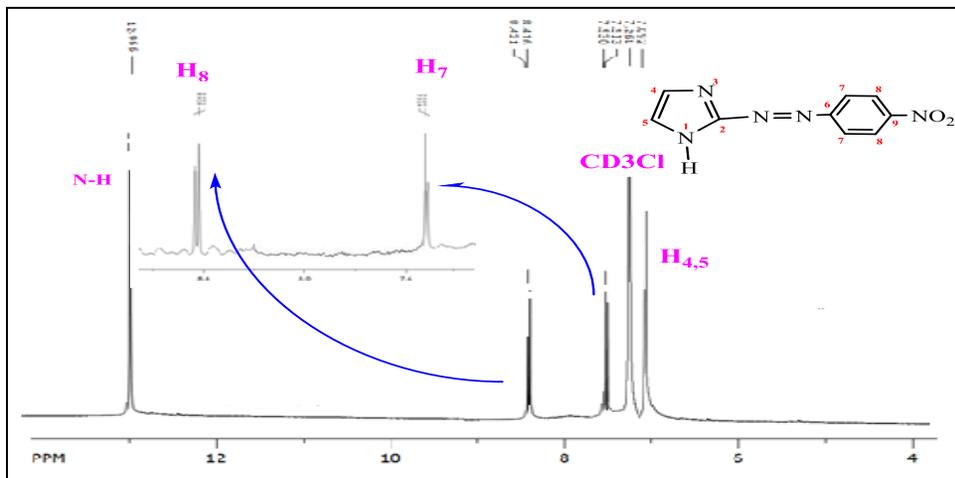
الشكل (2): طيف الأشعة ما تحت الحمراء للمرتبطة (NAI)

ومن خلال قياس مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis) الشكل (3) والمرتبطة (NAI) باستخدام الإيتانول كمذيب وباستخدام خلية ذات عرض (1cm)، وعند درجة حرارة الغرفة، لوحظ وجود حزمتي امتصاص واضحتين، حيث تمثل الحزمة الأولى عند الموقع (280 nm) الانتقال الإلكتروني من نوع ( $\pi \rightarrow \pi^*$ )، نتيجة لاحتواء المرتبطة على روابط ثنائية (C=C) في حلقتي الأيميدازول والفنيل، أما الحزمة الثانية عند الموقع (370nm) فتمثل الانتقال الإلكتروني من نوع ( $n \rightarrow \pi^*$ )، نتيجة لوجود أزواج إلكترونية حرة على نتروجين حلقة الأيميدازول C=N ونتروجين مجموعة الأزو .N=N.



الشكل (3): طيف (uv-vis) للمرتبطة NAI

كما سجل طيف الرنين النووي المغناطيسي البروتوني الشكل (4) للمرتبطة (NAI) في الكلوروفورم المديتر ( $CD_3Cl$ )، حيث يبين الطيف ظهور اشارتين أحاديتين عند: ( $12.92ppm, S, 1H$ ) تعود ل ( $-NH$ ) ، و ( $7.12ppm, S, 1H$ ) للبروتونين المرتبطين بذرتي الكربون (5) و (6) بالإضافة لإنزياحات أخرى موضحة في الجدول (3).



الشكل (4): طيف الرنين النووي المغناطيسي البروتوني  $^1H-NMR$  للمرتبطة

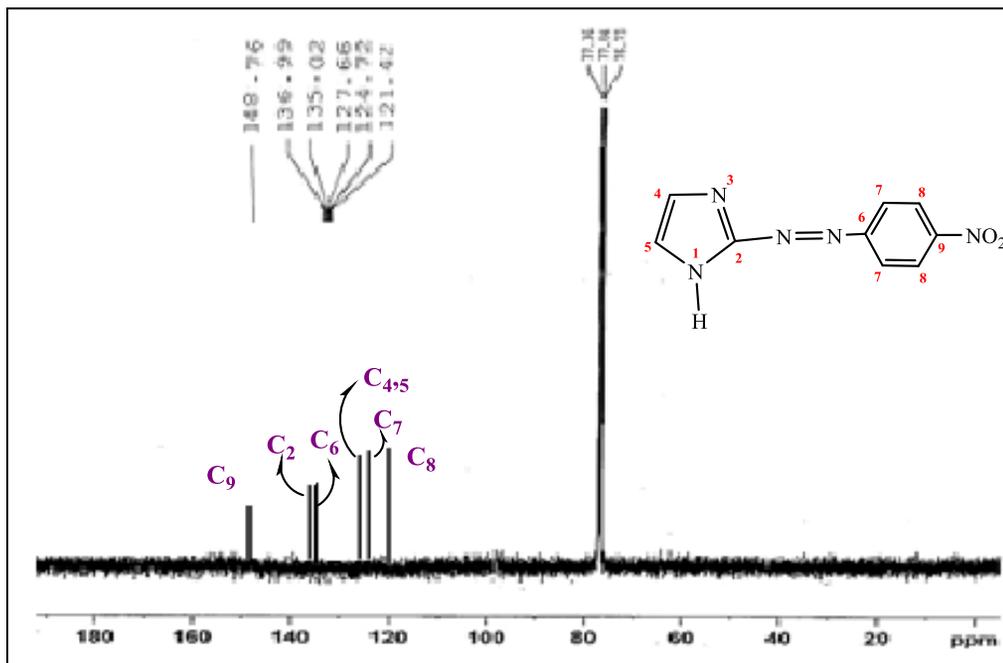
(NAI)

الجدول (3): قيم الانزياحات للمرتبطة في طيف الرنين النووي المغناطيسي البروتوني  $^1\text{H}$ -

NMR

الانزياح الكيميائي ( $\delta$ , ppm)	رقم ذرة الكربون
7.12 (s, 2H)	4,5
7.33 (d, 2H, $j = 6.8\text{Hz}$ )	7
8.43 (d, 2H, $j = 7\text{Hz}$ )	8
$\delta$ 12.92 (s, 1H)	N-H

وفي طيف الـ  $^{13}\text{C}$ -NMR الشكل (5) للمرتبطة ظهر امتصاصاً عند 148.76 ppm يعود إلى الكربون رقم (9) المرتبط بزمرة النترو، ويمتص كربون مجموعة الأزو مثنى في حلقة الازيميدازول عند الانزياح ( $\delta_c = 136.99\text{ppm}$ ) كما تظهر امتصاصات أخرى موضحة في الجدول (4).



الشكل (7): طيف الرنين النووي المغناطيسي الكربوني  $^{13}\text{C}$ -NMR للمرتبطة

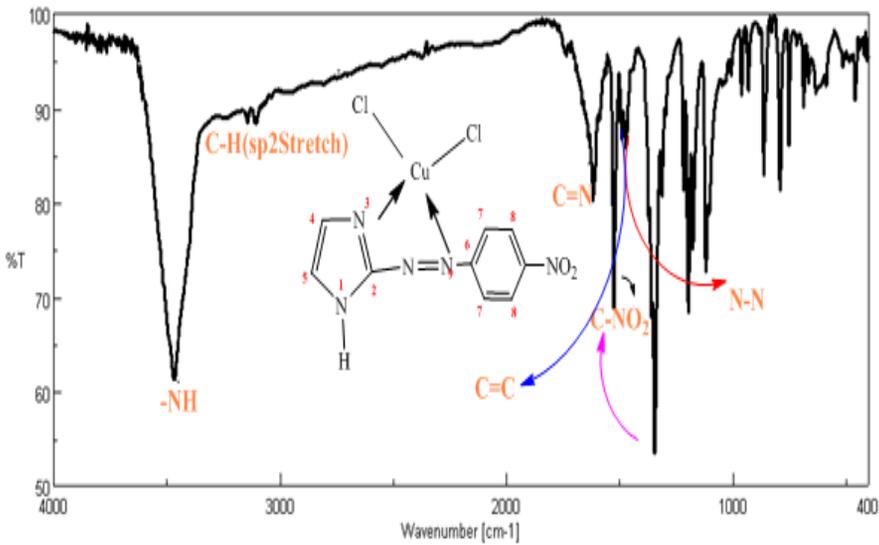
الجدول (4): قيم الانزياحات لطيف الرنين النووي المغناطيسي الكربوني  $^{13}\text{C}$ -NMR للمرتبطة

$^{13}\text{C}$ -NMR( $\delta_c$ ppm)	Number of Carbon
136.99	2
127.66	4,5
135.02	6
124.72	7
121.42	8
148.76	9

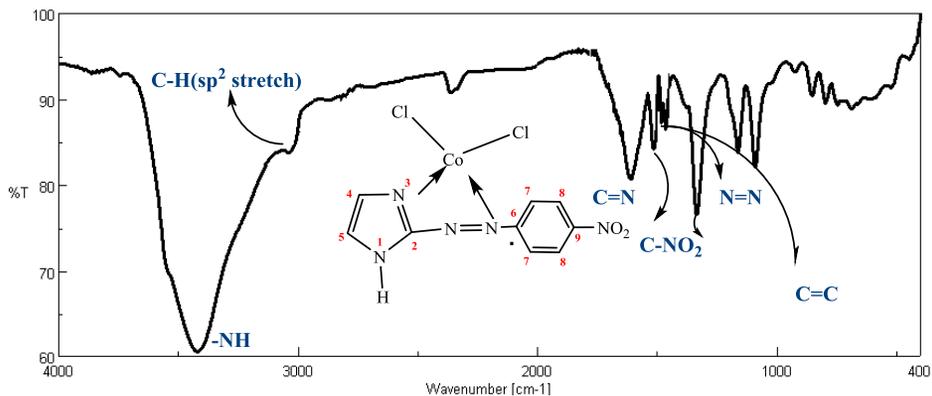
#### 4-2- دراسة بنية المعقدات المحضرة باستخدام المرتبطة (NAI) :

تم الحصول على معقدين من خلال تفاعل المرتبطة مع أملاح المعادن  $MCl_2$  حيث: ( $M = Co^{II}, Cu^{II}$ )، في الإيثانول مع التحريك المستمر لمدة (5) ساعات عند درجة حرارة غليان المذيب، ودرست بنية المعقدات المحضرة باستخدام مطيافية الأشعة ما تحت الحمراء (FT-IR) الأشكال (6,7)، حيث تبين الأطياف المسجلة للمعقدين ومن خلال مقارنتها مع طيف المرتبطة (NAI)، انزياح عصابات الامتصاص التابعة لامتطاط الرابطة ( $C=N$ ) بحلقة الايميدازول نحو الأعداد الموجية الأعلى من  $1598\text{Cm}^{-1}$  في المرتبطة إلى

( $1629-1617\text{Cm}^{-1}$ ) في معقدي النحاس والكوبالت، إضافةً إلى انزياح عصابة الامتصاص التابعة لامتطاط مجموعة الأزو ( $N=N$ ) نحو الأعداد الموجية الأعلى من  $1456\text{Cm}^{-1}$  في المرتبطة إلى ( $1464,1473\text{Cm}^{-1}$ ) في معقدي النحاس والكوبالت على التوالي وهذا يتوافق مع الدراسات المرجعية [11-12]، مما يدل على حدوث التساند في هذه المواقع، أي يمكن القول بأنّ تساند الشاردة المعدنية ( $M^{+2}$ ) مع المرتبطة (NAI) يتمّ من خلال ذرة نتروجين مجموعة الأزوميثين ( $C=N$ ) وذرة نتروجين مجموعة الأزو ( $N=N$ ) بالإضافة لإنزياحات أخرى موضحة في الجدول (5).



الشكل (6): طيف الأشعة تحت الحمراء للمعقد  $[Cu(NAI)Cl_2]$



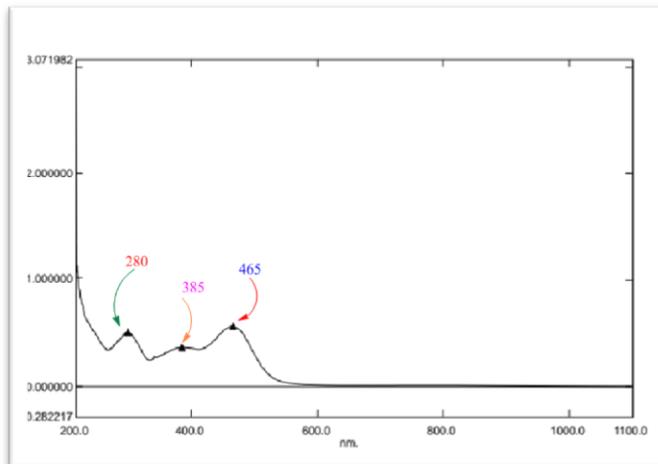
الشكل (7): طيف الأشعة تحت الحمراء للمعقد  $[\text{Co}(\text{NAI})\text{Cl}_2]$

الجدول (5): قيم عصابات الامتصاص في طيف (FT-IR) للمرتبطة (NAI) ومعقدتها

Compounds	العدد الموجي ( $\text{cm}^{-1}$ )						
	$\nu$ (-NH)	$\nu$ (C-H( $\text{Sp}^2$ ))	$\nu$ (C=N)	$\nu$ (N=N)	$\nu$ (C=C)	$\nu$ (C- $\text{NO}_2$ )	$\nu$ (M-N)
NAI	3420	3103	1598	1456	1498	1520-1338	-
$[\text{Cu}(\text{NAI})\text{Cl}_2]$	3413	3101	1617	1473	1490	1523-1342	459
$[\text{Co}(\text{NAI})\text{Cl}_2]$	3421	3103	1620	1464	1492	1517-1334	454

وتظهر الأشكال (8) و (9) أطيف الأشعة فوق البنفسجية والمرئية للمعقدين المحضرين، حيث لوحظ وجود ثلاث قمم، الأولى تقع عند (280-281 nm) عائدة إلى الانتقالات الالكترونية من نوع ( $\pi \rightarrow \pi^*$ )، في حين أنّ العصابة الثانية التي تظهر عند (376-385nm) تعود إلى الانتقالات الالكترونية للمعقدي النحاس والكوبالت من نوع ( $n \rightarrow \pi^*$ ) وقد انزاحت نحو الأطوال الموجية الأعلى مقارنة مما هو عليه في حالة المرتبطة الحرة (NAI)، و ذلك نتيجة التساند مع الشاردة المعدنية، أما العصابة

الثالثة والتي تظهر عند (420-465nm) في المعقدين تعود لانتقالات الشحنة  
L → M

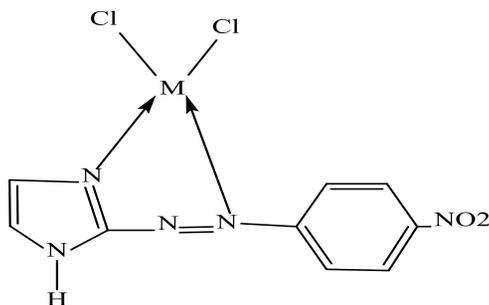


الشكل (8): طيف (UV-Vis) للمعقد [ Cu (NAI) Cl<sub>2</sub>]



الشكل (9): طيف (UV-Vis) للمعقد [ Co (NAI) Cl<sub>2</sub>]

نتيجة لما تقدم أعلاه، واعتماداً على الدراسة الطيفية السابقة للمعقدات المحضرة، نقترح لها الصيغة الجزيئية العامة  $[M(NAI) Cl_2]$ ، وهذه المعقدات مستقرة وثابتة في الهواء الجوي و رباعية التساند.



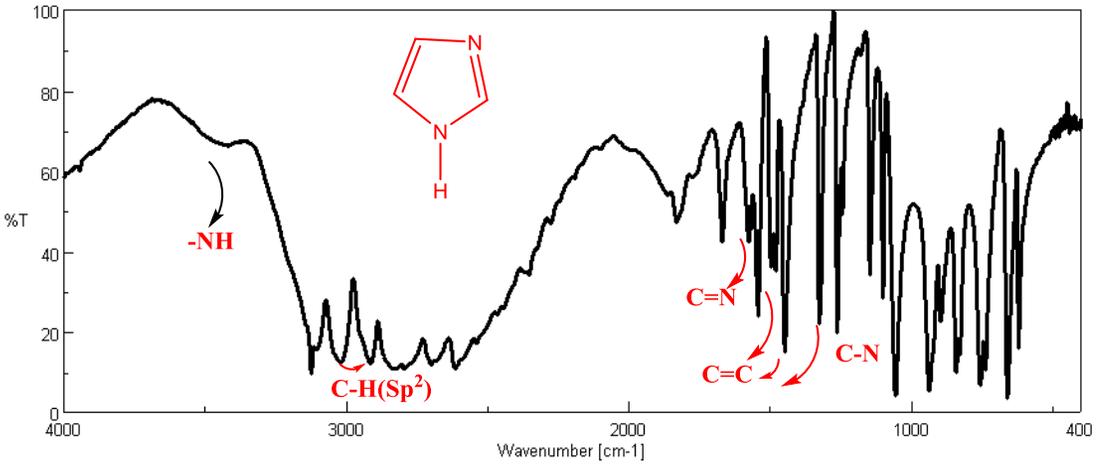
### الصيغة التركيبية المقترحة للمعقدات المحضرة باستخدام المرتبطة (NAI)

#### 4-3- دراسة بنية المعقدات المحضرة باستخدام الإيميدازول:

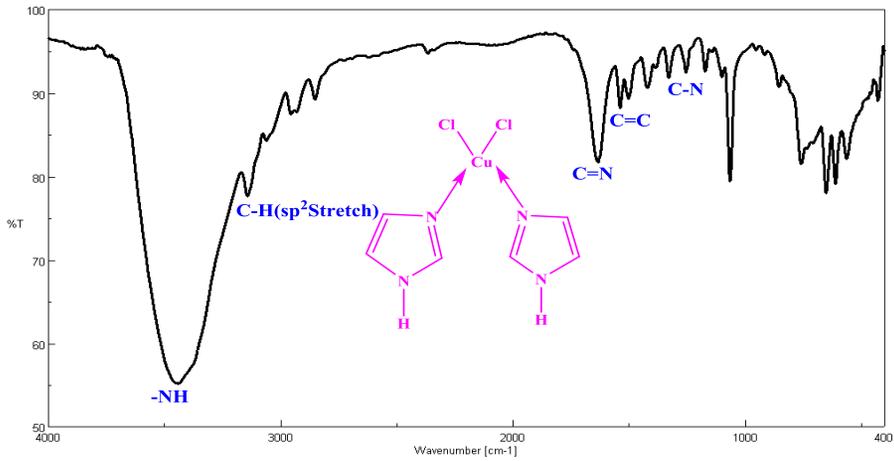
تم الحصول على معقدين من خلال تفاعل الإيميدازول مع أملاح المعادن  $MCl_2$  حيث:

(  $M = Co^{II}, Cu^{II}$  )، في الإيثانول مع التحريك المستمر لمدة (5) ساعات عند درجة حرارة غليان المذيب، ودرست بنية المعقدات المحضرة باستخدام مطيافية الأشعة ما تحت الحمراء (FT-IR) الأشكال (10,11)، حيث تبين الأطياف المسجلة للمعقدين ومن خلال مقارنتها مع طيف لإيميدازول، انزياح عصابات الامتصاص التابعة لامتطاط الرابطة (C=N) بحلقة الايميدازول نحو الأعداد الموجية الأعلى من  $1576cm^{-1}$  في الايميدازول إلى

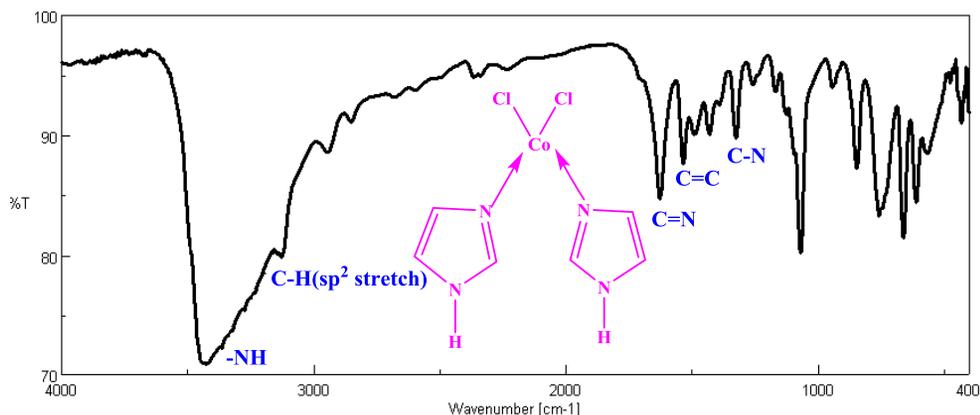
( $1628-1633cm^{-1}$ ) في معقدي النحاس والكوبالت، هذا دليل على حدوث التعقيد على ذرة نيتروجين مجموعة الأزو ميثين وظهر عصابات أخرى موضحة في الجدول(6).



الشكل(1-1-IV): طيف الأشعة ما تحت الحمراء للإيميدازول.



الشكل(10): طيف الأشعة ما تحت الحمراء [Cu(Im)<sub>2</sub> Cl<sub>2</sub>]



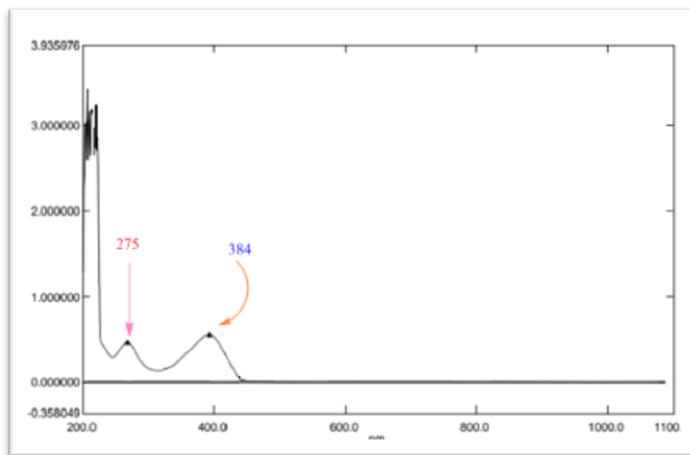
الشكل (11): طيف الأشعة ما تحت الحمراء  $[\text{Co}(\text{Im})_2 \text{Cl}_2]$

الجدول (6): قيم عصابات الامتصاص في طيف (FT-IR) للإيميدازول ومعقداته المعدنية.

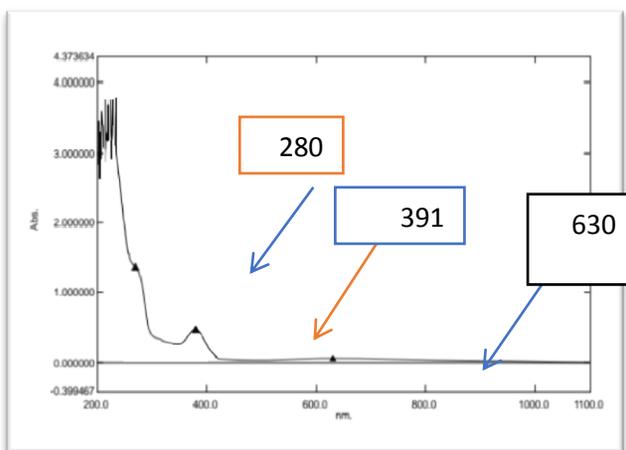
Compounds	$\nu(\text{NH})$	$\nu(\text{CH}-(\text{Sp}^2\text{Stretch}))$	$\nu(\text{C}=\text{N})$	$\nu(\text{C}=\text{C})$	$\nu(\text{C}-\text{N})$
Im	3425	3023	1576	1542-1448	1262
$[\text{Cu}(\text{Im})_2 \text{Cl}_2]$	3442	3141	1633	1539-1502	1255
$[\text{Co}(\text{Im})_2 \text{Cl}_2]$	3449	3127	1628	1534-1491	1257

ومن خلال قياس مطيافية الأشعة فوق البنفسجية-المرئية (UV-Vis) الأشكال (12, 13, 14) للإيميدازول ومعقداته باستخدام الإيثانول كمذيب وباستخدام خلية ذات عرض (1cm)، وعند درجة حرارة الغرفة، ظهر في الطيف قمتين، حيث تمثل القمة الأولى عند الموقع (275 nm) في الإيميدازول وعند (280-293 nm) لمعقدي الكوبالت والنحاس، تعود الانتقال الإلكتروني من نوع ( $\pi \rightarrow \pi^*$ ) نتيجة لاحتواء الإيميدازول ومعقداته على روابط ثنائية مثل مجموعة (C=C)، أما حزمة الامتصاص

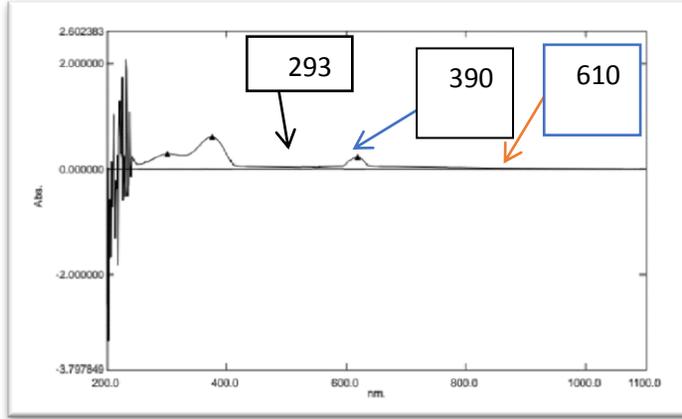
الثانية عند الموقع (384 nm) في الإيميدازول وعند (291-290 nm) لمعدي الكوبالت والنحاس، تمثل الانتقال الإلكتروني من نوع ( $n \rightarrow \pi^*$ ) نتيجة لوجود أزواج إلكترونية حرة على نتروجين حلقة الأيميدازول .  
 أما الحزمة الثالثة والتي تظهر عند (630-610 nm) في معدي الكوبالت والنحاس تعود لانتقالات d-d .



الشكل (1): طيف (UV-Vis) للإيميدازول



الشكل (12): طيف (UV-Vis) للإيميدازول مع معدن النحاس



الشكل (13): طيف (UV-Vis) للإيميدازول مع معدن الكوبالت

#### 5 - الاستنتاجات والمقترحات:

- 1) تم اصطناع مرتبطة بارا نترو فنيل أزو إيميدازول.
- 2) تم اصطناع معقدات للإيميدازول والمرتبطة المصنعة مع أيونات النحاس الثنائي والكوبالت الثنائي.
- 3) حددت هوية كل من المرتبطة والمعقدات المحضرة من خلال مطيافية الأشعة ماتحت الحمراء (FT-IR) ومطيافية الأشعة فوق البنفسجية (UV-Vis) ومطيافية الطنين النووي المغناطيسي البروتوني والكربوني، حيث أظهرت نتائج الدراسة توافقها مع الصيغ المقترحة للمعقدات المحضرة.
- 4) نقترح اصطناع مشتقات أزو اخرى للإيميدازول وتعقيدها مع أيونات المعادن الانتقالية.
- 5) كما نقترح دراسة تطبيقات المعقدات المحضرة كالفعالية البيولوجية.

6- المراجع

- [1]. Kavitha S, Kannan K, Gnanavel S. Synthesis, characterization and biological evaluation of novel 2, 5 substituted-1, 3, 4 oxadiazole derivatives. Saudi Pharmaceutical Journal. 2017 Mar 1;25(3):337-45.
- [2]. Bhatnagar, A., Sharma, P. K., & Kumar, N. (2011). A review on "Imidazoles": Their chemistry and pharmacological potentials. Int J PharmTech Res, 3(1), 268-282.
- [3]. Narasimhan, B., Sharma, D., & Kumar, P. (2011). Biological importance of imidazole nucleus in the new millennium. Medicinal Chemistry Research, 20(8), 1119-1140.
- [4]. Hussein, A. S. (2012). Synthesis And Spectrophotometer Study 2- [(2-Sulfoheny) Azo]-4, 5-Diphenylimidazole With Some Transition Metal Complexes. Kufa Journal for Chemistry, (6).
- [5]. Pratihari, P., Mondal, T. K., Raghavaiah, P., & Sinha, C. (2010). The C–N coupling reaction of pendant naphthyl group of palladium (II) complexes of 1-alkyl-2-(naphthyl-β-azo) imidazoles. Structural characterization, spectral and redox properties, and correlation with DFT computed data. Inorganica Chimica Acta, 363(5), 831-840.
- [6]. ] Molina, P., Tárraga, A., & Otón, F. (2012). Imidazole derivatives: A comprehensive survey of their recognition properties. Organic & Biomolecular Chemistry, 10(9), 1711-1724.
- [7]. Verma, A., Joshi, S., & Singh, D. (2013). Imidazole: having versatile biological activities. Journal of Chemistry, 2013.
- [8]. SV Satyanarayana, V., Sivakumar, A., & Ranjan Ghosh, A. (2011). Synthesis, characterization of some new five membered heterocycles based on imidazole moiety and their applications on therapeutics. Letters in Drug Design & Discovery, 8(3), 276-283.

- [9]. Victor, E., Kim, S., & Lippard, S. J. (2014). Synthesis of bis (imidazole) metal complexes and their use in rapid NO detection and quantification devices. *Inorganic Chemistry*, 53(24), 12809-12821.
- [10]. Kadhium, A. J., & Abdulrasool, R. N. (2022). Synthesis and Characterization Some Transition Metal Complexes of New Ligand Chalcone-Azo Derivatives from P-methoxy-4, 5-diphenyl Imidazole and Study Biological Effect of Pd (II) Complex. *NeuroQuantology*, 20(3), 173-181.
- [11]. Ali, I. R., & Jawad, S. K. (2013). Synthesis and Spectral Studies of Co (II), Ni (II), Zn (II) and Cd (II) Complexes with Ligand 2-[4-Carboxy methyl phenyl azo]-4, 5-diphenyl imidazole (4CMeI). *Baghdad Science Journal*, 10, 2.
- [12]. Ikram, M., Rehman, S., & Faiz, A. (2010). Synthesis, characterization and antimicrobial studies of transition metal complexes of imidazole derivative. *Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia*, 24(2).

# أثر أوكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا (*Glycine* *max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

The Effect Of Zinc Oxide Nanoparticles In  
Some Morphological Indicators In Two  
*Glycine max L.* Cultivars Condition Of  
Homs Governorate

إعداد

الطالبة بتول السماعيل

طالبة دراسات عليا - كلية العلوم - جامعة البعث

د. حسين سليمان	د. محمود الحمدان	د. جورج غندور
باحث في الهيئة العامة للبحوث الزراعية	باحث في الهيئة العامة للبحوث الزراعية	أستاذ مساعد كلية العلوم جامعة البعث
(تربة واستصلاح أراضي)	(تربة واستصلاح أراضي)	(فيزيولوجيا نبات)

### المُلخّص:

تم تنفيذ هذه التجربة في مركز البحوث الزراعية في حمص دائرة البحوث للموارد الطبيعية خلال الموسم الزراعي 2021 وذلك لدراسة تأثير وفعالية أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية لصنفين من أصناف فول الصويا (*Glycine max L.*) وهما الصنفين Sb239 و Ascro 3803 حيث استخدمت أربع مستويات من سماد أكسيد الزنك النانوي وفق النشرة المرفقة مع العبوة السمادية (100غ/هكتار) ورمز لها بالرمز  $Zn_0$ ،  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$ ، تم إضافة هذه المعاملات بتركيزات (0، 1، 2، 3) مغ/ل وتم تكرار هذه المعاملات بثلاثة مكررات، أعطت النتائج التي تم التوصل إليها: زيادة معنوية واضحة بارتفاع النبات وبأعلى نسبة عند المعاملة  $Zn_2$  والتي وصلت إلى 38.47% في مرحلة الإزهار و 55.98% عند النضج لمتوسط الصنفين المدروسين وذلك بالمقارنة مع الشاهد، كما زاد عدد الأوراق الخضراء عند المعاملة  $Zn_2$  والتي بلغت إلى 111.40% في مرحلة الإزهار و 58.65% عند النضج وذلك لمتوسط الصنفين المدروسين بالمقارنة مع الشاهد، وأظهرت النتائج تفوق معنوي واضح عند الرش الورقي بأوكسيد الزنك النانوي بالمستوى  $Zn_2$  للمساحة الورقية ودليل المسطح الورقي عند الصنفين المدروسين والتي وصلت على الترتيب للمؤشرين المدروسين إلى (171.63%، 164.51%) في مرحلة الإزهار و (73.42%، 73.12%) عند النضج وذلك بالمقارنة مع الشاهد، ومن جهة أخرى دلت النتائج على زيادة معنوية في الوزن الرطب لنبات فول الصويا و بأعلى نسبة عند المعاملة  $Zn_2$  والتي وصلت إلى 140.42% في مرحلة الإزهار و 109.55% عند النضج لمتوسط الصنفين المدروسين وذلك بالمقارنة مع الشاهد، كما يلاحظ من النتائج التي تم التوصل لها استجابة الصنف Sb239 للرش الورقي بأوكسيد الزنك النانوي بشكل أكبر من الصنف Ascro3803 وحسب المرحلة الفيزيولوجية.

كلمات مفتاحية: فول صويا، صنف Sb239، صنف Ascro 3803، أوكسيد الزنك النانوي، صفات فيزيولوجية، صفات مورفولوجية.

#### **ABSTRACT:**

This experiment was carried out at the Agricultural Research Center in Homs, the Research Department of Natural Resources, during the agricultural season 2021, to study the effect and effectiveness of nano-zinc oxide on some morphological indicators of two soybean cultivars (*Glycine max L.*), namely Sb239 and Ascro 3803, using four levels of nano fertilizer. Zinc oxide from the leaflet attached to the fertilizer package and the following (100 g/Ha) symbols are used Zn<sub>0</sub>, Zn<sub>1</sub>, Zn<sub>2</sub>, Zn<sub>3</sub>, these treatments were added at concentrations (0, 1, 2, 3) mg/l and these treatments were repeated in three replications, which gave the results: Increase significant plant height with the highest percentage in Zn<sub>2</sub> treatment, which reached 38.47% at flowering stage and 55.98% at maturity for the average of the two studied cultivars, in comparison with the control, and the number of green leaves increased when Zn<sub>2</sub> treatment reached 111.40% in flowering stage and 58.65% At maturity for the average of the two studied cultivars compared to the control, and the results showed a significant and clear superiority when foliar spraying with nano zinc oxide in the level of leaf area and leaf surface index of the two studied cultivars, which arrived, respectively, for the two studied indicators O to (171.63%, 164.51%) in the flowering stage and (73.42%, 73.12%) at maturity, in comparison with the control, and on the other hand, the results indicated a significant increase in the wet weight of soybean plants with the highest percentage when Zn<sub>2</sub> treatment, which reached 140.42% In the flowering stage and 109.55% at maturity for the average of the two studied cultivars, compared to the control, as it is noted from the results that the cultivar Sb239 responded to foliar

أثر أوكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

spraying with nano-zinc oxide more than the cultivar Ascro3803 and according to the physiological stage.

**Key words:** Soybean, class Sb239, Class Ascro 3803, Nano zinc oxide, Physiological characteristics, Morphological characteristics.

## 1- المقدمة:

تعتبر الزيادة السكانية خلال السنوات الماضية في البلدان النامية خاصة في كل من آسيا وإفريقيا، والتي انعكست على زيادة الطلب وعدم التوازن ما بين هذه الزيادة السكانية وحجم الاستهلاك والذي دعى للتوجه نحو استهلاك البروتينات النباتية بدلاً من البروتينات الحيوانية لارتفاع أسعارها التي يعجز عن شرائها الكثيرون (Havlin et al., 2005).

يتبع فول الصويا (*Glycine max.L*) للفصيلة البقولية وهو من المحاصيل القديمة التي زرعها الإنسان واستناداً للدراسات التاريخية فإن الصين هو الموطن الأصلي لزرعتها، ويعتبر النوع البري الحولي (*G.Soja*) الأصل للنوع المزروع حالياً (*G.max*) كما أن الأصول البرية للصويا غير معروفة بالضبط حسب (كيال وآخرون، 1998)، ويعتبر النوع الهجين والبري هو المستخدم في تغذية الإنسان (Lee et al., 2011).

تم إدخال زراعة هذا النبات إلى عدة مناطق في سورية عام 1967 م وازدادت اختبارات الأصناف المدخلة لفول الصويا عالمياً كما استمرت الأبحاث لعدة سنوات متلاحقة من قبل الهيئة العامة للبحوث الزراعية وذلك باختبار الكثير من الأصناف المدخلة والمحسنة وراثياً بمساحة تجريبية، ثم طورت وازدادت والمساحة المزروعة في عام 2020 نحو 2974 هكتار وإنتاج 6227 طن وبغلة قدرت 2094 كغ/هـ، قدرت المساحة المزروعة في محافظة حمص بـ 275 هكتار بغلة قدرها 2366 كغ/هـ (المجموعة الإحصائية الزراعية السنوية، 2020).

يعد فول الصويا من المحاصيل البقولية ذات الأهمية الاقتصادية الكبيرة في العالم لأنه محصولاً غذائياً وعلفياً يعتمد عليه في التغذية كل من الإنسان والحيوان لغنى بذوره بالبروتين والزيت، مما دفع الكثير إلى تسميته بالذهب المزروع (Erickson and Brekke, 1980).

تعتبر الأسمدة مواد طبيعية عضوية أو غير عضوية أو مصنعة تضاف إلى التربة من أجل أن تمد النبات بعنصر واحد أو أكثر من العناصر المغذية الضرورية لنمو النبات، فإضافتها تكون إما لزيادة خصوبة التربة أو تعويض نقص العناصر المغذية

الجاهزة للامتصاص بوساطة جذور النبات أو للمحافظة على المستوى الموجود أصلاً أو لكي يكون هناك توازن جيد بين العناصر الغذائية المختلفة ولاسيما الصغرى والنادرة منها (لطفي، 1986).

تأتي أهمية الزنك للنبات كعنصر ضروري لدوره في تكوين الحمض الأميني التربتوفان Tryptophane الذي يتكون منه الهرمون أندول أسيتك أسيد (IAA) الضروري لزيادة كفاءة امتصاص النبات للماء وكذلك استطالة الخلايا، كما أنه يدخل في تركيب بعض الأنزيمات الضرورية في تمثيل البروتينات والكثير من أنزيمات الأكسدة والاختزال الهامة لعملية التنفس وهو ضروري لتحويل الأمونيا إلى أحماض أمينية، ويساهم في تكوين الكلوروفيل (singh *et al.*, 2018; yruela *et al.*, 2015).

أدى الطلب المتزايد على الغذاء وزيادة استخدام الأسمدة على نطاق واسع لارتفاع الكلفة التي يتحملها المزارع بشكل كبير، فكان الحل الأجدر لهذه المشاكل هي استخدام تقانة النانو التي لديها إمكانات كبيرة لإنتاج الأسمدة بالتراكيب الكيميائية المرغوبة فهي حسنت من كفاءة استخدام المغذيات وقللت التأثير البيئي وزادت من إنتاجية النبات (Raliya *et al.*, 2018).

تستخدم الأسمدة النانوية بدلاً من الأسمدة التقليدية وذلك لسهولة امتصاصها وزيادة كفاءتها كونها تدخل بسهولة للخلايا وتعد طريقة مناسبة لنقل هذه المركبات لأماكن الاستهداف سواء الأوراق أو الجذور أو الثمار أو باقي أجزاء النبات، وفي تغذية النبات من خلال زيادة نشاط عمليات التمثيل الضوئي عن طريق زيادة محتوى الأوراق من الكلوروفيل (Lin, 2014)، كما أن أسعارها تعد منافسة للأسمدة التقليدية، فكمية قليلة منها تفي بالغرض المطلوب، إضافة إلى قابليتها للتخزين لفترة طويلة وذلك لثباتها العالي تحت كافة الظروف. (القدسي، 2019).

## 2- الدراسة المرجعية:

تعد عملية التسميد لكل من العناصر الغذائية الصغرى والكبرى باستخدام طريقة الرش الورقي عاملاً مساعداً في تأمين احتياجات هذا النبات إذ أن الأوراق تعتبر مركزاً مهماً للتفاعلات الحيوية أهمها التمثيل الضوئي والنتح الذي يرتبط بامتصاص العناصر المعدنية وانتقالها وتوزيعها في النبات (لطي، 1986).

يعتبر الرش الورقي بالمغذيات طريقة فعالة لتغذية النباتات من أجل الحصول على احتياجاتها الغذائية في أوقات النمو الحرجة فالكميات القليلة منها تعد مفتاحاً لمراحل النمو والتطور وذلك لأثرها المعنوي في زيادة غلة المحصول ولتغلغلها إلى داخل الأجزاء الخضرية من خلال طبقة البشرة أو الثغور، إذ تعتبر هذه الطريقة للتسميد هي الأساس لاستجابة النبات السريعة ولتصحيح النقص في أحد العناصر الغذائية ( Kazemi, 2003; Haytova, 2013).

برزت في السنوات الأخيرة تقنية النانو (Nanotechnology) وشاع استعمالها في مجالات مختلفة والدراسات الحديثة أدت إلى توظيف هذه التقنية لمعالجة وتحسين النبات و لرفع الكفاءة الإنتاجية وذلك بعد اختبار الأصناف ذات المواصفات الجيدة في الإنتاج (الكمي والكيفي) والمتوافقة مع ظروف المنطقة التي تنمو فيها وهو ما يسمى Agro-nanotechnology (Abobatta, 2016).

أشار (Salama et al., 2019) في تجربة لدراسة تأثير أكسيد الزنك النانوي في النمو وإنتاج ونوعية الفاصولياء حيث كانت الزيادة المعنوية في كل من عدد الأوراق والأفرع والوزن الرطب والجاف والغلة الحبية لكل نبات وارتفاع المحتوى البروتيني خلال عامي (2016-2017) باستخدام التركيز 30 جزء في المليون من أكسيد الزنك النانوي.

بين (AL- Zuhairi et al., 2020) في تجربته لدراسة تأثير إضافة أكسيد الزنك النانوي بالتركيز (5، 25، 75 مغ / لتر) في الخصائص المورفولوجية والإنتاجية لنبات الفليفلة المزروع في المزارع المائية فكان استخدام التركيز 75 مغ / لتر أكثر معنوية لكل

من ارتفاع النبات وعدد الأزهار وعدد الأفرع وقطر الساق وعدد الأوراق ومساحة الورقة وإنتاجية النبات مقارنة مع الشاهد.

أظهرت نتائج (Mahdiehm *et al.*, 2018) لدراسة استخدام أكسيد الزنك النانوي والزنك المخلي ومعدلات كبريتات الزنك على محصول ونمو أصناف الفاصولياء (*Phaseolus vulgaris*) أن استخدام الرش الورقي أدى إلى زيادة النمو والإنتاجية لكلا الصنفين (KS21191 , KS21193) مقارنة بالشاهد حيث حسنت الأسمدة النانوية الخصائص المورفولوجية (ارتفاع النبات، طول الساق والجذور، والوزن الرطب والبراعم الجافة) وكذلك عدد القرون ووزن البذور ومحتوى الزنك في البذور وكانت التراكيز 0.10% و 0.15% من بين معاملات سماد الزنك بمثابة علاج ممتاز.

بينت نتائج الباحث (Yaramanci, 2009) للزراعة التكتيفية لنبات فول الصويا باستخدام أربعة أصناف من فول الصويا، ازدياد في ارتفاع النبات وارتفاع أول القرن على النبات، وعدم تأثر كل من عدد الفروع الجانبية وعدد القرون ووزن المئة حبة ونسبة البروتين وذلك لاختلاف الأصناف المستخدمة.

في دراسة (Dülgerbaki, 2010) حول تأثير تطبيق الزنك على محصول نبات فول المونج بنسبة (ماء نقي، 0.04%، 0.05%، 0.06%) حيث أعطت زيادة معنوية في كل من طول النبات وعدد الأفرع وعدد البذور ووزن النبات ووزن المئة بذرة ونسبة البروتين.

بينت نتائج (Abdel and Haggan., 2014) في دراستهم لأثر الرش الورقي لكل من العناصر (الحديد، الزنك، المنغنيز، البورن) على خصائص نبات فول الصويا، الحصول على نتائج معنوية في كل من ارتفاع النبات وعدد الأفرع وعدد القرون ووزن المئة بذرة ومحتوى الزيت ومحتوى البروتين.

أكد (Malakooti *et al.*, 2017) في دراسته لتأثير الرش الورقي والأرضي لكل من الزنك والحديد في الخصائص الكمية والنوعية لصنفين من فول الصويا، إلى التوصل إلى

زيادة في كل من ارتفاع النبات والغلة الحبية عند تطبيق الرش بعنصر الحديد ورقياً والزنك أرضياً، بينما تم الحصول على أعلى عدد من البذور لكل نبات ومحصول البذور ومؤشر الحصاد ومحتوى البروتين عند تطبيق الزنك في التربة ومحتوى الزيت تأثر عند تطبيق الحديد والزنك في التربة والزنك ورش الزنك ورقياً أيضاً.

### 3- مبررات البحث:

نظراً لأهمية محصول فول الصويا على مستوى العالم بشكل عام وفي سورية بشكل خاص، وذلك لدوره الكبير في تغذية كل من الإنسان والحيوان، ودخوله في العديد من الصناعات الغذائية ولانخفاض إنتاجيته في سورية وقلة زراعته، وضرورة البحث عن مصادر تغذية جديدة لتوفير العناصر الغذائية بشكلها (الكبرى والصغرى) التي يحتاجها النبات للحصول على أعلى إنتاج كماً ونوعاً وإن نقص أي عنصر من هذه العناصر الغذائية يعتبر عاملاً محدداً لنمو وإنتاجية المحصول وكان أكسيد الزنك النانوي يعد من العناصر الصغرى ونظراً لقلّة الأبحاث والدراسات حول استخدام هذا السماد وخاصة بالشكل النانوي على نبات فول الصويا تم اقتراح هذا البحث.

### 4- أهداف البحث:

دراسة أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من نبات فول الصويا ضمن مدينة حمص.

### 5- مواد وطرائق البحث Materials and Methods:

#### 5-1- موقع التجربة:

نفذت التجربة الحقلية في أحد حقول دائرة بحوث الموارد الطبيعية التابعة لمركز البحوث العلمية الزراعية في حمص الذي يقع على بعد 7 كم شمال مدينة حمص ويرتفع 497/ عن سطح البحر ويمتد على خط طول 36.74 درجة وعلى خط عرض 34.75 درجة خلال الموسم الزراعي لعام 2021 بمساحة إجمالية 399 م<sup>2</sup>.

أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

5-2- المناخ:

جدول (1) الظروف المناخية السائدة في موقع الدراسة.

الشهر	درجة الحرارة الصغرى (م)	درجة الحرارة العظمى (م)	الرطوبة النسبية%	معدل الهطول المطري (مم)
أيار	16.38	30.10	32.12	-
حزيران	18.36	30.24	36.30	-
تموز	23.21	34.52	35.12	-
آب	23.85	33.21	35.56	-
أيلول	21.12	34.25	34.68	-
تشرين الأول	18.21	30.35	24.36	44.30
تشرين الثاني	19.35	24.57	25.65	18.10
كانون الأول	6.72	10.15	23.36	100.90
المعدل	18.40	28.42	30.89	54.33

(مأخوذة من المحطة المناخية لمركز البحوث العلمية الزراعية بحمص).

5-3- التربة:

التربة حمراء طينية إلى طينية لومية، والقطعة التجريبية شبه مستوية منحدرة بشكل عام نحو الشمال الغربي بنسبة أقل من 1 % تم تحليلها ومعرفة خصائصها وفق الجدول رقم (2).

جدول رقم (2) يبين الخصائص الفيزيائية والكيميائية لتربة الموقع المدروس.

كربونات الكالسيوم Ca CO <sub>3</sub>	حموضة التربة ph	الزنك %	البوتاسيوم المتاح PPM	الفوسفور المتاح PPM	النيتروجين المتاح PPM	المادة العضوية	قوام التربة	المجموعة الميكانيكية المكونة لقوام التربة %		
								رمل %	سلت %	طين %
0.922	8.40	2.28	204.25	4.5	30.45	1.37	طينية	60	14	26



#### 4-5- المادة التجريبية:

تم دراسة صنفين من فول الصويا (Sb 239 , Ascro3803) الذي تم الحصول عليها من الهيئة العامة للبحوث العلمية الزراعية، إدارة المحاصيل.

مواصفات الأصناف:

#### 1- Sb239:

عدد الأيام اللازمة للإنبات 6 أيام (نسبة الإنبات 70%)، عدد الأيام اللازمة للإزهار 49 يوم، عدد الأيام اللازمة للنضج الفيزيولوجي 80 يوم، عدد الأيام اللازمة للنضج الكامل 139 يوم، ارتفاع الساق 101سم، عدد القرون / النبات 42 قرن، وزن المئة بذرة 16 غرام، الإنتاجية 4 طن / هكتار، درجة الانفراط 1.

#### 2- Ascro3803:

تتراوح عدد الأيام اللازمة للنضج الفيزيولوجي والنضج الكامل بين (120-125) يوم، ارتفاع الساق 90 سم، عدد القرون / النبات 25 قرن، والإنتاجية 3-5 طن / هكتار، كما أنه قابل للانفراط عند النضج.

#### 5-6- المعاملات السمادية:

تم استخدام أربعة مستويات مختلفة من سماد أكسيد الزنك النانوي (0، 1، 2، 3) مغ / ل ورمز لها بـ

$Zn_0$ ،  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$  على الترتيب وبقواقع رشتان واحدة قبل الإزهار والأخرى قبل النضج الفيزيولوجي وفق الجدول رقم (3) ، حيث كانت أبعاد هذا السماد من  $(1-10^{-9})$ .

### جدول رقم (3) يوضح لمعاملات السمادية وتراكيز المحلول السمادي مغ/ل.

رمز المعاملة	المعاملات السمادية	المستويات السمادية (مغ / ل)
Zn <sub>0</sub>	0% شاهد بدون إضافة	0
Zn <sub>1</sub>	50% من النشرة المرفقة مع السماد	1
Zn <sub>2</sub>	100% من النشرة المرفقة مع السماد	2
Zn <sub>3</sub>	150% من النشرة المرفقة مع السماد	3

#### 5-7- طريقة التنفيذ الحقلية:

تم حراثة أرض التجربة حراثتان متعامدتان باستخدام المحراث المطرحي القلاب بعمق 30سم، ثم تعميمها باستخدام المحراث القرصي، و ثم تسوية التربة آلياً وتقسيمها إلى قطع تجريبية بأبعاد  $3 \times 2 = 6$  م<sup>2</sup>، تضمنت كل قطعة تجريبية أربعة خطوط بطول 3م بمسافة بين الخط والآخر 50سم، وزرعت البذور في حفر بمسافة (15-20) سم بين الحفرة والأخرى، بمعدل من 2-3 بذرة في الحفرة، وتركت مسافة 1م بين كل قطعة تجريبية وبين كل مكرر وآخر كممرات خدمة.

تم زراعة القطع التجريبية ببذور فول الصويا من الصنفين ( Sb 239, Ascro3803) بتاريخ 13-6-2021 وبدأ إنبات الشتلات بتاريخ 22-6-2021 ومن ثم التقريد إلى نبات واحد بتاريخ 28-6-2021 من الزراعة ثم بدأ الإزهار بعد حوالي الشهر من الزراعة وذلك بتاريخ 18-7-2021، كما تم زراعة خطين تجريبيين على محيط التجربة كنطاق حماية من نفس الصنفين المدروسين.

تم ري القطع التجريبية بعد الزراعة مباشرة بطريقة الري بالريذاذ بعدها استمر الري حسب حاجة النبات.

أجريت عملية الرش في الصباح الباكر باستعمال مرش ظهري سعة 20 لتر بأربع معاملات من السماد النانوي (0، 1، 2، 3) مغ / ل.

أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

---

تم إضافة الأسمدة العضوية بمعدل (2-3) م<sup>3</sup> / دونم والأسمدة المعدنية (NPK) حسب حاجة التربة بعد تحليلها وحسب المعادلة السمادية الموصى بها ( N:10, P:3, K:10 /دونم) (الصادرة عن الهيئة العامة للبحوث الزراعية).

تم التعشيب اليدوي لإزالة الأعشاب الضارة النامية في الحقل، كما تمت المكافحة كلما دعت الحاجة لذلك.



## 6- المؤشرات المدروسة:

بعد اكتمال مرحلة الإزهار عُلمت ستة نباتات من وسط كل قطعة تجريبية عشوائياً، وذلك لتقدير الصفات التالية:

6-1 ارتفاع النبات (سم): تم قياس ارتفاع النبات بواسطة المتر بدءاً من سطح التربة حتى قاعدة أعلى زهرة بعد اكتمال مرحلة الإزهار وكررت العملية عند النضج التام.

6-2 عدد الأوراق الخضراء: تم عد الأوراق على النباتات الممثلة للعينات في كل من مرحلة الإزهار والنضج الفيزيولوجي.

6-3 المسطح الورقي (سم<sup>2</sup>): تم حساب المسطح الورقي وفق المعادلة:

مساحة المسطح الورقي للنبات = مجموع (طول الورقة × أقصى عرض للورقة) × 0.624 مأخوذة عن (بله، 1996).

حيث 0.624 عبارة عن ثابت تصحيح مساحة الورقة لفول الصويا.

6-4 دليل المسطح الورقي: تم حسابها من القانون الآتي:

دليل المسطح الورقي = المسطح الورقي للنبات الواحد / مساحة الأرض التي يشغلها النبات مأخوذة عن (بله، 1996)

6-5 تقدير الوزن الرطب للنبات / غ: تم حساب الوزن الرطب بوزن 3 نباتات من كل مكرر لكل معاملة بميزان حساس عند كل من مرحلتي الإزهار والنضج.

## 7- النتائج والمناقشة:

7-1 تأثير استخدام مستويات مختلفة من أكسيد الزنك النانوي على ارتفاع النبات لمحصول فول الصويا في مرحلتي الإزهار والنضج:

يتبين من الجدول رقم (4) وجود زيادة معنوية واضحة لعملية الرش الورقي بسماذ أكسيد الزنك النانوي لكافة المستويات المدروسة ( $Zn_1$ : 50%،  $Zn_2$ : 100%،  $Zn_3$ :

150%.) بالمقارنة مع الشاهد، حيث بلغ ارتفاع النبات في مرحلة الإزهار عند كل من المستويات  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$  (53.33، 60.00، 54.50) سم على التوالي، بنسبة زيادة معنوية بلغت (25.77%، 38.47%، 23.07%) على الترتيب بالمقارنة مع الشاهد الذي بلغ ارتفاع النبات عنده 43.33 سم، م وكان ارتفاع النبات في مرحلة النضج عند أعلى قيمة عند المستوى  $Zn_2$  للصف Sb239 و Ascro 3803 على الترتيب (117.85، 112.20) وبنسبة زيادة معنوية قدرها (22.56%، 22.85%) على الترتيب، حيث تفوق الصف Sb239 على Ascro 3803، ملاحظة وجود تفوق معنوي واضح بين متوسط جميع المستويات، ونلاحظ عدم وجود فروق معنوية بين الصنفين المدروسين في مرحلة الإزهار.

#### جدول رقم (4) تأثير رش سماد أكسيد الزنك النانوي في ارتفاع النبات في مرحلة الإزهار (سم).

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد الصف
	$Zn_3$	$Zn_2$	$Zn_1$	$Zn_0$	
52.92 <sup>a</sup>	56.67	60.67	55.00	39.33	<b>Sb239</b>
52.67 <sup>ab</sup>	50.00	59.33	54.00	47.33	<b>Ascro3803</b>
c.v%=7.0	53.33 <sup>b</sup>	60.00 <sup>a</sup>	54.50 <sup>b</sup>	43.33 <sup>c</sup>	متوسط (C)
	g*c=6.456 c=4.565 g=3.228			L.S.D(0.05)	

بلغ ارتفاع النبات في مرحلة النضج (105.40، 115.02، 113.83) سم، عند كل من المستويات  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$  على التوالي بنسبة زيادة معنوية بلغت (42.93%، 55.98%، 54.36%) على التوالي مقارنة مع الشاهد الذي بلغ ارتفاع النبات عنده 93.74 سم، ونلاحظ وجود تفوق معنوي بين جميع المستويات، وكان ارتفاع النبات في مرحلة النضج عند أعلى قيمة عند المستوى  $Zn_2$  للصف Sb239 و Ascro 3803

أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

على الترتيب (117.85، 112.20) وبنسبة زيادة معنوية قدرها (22.56%)،  
22.85%) على الترتيب، حيث تفوق الصنف Sb239 على Ascro 3803 ، مع  
وجود تفوق معنوي واضح بين للصنف Sb239 على الصنف Ascro3803 في مرحلة  
النضج عند كافة المستويات المدروسة.

جدول رقم (5) يوضح أثر رش سماد أكسيد الزنك النانوي في ارتفاع النبات في مرحلة  
النضج (سم).

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد الصنف
	Zn <sub>3</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>0</sub>	
109.56 <sup>a</sup>	116.70	117.85	107.53	96.15	<b>Sb239</b>
104.44 <sup>b</sup>	110.97	112.20	103.27	91.33	<b>Ascro3803</b>
c.v%=2.2	113.83 <sup>a</sup>	115.02 <sup>a</sup>	105.40 <sup>b</sup>	93.74 <sup>c</sup>	متوسط (C)
	g*c=4.107 c=2.904 g=2.053			L.S.D(0.05)	

(ملاحظة: تدل الأحرف a, b, c على ترتيب المعاملات المتفوقة على الترتيب الأبجدي، وتدل الأحرف المتماثلة  
إلى عدم وجود فروق معنوية).

L. S. D: تدل على أقل فرق معنوي عند المستوى 0.05%، C.V%: معامل الاختلاف

كما نلاحظ من الجدول رقم (5) استجابة نبات فول الصويا للرش بأوكسيد الزنك  
النانوي حسب المرحلة الفيزيولوجية للنبات حيث كانت عند النضج أعلى منها عند  
الإزهار، ومن خلال دراسة ارتفاع النبات في كل من مرحلتي الإزهار والنضج نلاحظ  
تفوق المستوى Zn<sub>2</sub>(2مغ/لتر) على بقية المستويات المدروسة إذ حقق أعلى زيادة في  
ارتفاع النبات بينما انخفضت الزيادة عند المستوى Zn<sub>3</sub> .

تعود هذه الزيادة في ارتفاع النبات للدور الكبير الذي يلعبه عنصر الزنك في العديد من العمليات الحيوية في النبات كعملية التركيب الضوئي، كما أنه يعتبر عنصر ضروري لتكوين الحمض الأميني التربتوفان Tryptophane الضروري لاستطالة الخلايا وهذا بدوره أثر إيجابياً على زيادة ارتفاع النبات في كل من مرحلتي الإزهار والنضج مقارنة بالشاهد.

وهذا يتفق مع دراسات كل من (Weisany *et al.*, ; Ahmad *et al.*, 2020) و (Makarim *et al.*, 2017 ; Mahdiehm *et al.*, 2018 ; 2012 وخرمدیل، 2015) الذين أكدوا إلى زيادة ارتفاع النبات لمحصول فول الصويا عند الرش بأوكسيد الزنك النانوي.

7-2- تأثير استخدام مستويات مختلفة من سماد أوكسيد الزنك النانوي على عدد الأوراق الخضراء في كل من مرحلتي الإزهار والنضج:

توضح نتائج الجدول رقم (6) وجود تأثيراً معنوياً واضحاً للرش بسماد أوكسيد الزنك النانوي على عدد الأوراق الخضراء مقارنة مع الشاهد حيث ازداد عدد الأوراق عند كل من المستويات  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$  مقارنة بالشاهد، حيث كان هناك فروق معنوية بين جميع المستويات وبلغت متوسطات عدد الأوراق في النبات (40.5، 66.17، 57.50) عند المستويات  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$  على الترتيب وبنسبة زيادة معنوية (29.39%، 111.40%، 83.70%) مقارنة بالشاهد الذي بلغ عدد الأوراق عنده 31.33، وبلغ عدد الأوراق عند كل من الصنف Sb 239 و Ascro 3803 على الترتيب عند أعلى قيمة بين المستويات  $Zn_2$  (69، 63.33) وبنسبة زيادة معنوية بلغت (111.20%، 111.1%) على الترتيب حيث تفوق الصنف Sb239 على Ascro 3803.

أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

جدول رقم (6) يوضح تأثير رش أكسيد الزنك النانوي في عدد الأوراق الخضراء في  
مرحلة الإزهار.

متوسط الصنفين عدد المعاملات المدرسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد  الصنف
	Zn <sub>3</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>0</sub>	
51.08 <sup>a</sup>	58.33	69	44.33	32.67	<b>Sb239</b>
46.67 <sup>b</sup>	56.67	63.33	36.67	30.0	<b>Ascro3803</b>
c.v%=8.4	57.50 <sup>b</sup>	66.17 <sup>a</sup>	40.50 <sup>c</sup>	31.33 <sup>d</sup>	متوسط (C)
	g*c=7.194    c=5.087    g=3.597			L.S.D(0.05)	

بلغ عدد الأوراق الخضراء في مرحلة النضج عند المستويات Zn<sub>3</sub>، Zn<sub>2</sub>، Zn<sub>1</sub> على الترتيب (69.67، 94.67، 81.83) بنسبة زيادة معنوية (16.75%، 58.65%، 37.13%) واضحة على الترتيب مقارنة مع الشاهد في حين كان هناك تفوق معنوي واضح بين جميع المستويات مقارنة مع الشاهد والذي كان عنده عدد الأوراق 59.67، وبلغ عدد الأوراق عند الصنف Sb239 و Ascro3803 على الترتيب عند أعلى قيمة بين المستويات المدرسة أي عند المستوى Zn<sub>2</sub> (99.33، 90) وبنسبة زيادة معنوية قدرها (56%، 61.66%) على الترتيب حيث تفوق الصنف Sb239 على Ascro 3803.

جدول رقم (7) يوضح تأثير أكسيد الزنك النانوي في عدد الأوراق الخضراء في النبات في مرحلة النضج.

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد الصنف
	Zn <sub>3</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>0</sub>	
80.75 <sup>a</sup>	89.33	99.33	70.67	63.67	<b>Sb239</b>
72.17 <sup>b</sup>	74.33	90	68.67	55.67	<b>Ascro3803</b>
c.v%=4.5	81.83 <sup>b</sup>	94.67 <sup>a</sup>	69.67 <sup>c</sup>	59.67 <sup>d</sup>	متوسط (C)
	g*c=5.982 c=4.230 g=2.991			<b>L.S.D(0.05)</b>	

نلاحظ من الجدول رقم (7) تفوق المستوى Zn<sub>2</sub> (2مغ/لتر) على بقية المستويات المدروسة في تحقيق أعلى نسبة في عدد الأوراق الخضراء بينما انخفضت هذه الزيادة عند المستوى Zn<sub>3</sub>.

كما نلاحظ أن هناك فروق معنوية واضحة بين الصنفين المدروسين وتفوق الصنف Sb239 على الصنف Ascro 3803 وهذا يعود إلى التركيب الوراثي لكل من الصنفين المدروسين.

إن زيادة عدد الأوراق الخضراء يوضح بأن هناك استجابة واضحة وعالية لنبات فول الصويا للتسميد بأوكسيد الزنك النانوي ويعزى ذلك لما يمتلكه السماد النانوي من خصائص وسلوك مميز وفريد مثل (صغر حجم ذراته ومساحته السطحية الفعالة العالية، التي تمكنه من الزيادة في سرعته في الاختراق والامتصاص والتمثيل، وأهميته في عملية البناء الضوئي وتنشيط العديد من الأنزيمات) وهذا بدوره أدى إلى زيادة عدد الأوراق الخضراء.

هذا يتفق مع ما أكده ( AL-Zuhairi *et al.*, 2020; Rasmussem, 1974; )  
(Salama *et al.*, 2019).

7-3 تأثير استخدام مستويات مختلفة من سماد أكسيد الزنك النانوي على المساحة  
الورقية في مرحلة النضج والإزهار لمحصول نبات فول الصويا:

توضح نتائج الجدول رقم (8) وجود فروق معنوية واضحة بين جميع المستويات  
المدروسة عند الرش بسماد أكسيد الزنك النانوي مقارنة بالشاهد، حيث بلغ متوسط  
المساحة الورقية (924، 1513، 1272) سم<sup>2</sup> عند كل من المستويات  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$   
على الترتيب وبنسبة زيادة معنوية بلغت (65.88%، 171.63%، 128.36%) مقارنة  
بالشاهد الذي بلغ متوسط المساحة الورقية عنده 557 سم<sup>2</sup>، وبلغت المساحة الورقية  
للنبات عند أعلى مستوى  $Zn_2$  للصنف Sb239 و Ascro3803 على الترتيب (1592،  
1434) سم<sup>2</sup> وبنسبة زيادة معنوية (179.78%، 162.63%) على التوالي، وتجاوزت  
الصنف Sb239 على Ascro 3803، حيث نلاحظ وجود فروق معنوية واضحة بين  
جميع المستويات مقارنة مع الشاهد.

نلاحظ تفوق المستوى  $Zn_2$  على جميع المستويات، كما تبين نتائج الجدول رقم  
(8) عدم وجود فروق معنوية بين الصنفين المدروسين.

جدول رقم (8) يوضح تأثير رش سماد أكسيد الزنك النانوي في المساحة الورقية في مرحلة الإزهار (سم<sup>2</sup>).

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد الصنف
	Zn <sub>3</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>0</sub>	
1114 <sup>a</sup>	1359	1592	937	569	<b>Sb239</b>
1018 <sup>ab</sup>	1184	1434	910	546	<b>Ascro3803</b>
C.V%=14.1	1272 <sup>b</sup>	1513 <sup>a</sup>	924 <sup>c</sup>	557 <sup>d</sup>	متوسط (C)
	g*c=262.6 c=185.7 g=131.3			<b>L.S.D(0.05)</b>	

أشارت نتائج الجدول رقم (9) وجود فروق معنوية بين مستويات الرش بسماد أكسيد الزنك النانوي كافة مقارنة بالشاهد، حيث بلغ متوسط المساحة الورقية عند المستويات Zn<sub>3</sub>، Zn<sub>2</sub>، Zn<sub>1</sub> على الترتيب (2063، 2773، 2034) سم<sup>2</sup> ونسبة زيادة معنوية قدرها (29.01%، 73.42%، 27.20%) مقارنة بالشاهد الذي بلغت المساحة الورقية عنده 1559 سم<sup>2</sup>، وبلغت المساحة الورقية عند النضج للصنف Sb239 و Ascro3803 على التوالي (3091، 2454) سم<sup>2</sup> ونسبة زيادة معنوية قدرها (73.21%، 73.18%) على الترتيب عند المستوى Zn<sub>2</sub>، وتفوق الصنف Sb239 على Ascro 3803، وبينت نتائج الجدول رقم (9) تفوق المستويين Zn<sub>2</sub>، Zn<sub>1</sub> مقارنة بالشاهد مع عدم وجود فروق معنوية بينهما. بينما لم يكن هناك فروق معنوية بين المستويين Zn<sub>3</sub> والشاهد، ونلاحظ عدم وجود فروق معنوية بين الصنفين المدروسين في مرحلة النضج.

جدول رقم (9) يوضح تأثير رش بسماذ أكسيد الزنك النانوي في المساحة الورقية في مرحلة النضج.

متوسط الصنفين عند المعاملات المدرسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد  الصنف
	Zn <sub>3</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>0</sub>	
2326 <sup>a</sup>	2131	3091	2302	1781	<b>Sb239</b>
1908 <sup>ab</sup>	1937	2454	1823	1417	<b>Ascro3803</b>
C.V%=27.7	2034 <sup>b</sup>	2773 <sup>a</sup>	2063 <sup>ab</sup>	1599 <sup>b</sup>	متوسط (C)
	g*c=1025.7 c=725.3 g=512.8			<b>L.S.D(0.05)</b>	

وضحت نتائج الجدولين (8-9) تفوق المستوى Zn<sub>2</sub> (2 مغ / لتر) على جميع المستويات وهذا يدل على أنه المستوى الأفضل الذي يحتاجه النبات، حيث كان هناك علاقة خطية طردية في زيادة المساحة الورقية حتى المستوى Zn<sub>2</sub> وذلك بسبب دور الزنك في زيادة العمليات الفيزيولوجية والتمثيل الضوئي وكونه يدخل في تركيب الأحماض النووية الضرورية لانقسام الخلايا والذي أدى بدوره إلى زيادة عدد الخلايا في الأوراق وبالتالي زيادة المساحة الورقية للنبات (أبو ضاحي واليونس، 1988؛ الصحاف، 1989؛ غندور، 2020)، كما نلاحظ انخفاضها مجدداً عند المستوى Zn<sub>3</sub>.

إن هذه النتائج تتفق مع ما أكده كل من الباحثين (AL-Zuhairi *et al.*, 2020).

4-7 تأثير استخدام مستويات مختلفة من سماذ أكسيد الزنك النانوي على دليل المسطح الورقي في مرحلة الإزهار والنضج لمحصول فول الصويا:

توضح نتائج الجدول رقم (10) إلى وجود فروق معنوية بين المستويات المدرسة، حيث بلغ متوسط دليل المسطح الورقي عند المستويات Zn<sub>3</sub>، Zn<sub>2</sub>، Zn<sub>1</sub> على الترتيب (0.923، 1.513، 1.271) وبنسبة زيادة معنوية (61.36%، 164.51%،

122.20%) على التوالي مقارنة بالشاهد الذي بلغ عنده دليل المسطح الورقي 0.572، كما نلاحظ هناك فروق معنوية واضحة بين جميع المستويات المدروسة مقارنة بالشاهد ، وبلغ دليل المسطح الورقي عند الصنف Sb 239 و Ascro3803 على الترتيب عند المستوى Zn<sub>2</sub> (1.592، 1.434) وبنسبة زيادة معنوية بلغت (180.28%)، (149.39%) على التوالي.

كما بين الجدول رقم (10) عدم وجود تفوق معنوي للصنف Sb239 على الصنف Ascro3803 في مرحلة الإزهار.

جدول رقم (10) يوضح تأثير رش أوكسيد الزنك النانوي في دليل المسطح الورقي في مرحلة الإزهار.

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد
	Zn <sub>3</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>0</sub>	الصنف
1.114 <sup>a</sup>	1.359	1.592	0.937	0.568	<b>Sb239</b>
1.025 <sup>ab</sup>	1.183	1.434	0.910	0.575	<b>Ascro3803</b>
C.V%=14.0	1.271 <sup>b</sup>	1.513 <sup>a</sup>	0.923 <sup>c</sup>	0.572 <sup>d</sup>	متوسط (C)
	g*c=0.261 c=0.185 g=0.130			<b>L.S.D(0.05)</b>	

تبين نتائج الجدول رقم (11) وجود فروق معنوية بين المستويات المدروسة، حيث بلغ دليل المسطح الورقي عند المستويات Zn<sub>3</sub>، Zn<sub>2</sub>، Zn<sub>1</sub> على الترتيب (2.06، 2.77، 2.03) وبنسبة زيادة معنوية بلغت (28.75%، 73.12%، 26.87%) على التوالي مقارنة بالشاهد الذي بلغ عنده دليل المسطح الورقي 1.60، وبلغ دليل المسطح الورقي عند الصنفين Sb239 و Ascro3803 على الترتيب عند المستوى Zn<sub>2</sub> (3.09،

أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

2.45) وبنسبة زيادة معنوية قدرها (73.59%، 72.53%) في مرحلة النضج على الترتيب، كما تبين النتائج تفوق المستويين  $Zn_2$  و  $Zn_1$  على بقية المستويات المدروسة مع عدم وجود تفوق معنوي واضح بينهما. كما لم يكن هناك تفوق معنوي بين المستويين  $Zn_3$  والشاهد، وفق الجدول رقم (11) عدم وجود تفوق معنوي بين الصنفين المدروسين من فول الصويا في مرحلة النضج.

جدول رقم (11) يوضح تأثير رش أكسيد الزنك النانوي في دليل المسطح الورقي في مرحلة النضج.

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد الصنف
	$Zn_3$	$Zn_2$	$Zn_1$	$Zn_0$	
2.33 <sup>a</sup>	2.13	3.09	2.30	1.78	<b>Sb239</b>
1.91 <sup>ab</sup>	1.94	2.45	1.82	1.42	<b>Ascro3803</b>
C.V%=27.7	2.03 <sup>b</sup>	2.77 <sup>a</sup>	2.06 <sup>ab</sup>	1.60 <sup>b</sup>	متوسط (C)
	g*c=1.026 c=0.725 g=0.51			<b>L.S.D(0.05)</b>	

بينت النتائج الجدولين (10-11) أن زيادة مستوى الرش من (0 إلى 2) مغ / لتر من أكسيد الزنك أدى إلى زيادة طردية في دليل المسطح الورقي مقارنة بمستوى الرش 3 مغ / لتر من السماد المضاف، كما أن زيادة المساحة الورقية خلال مرحلتي الإزهار والنضج انعكست على دليل المسطح الورقي.

## 5-7 تأثير استخدام مستويات مختلفة من سماد أكسيد الزنك النانوي في الوزن الرطب في كل من مرحلتى النضج والإزهار لمحصول فول الصويا:

تبين نتائج الجدول رقم (12) وجود فروق معنوية واضحة بين المستويات المدروسة من تأثير الرش بسماد أكسيد الزنك النانوي، حيث بلغ متوسط الوزن الرطب عند كل من المستويات  $Zn_1$ ،  $Zn_2$ ،  $Zn_3$  (247.5، 396.7، 374.2) غ على الترتيب وبنسبة زيادة معنوية (50%، 140.42%، 126.78%) على التوالي مقارنة بالشاهد الذي بلغ عنده متوسط الوزن الرطب 165 غ، مع ملاحظة وجود فروق معنوية بين جميع المستويات المدروسة مقارنة بالشاهد، وبلغ الوزن الرطب للصف  $Sb239$  و Ascro3803 على التوالي عند المستوى  $Zn_2$  (430، 363.3) غ وبأعلى نسبة زيادة معنوية (143.35%، 136.98%) على الترتيب، وتؤكد نتائج الجدول رقم (12) تفوق معنوي واضح للصف  $Sb239$  على الصف الآخر Ascro3803 في مرحلة الإزهار.

جدول رقم (12) يوضح تأثير رش أكسيد الزنك النانوي في الوزن الرطب / غرام في مرحلة الإزهار.

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد الصنف
	$Zn_3$	$Zn_2$	$Zn_1$	$Zn_0$	
324.6 <sup>a</sup>	403.3	430	288.3	176.7	<b>Sb239</b>
267.1 <sup>b</sup>	345	363.3	206.7	153.3	<b>Ascro3803</b>
C.V%=3.7	374.2 <sup>b</sup>	396.7 <sup>a</sup>	247.5 <sup>c</sup>	165 <sup>d</sup>	متوسط (C)
	g*c=18.93	c=13.38	g=9.46		<b>L.S.D(0.05)</b>

أثر أكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

تشير نتائج الجدول رقم (13) إلى وجود فروق معنوية بين المستويات المدروسة من رش سماد أكسيد الزنك النانوي في نبات فول الصويا، حيث كان متوسط الوزن الرطب للنباتات في مرحلة النضج عند كل من المستويات Zn<sub>1</sub>، Zn<sub>2</sub>، Zn<sub>3</sub> (378، 614، 547) غ على الترتيب وبنسبة زيادة معنوية بلغت (29.01%، 109.55%، 86.68%) على الترتيب مقارنة بالشاهد الذي كان عنده متوسط الوزن الرطب 293 غ، وكان الوزن الرطب في مرحلة النضج عند أعلى قيمة له بين المستوى أي عند المستوى Zn<sub>2</sub> عند الصنف Sb239 و Ascro3803 على الترتيب (674، 582) غ وبنسبة معنوية (118.58%، 100.68%) على التوالي، كما أشارت النتائج إلى تفوق المستوى Zn<sub>2</sub> على بقية المستويات الأخرى، وعدم وجود تفوق معنوي واضح بين الصنفين المدروسين في مرحلة النضج.

جدول رقم (13) يوضح تأثير رش أكسيد الزنك النانوي في الوزن الرطب / غرام في مرحلة النضج.

متوسط الصنفين عند المعاملات المدروسة (g)	تركيز المحلول (C) مغ / لتر				التسميد الصنف
	Zn <sub>3</sub>	Zn <sub>2</sub>	Zn <sub>1</sub>	Zn <sub>0</sub>	
476 <sup>a</sup>	531	647	434	296	<b>Sb239</b>
441 <sup>ab</sup>	563	582	322	290	<b>Ascro3803</b>
C.V%=11.8	547 <sup>b</sup>	614 <sup>a</sup>	378 <sup>c</sup>	293 <sup>d</sup>	متوسط (C)
	g=47.5	c=67.1	g*c=94.9		<b>L.S.D(0.05)</b>

أكدت النتائج الجدولين (12-13) السابق أن المستوى Zn<sub>2</sub> (2 مع / لتر) حقق أعلى نسبة زيادة بينه وبين المستويات الأخرى وذلك يعود إلى دور الزنك في عمليات

مجلة جامعة البعث المجلد 44 العدد 12 عام 2022 بتول السماعيل د. جورج غندور د. محمود الحمدان د. حسين سليمان  
التمثيل الضوئي واستطالة الخلايا ومن ثم ارتفاع النبات وهذا بدوره انعكس على الوزن  
الرطب للنبات.

أظهرت النتائج أن هناك زيادة طردية خطية عند الرش بسماد أكسيد الزنك  
النانوي حتى المستوى  $Zn_2$  ومن ثم انخفاضها عند المستوى  $Zn_3$ .

إن هذه النتائج تتفق مع ما درسه بعض الباحثين ( salama *et al.*, 2019; Weisany  
*et al.*, 2012; Mahdieh *et al.*, 2018; في تأثير دور الزنك في الوزن الرطب.

أدى الرش الورقي بسماد أكسيد الزنك النانوي بالتركيز (  $Zn_0$ ,  $Zn_1$ ,  $Zn_2$ ,  $Zn_3$  )  
لصنفين من فول الصويا Sb239 و Ascro3803 المزروعين في ظروف  
محافظة حمص للتوصل للاستنتاجات التالية:

1- زيادة معنوية واضحة بارتفاع النبات وبأعلى نسبة عند المعاملة  $Zn_2$  والتي  
وصلت إلى 38.47% في مرحلة الإزهار و 55.98% عند النضج لمتوسط  
الصنفين المدروسين وذلك بالمقارنة مع الشاهد.

2- زيادة معنوية واضحة في عدد الأوراق الخضراء بأعلى نسبة عند المعاملة  $Zn_2$   
والتي بلغت إلى 111.40% في مرحلة الإزهار و 58.65% عند النضج وذلك  
لمتوسط الصنفين المدروسين بالمقارنة مع الشاهد.

3- زيادة معنوية واضحة للمساحة الورقية ودليل المسطح الورقي بأعلى نسبة عند  
المعاملة  $Zn_2$  والتي وصلت على الترتيب للمؤشرين المدروسين إلى  
(171.63%، 164.51%) في مرحلة الإزهار و (73.42%، 73.12%) عند  
النضج لمتوسط الصنفين المدروسين وذلك بالمقارنة مع الشاهد.

4- زيادة معنوية واضحة في الوزن الرطب بأعلى نسبة عند المعاملة  $Zn_2$  والتي  
وصلت إلى 140.42% في مرحلة الإزهار و 109.55% عند النضج لمتوسط  
الصنفين المدروسين وذلك بالمقارنة مع الشاهد.

### التوصيات:

- 1- الرش الورقي بأوكسيد الزنك النانوي بتركيز 2 مغ / لتر على صنف فول الصويا خلال مرحلتي الإزهار والنضج في ظروف محافظة حمص.
- 2- إجراء المزيد من الأبحاث والدراسات على الرش الورقي بأنواع سمادية أخرى وعلى أصناف أخرى من فول الصويا.

## المراجع العربية:

- 1- أبو ضاحي، يوسف محمد، اليونس، مؤيد أحمد. 1988. دليل تغذية النبات، دار الكتب للطباعة والنشر، جامعة الموصل، نينوى، العراق، ص 410.
- 2- الصحاف، فاضل حسين. 1989. علم تغذية النيات التطبيقي، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، جامعة بغداد، بيت الحكمة، العراق، ص 258.
- 3- القدسي، ينال. 2019. الأسمدة والمبيدات النانوية ودورها في الإنتاج الزراعي، مجلة الزراعة، وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي، (57) 33-37.
- 4- المجموعة الإحصائية الزراعية السنوية. 2020. منشورات وزارة الزراعة والإصلاح الزراعي. مديرية الإحصاء والتخطيط. قسم الإحصاء، سوريا.
- 5- بلة، عدنان. 1996. فيزيولوجيا المحاصيل الحقلية، منشورات جامعة تشرين، كلية الزراعة، 330 صفحة.
- 6- غندور، جورج. 2020. أساسيات الفيزيولوجيا النباتية. منشورات جامعة البعث، كلية العلوم، قسم علم الحياة.
- 7- كيال، حامد; صبوح، محمود; نمر، يوسف. 1998. المحاصيل الصناعية. منشورات جامعة دمشق.
- 8- لطفي، السعيد لطفي السيد فتحي. 1986. تأثير صور النتروجين ومستويات الكالسيوم المختلفة في المحاليل الغذائية على نمو وحاصل نبات الطماطم (*Lycopersicon Esculentum Mill.*) رسالة ماجستير. كلية الزراعة. جامعة بغداد.

المراجع الأجنبية:

- 1- Abdel, E., & Haggan, L. M. (2014). Effect of micronutrients foliar application on yield and quality traits of soybean cultivars. International Journal of Agriculture and Crop Sciences, 7-11.
- 2- Abo batta, waleed. (2016). <http://news-service.stanford.edu/pr/01/nanoadvance3711.html>
- 3- Ahmad, R., Alyemeni, M., Al-Huqail, A. A., Alqahtani, M. A., Wijaya, L., Ashraf, M., Kaya, C., and Bajguz, M. A. (2020). Zinc Oxide Nanoparticles Application Alleviates Arsenic (As) Toxicity in Soybean Plants by Restricting the Uptake of as and Modulating Key Biochemical Attributes, Antioxidant Enzymes, Ascorbate-Glutathione Cycle and Glyoxalase System. Plants, 9, 825; 2(18). doi:10.3390/plants9070825.
- 4- AL-Zuhairi, O., AL-Mahdawi, MML., Hammadi, M., (2020). Study the effect of addition nano Zinc oxide on the Vegetative, flowering and fruiting characteristics of growing capsicum frutescens plant in closed hydroponics system. Dyala greculticure since journal. 12.
- 5- Dülgerbaki, T. (2010). Maş fasulyesinde (*Phaseolus aureus L.*) farklı çinko uygulamalarının verim ve verim unsurları üzerine etkisi. Yüksek Lisans. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Isparta.

- 6- Erickson, P. and Brekke, M., 1980. Hand Book of soy oil processing and utilization Soybean. American Soybean assoc , oil chem. soc., USA.
- 7- Havlin, J.L., Tisdale, S.L., Nelson, W.L., and Beaton, J.D. (2005). Soil Fertility and Fertilizers, 5th Edition's.USA
- 8- Haytova, D. (2013). A review of foliar fertilization of some vegetables crops. Annu. Rev. Res.Bio 3(4):455-465.
- 9- Kazemi, M. (2013). Effect of foliar application of iron and zinc on growth and productivity of cucumber. Bull. Env. Pharmacol. Life Sci, 2(11):11- 14
- 10- Lee, GA.; Crawford, G W.; Liu, Ll.; Sasaki,Y. ; and Chen,X. (2011). "Archaeological Soybean (*Glycine max L.*) in East Asia: Does Size Matter?". PLoS ONE. 6 (11): e26720.
- 11- Lin, Bao- shan; Diao, Shao- Qi; Li, Chun- Hui; Fang, Li- Jun; Qiao, ShuChun; Yu- Min. (2014). Effect of Tms (nanostructured silicon dioxide) on growth of changbai larch seedlings. Journal of Forestry Research. 15 (2), 138- 140.
- 12-Malakooti, S. H., Majidian, M., Ehteshami, S. M., & Rabiee, M. (2017). Evaluation of iron and zinc foliar and soil application on quantitative and qualitative characteristics of two soybean cultivars. The IIAB Journal, 8(3), 1-7
- 13-Mahdiehm M., Sangi, M. R., Bamdad, F., Ghanem, A., (2018). Effect of seed and foliar application of nano- zinc oxide, Zinc

- chelatem and zinc sulphate rates on yield and growth of pinto bean (*phaseolus vulgaris*) cultivars. Journal of lant Nutrition, 41(18), 2401-2412
- 14-Makarjian, H., Shojaei, H., Damarandi, A., Dehsorkhi, A. N., Akhyani, A. (2017). The effect of foliar application of zinc oxide in common and nano particles forms on some growth and quality traits of Mungbean (*Vigna radiate L.*). Iranian Journal Pulsses Research. 8(2), 166-180
- 15-Raliya, R, V. Saharan .C.Dimkpa . and P. Biswas. (2018). Nanofertilizer for Precision and Sustainable Agriculture: Current State and Future Perspectives. Journal of Agricultural and Food Chemistry,66(26),6487-6503.
- 16-Rasmussen, 1974. Different Zink fertilizers for tulip. 78 (2) 183-190. (C. F. Hort. Abst. 45. Abst. No.1847)
- 17-Salama. D. M., Osman. A. S., Abd El-Aziz. M. E., Abd El-wahed. M. S.A. and Shaaban. E. A. (2019). Effect of Zinc oxide nanoparticles on the growth, genomic DNA, production and the quality of common dry bean (*phaseolus vulgaris*). Biocatalysis and Agricultural Biotechnology. (18). 101083.
- 18-Weisany, W., Sohrabi, Y., Heidari, G., Siosemardeh, A., Ghassemi-Golezani. (2012). Changes in antioxidant enzymes activity and plant performance by salinity stress and zinc

application in soybean (*Glycine max L.*). Plant Omics Journal 5(2): 60-67. Iran.

19-Yaramancı, H. (2009). Farklı sıra üzeri ekim mesafelerinin soya fasulyesinde (*Glycine max L. Merrill*) verim ve verim unsurları üzerine etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarla Bitkileri Ana Bilim Dalı, Ordu.

20-Yruela, I., (2015). A handbook of plant nutrition-2nd edition. Estación Experimental de Aula Dei, Consejo Superior de Investigaciones Científicas (EEAD-CSIC), Avda. Montañana 1005, 50059-Zaragoza, Spain.

21-Singh, A., Singh, N.B., Afzal, S., Singh, T., Hussain, I., (2018). Zinc oxide nanoparticles: a review of their biological synthesis, antimicrobial activity, uptake, translocation and biotransformation in plants. J. Mater. Sci. 53 (1), 185-201. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-1544-1>.

أثر أوكسيد الزنك النانوي في بعض المؤشرات المورفولوجية في صنفين من فول الصويا  
(*Glycine max L.*) ضمن ظروف محافظة حمص

---

## طريقة لتقدير العمر التشغيلي الآمن لمحطة

## استطاعة نووية وآليات إطلالة عمر المنشأة

بلال علي<sup>1</sup>

د. سليمان ديبو<sup>3</sup>

د. عبدالله رستاوي<sup>2</sup>

### الملخص

في هذا البحث، أدخلنا مصطلحاً جديداً هو العمر التشغيلي الآمن لمحطة نووية ما. وعرفناه على أنه المدة الزمنية التي تتعرض خلالها خرسانة الدرع البيولوجي لكمية من الإشعاع النووي تتسبب بوصول هذه الخرسانة إلى عتبة فقدان المقاومة. كما أدخلنا تعريفاً آخرًا هو عتبة فقدان المقاومة لخرسانة ما على أنها التعرض لسيالة نيوترونية وجرعة أشعة غاما اللتان تسببان انخفاضاً في مقاومتها النسبية قدره 0.1 عن مقاومتها النسبية الابتدائية قبل التعرض للإشعاع. وبناء على ذلك، وضعنا طريقة لتقدير العمر التشغيلي الآمن لأي محطة نووية. وقمنا أيضاً، بناء على الدراسات المرجعية لتغير المقاومة النسبية لكافة المحطات، بتعيين مجال أعمار المحطات النووية الحالية، التي هي قيد التشغيل. فوجدنا أن العمر التشغيلي الآمن يتعلق بشكل رئيسي بنوع الركام الذي بُنيت منه خرسانات الدروع البيولوجية لتلك المحطات. وأن مجال الأعمار الآمن للمحطات الحالية المعين اعتماداً على المقاومة الانضغاطية النسبية يتراوح تقريباً بين 75 سنة حتى 110 سنوات.

**الكلمات المفتاحية:** العمر التشغيلي الآمن، عتبة فقدان المقاومة، مجال الأعمار الآمن.

<sup>1</sup> طالب ماجستير فيزياء نظرية في قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

<sup>2</sup> قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

<sup>3</sup> قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

# A method for estimating the safe operating life of a nuclear power plant and mechanisms to extend the life of the facility

Bilal Ali<sup>4</sup>

Dr. Abdullah Rastanawi<sup>5</sup>

Dr. Solaiman Dibo<sup>6</sup>

## Abstract

In this paper, we have introduced a new term which is the safe operating life of a nuclear plant. We defined it as the time during which the biological shield concrete is exposed to an amount of nuclear radiation that causes this concrete to reach the threshold of strength loss. We also introduced another definition is the strength loss threshold of a concrete as being exposed to a neutron flux and gamma ray dose that cause a decrease in its relative strength of 0.1 from its initial relative resistance before exposure to radiation. Accordingly, we developed a method for estimating the safe operating life of any nuclear plant. Based on the reference studies of the change in the relative strength of all the plants, we also determined the life range of the current nuclear plants, which are in operation. We found that the safe operating life is mainly related to the type of aggregate from which the biological shield concretes for those plants were built. And the safe life range of the current plants, which is determined based on the relative compressive strength, ranges from approximately 75 years to 110 years.

**Keywords:** safe operating life, strength loss threshold, safe life range

---

<sup>4</sup> Master student in Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University

<sup>5</sup> Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University.

<sup>6</sup> Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University.

## 1. مقدمة

من المواضيع الهامة جداً من أجل التشغيل الطويل-الأمد لمحطات الاستطاعة النووية هو دراسة شيخوخة بناها الخرسانية. إن أهم البنى الخرسانية التي تلعب دوراً في تحديد العمر التشغيلي لأي محطة نووية هي: بناء الاحتواء الأولي، والدرع البيولوجي والخرسانة الداعمة. حيث إن هذه البنى وغيرها من البنى المتعلقة بأمان المحطة يجب أن تكون قادرة على الاحتفاظ بمقدرتها البنيوية طوال عمرها التشغيلي. ولذلك، يجب أن يبدي الفحص الدوري للمقدرة البنيوية لها، لا سيما بعد انقضاء مدة 60 عاماً من بدء تشغيلها، أنها ما تزال في حالة مرضية حتى يُضمن بأن الاستمرار في تشغيلها ما يزال آمناً [1].

إن جدار الدرع البيولوجي الخرساني concrete biological shield (CBS) wall هو الخرسانة الأكثر أهمية في تحديد العمر التشغيلي، إن لم نقل أنها هي التي تحدد العمر التشغيلي. وذلك نظراً، أولاً، لأهمية وظيفتها اللتان هما؛ الوظيفة البنيوية التي هي تحمل إجهادات كبيرة مختلفة، والوظيفة التدريعية التي هي وقاية العاملين من خطر الإشعاع الصادر عن المفاعل، وثانياً، لأنها هي الخرسانة الأكثر تعرضاً للإشعاع بسبب قربها من وعاء الضغط للمفاعل. ولذلك، فإن إبداءها أنها ما تزال قادرة من الناحية البنيوية على أداء هاتين الوظيفتين المعدة لهما بالتصميم الأساس هو مطلب بالغ-الأهمية في إدارة شيخوخة المحطة بفعالية وانتباه وحرص. حيث أن تعرض هذه الخرسانة لسيالة نيوترونية أكبر من عتبة معينة يمكن أن يتسبب بفقدان الخرسانة لمقاومتها، بسبب حدوث ما يسمى الانتفاخات الحجمية فيها. وإذا ما تجاوزت سوية تشعيع الخرسانة بالنيوترونات لتلك العتبة، فإن جدار الدرع البيولوجي يصبح عرضة للانهييار في أي لحظة، وحدث كارثة نووية لا تُحمد عقباه. لذلك، نرى أنه من الضروري أن نكون على دراية دقيقة بتأثير التفاعلات النيوترونية وخاصة التي تتسبب بالانتفاخات الحجمية في الخرسانة، وكيفية تقليلها، وإجراء تقديرات للفقد في مقاومة الخرسانة من أجل تحديد العمر التشغيلي الموافق للعتبة من أجل كل محطة نووية على انفراد. وذلك أولاً من أجل تفادي حدوث

الكارثة نووية-بيئية، **وثانياً** من أجل معرفة كيف يمكننا إطالة عمر محطة معينة لأطول مدة ممكنة. وهذا هو جوهر الهدف من بحثنا.

## 2. هدف البحث

إن المشكلة الأساسية في هذا البحث تكمن في أننا نحن نفترض أن عمر خرسانة الدرع البيولوجي هو العمر التشغيلي الآمن لأي محطة نووية تم أو سيتم إنشاؤها، وذلك نظراً لأنه بانهايار هذه الخرسانة تتدمر المنشأة النووية كاملة حتى لو كانت كافة أجزاء المحطة، بما فيها المفاعل النووي، تعمل بشكل سليم. فضلاً عن الضرر الإشعاعي البيئي الذي ستتسبب به على كامل الأرض في حال حدوث هكذا كارثة. ولذلك، هدفنا من البحث يصبح **أولاً** هو عمل دراسة مرجعية عن تأثير الإشعاع النووي الصادر من قلب المفاعل عبر وعاء الضغط للمفاعل على الخواص الميكانيكية لخرسانة الدرع البيولوجي بشكل أساسي من أجل وضع طريقة لتحديد العمر التشغيلي الآمن لكل محطة بذاتها. وبما أن تكلفة إنشاء أي محطة نووية هي تكلفة اقتصادية عالية جداً، فإن هدفنا **ثانياً** يكون معرفة الآليات أو الإجراءات التي يمكننا من خلالها إطالة عمر خرسانة الدرع البيولوجي من أجل إطالة عمر المحطة للاستفادة منها لأطول مدة ممكنة.

## 3. مواد وطرق البحث

### 1.3. الخواص الميكانيكية للخرسانة

تعتبر مقاومة الخرسانة اسماً عاماً للعديد من الخصائص الميكانيكية للخرسانة، التي تقسم إلى عدة أنواع هي مقاومة الانضغاط compressive strength، ومقاومة الشد tensile strength، ومقاومة الانثناء flexural strength، مقاومة القص shear strength، مقاومة الكلال fatigue strength. ومعامل المرونة modulus of elasticity.

حيث أن أكثر هذه الأنواع تأثيراً والتي تم التركيز عليها هي:

**مقاومة الانضغاط:** وهي أقصى إجهاد ضغط يمكن أن للمادة (الخرسانة) أن تتحملة

من دون يحصل لها انهيار.

**مقاومة الشد:** هي أقصى إجهاد شد يمكن للمادة أن تتحملة من دون أن يحصل لها

انهيار.

**معامل المرونة:** هو ميل منحنى الإجهاد-انفعال stress-strain curve لهذا الجسم في مجال التشوه المرن [2].

### 2.3. دراسة مرجعية عن تأثير الإشعاع على الخصائص الميكانيكية

من خلال دراسة الخصائص الميكانيكية للخرسانات بعد تعريضها لسيلالات نيوترونية وجرعات من أشعة غاما وأحياناً لظروف محاكية للظروف التي تتعرض لها خرسانة الدرع البيولوجي، أحرز مختبر أوك ريدج الوطني (ORNL) أيضاً تقدماً كبيراً في فهم تأثيرات الإشعاع على الخرسانة الذي تجلى بنشره للتقارير والمقالات التالية [3,4,5,6,7,8,9]. كما أحرز معهد أبحاث الاستطاعة الكهربائية (EPRI) تقدماً كبيراً في فهم آثار (تأثيرات) الإشعاع على الخرسانة، منذ أن انطلق بدايةً بنشر وثيقة خارطة طريق ابتدائية في عام 2012، الذي تجلى بإصداره للعديد من التقارير [10,11,12,13,14,15]. وكذلك أيضاً، قدمت العديد فرق البحثية المختصة في العالم مساهمات إضافية أخرى قيمة نذكر منها مثلاً البحوث التالية [16,17,18]. ونحن نتوقع بأنه اعتماداً على هذه الأعمال يمكننا أن نضع طريقة لتقدير العمر التشغيلي الآمن، الذي يمكن للمحطة أن تشتغل خلاله بشكل آمن من ناحية كون الخرسانة ما تزال قادرة على تحمل الاجهادات التي تتعرض لها، فضلاً عن معرفة الإجراءات أو التحسينات التي من شأنها أن تساهم في إطالة عمر المحطة، فضلاً عن تحديد العمر التشغيلي الآمن للمحطات التي قيد التشغيل.

إن الدرع البيولوجي هو البنية الخرسانية الوحيدة التي تعاني من سويات إشعاعية يمكن أن تتسبب بدهورها قبل كافة الخرسانات الأخرى بمدة طويلة نسبياً. لذلك، فإننا نعتبر أن عتبة فقدان المقاومة لهذه الخرسانة هو الذي يحدد العمر التشغيلي الآمن للمحطة، نظراً لأن بقية أجزاء المحطة غير الخرسانية التي تتعرض لسويات إشعاعية عالية في غالبيتها تخضع للصيانة الدورية والاستبدال. ومن أجل ذلك، فإننا نعرف العمر التشغيلي الآمن لمحطة ما بأنه المدة الزمنية التي تتعرض خلالها الخرسانة لكمية إشعاع نووي (سيالة نيوترونية وأشعة غاما) تتسبب بوصول الخرسانة إلى عتبة فقدان المقاومة الخاصة بها، التي تُسمى **عتبة الضرر (عتبة فقدان**

**المقاومة).** كما نعرف عتبة فقدان المقاومة لخرسانة ما بأنها التعرض لسيالة نيوترونية وجرعة أشعة غاما اللتان تسببان انخفاضاً في مقاومتها النسبية قدره 0.1 من مقاومتها النسبية الابتدائية قبل أي تعرضها للإشعاع.

إن تقدير عمر التشغيلي الافتراضي الآمن لمحطة نووية ما ومعرفة الإجراءات اللازمة لإطالة عمرها التشغيلي تتطلب منا معرفة ما يلي:

### 1.2.3. تعرض الخرسانة المتوقع للنيوترونات

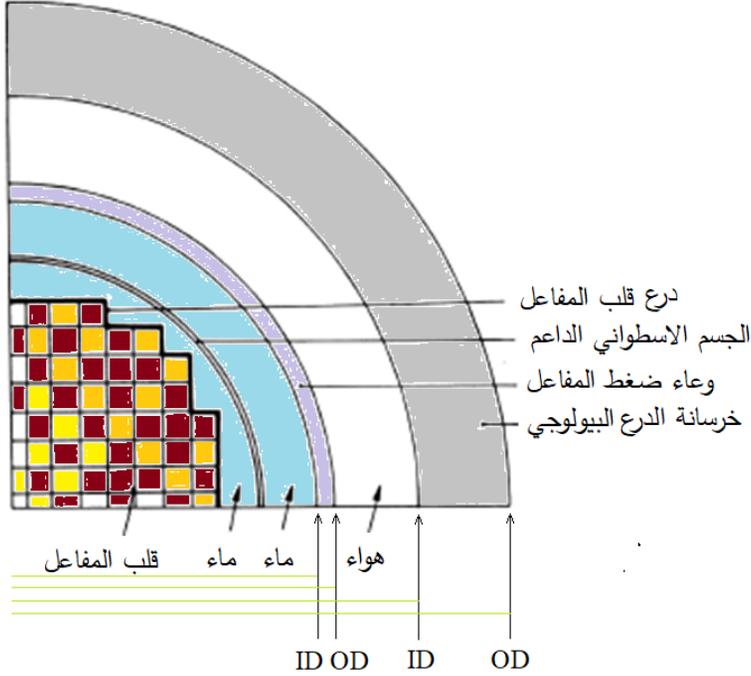
لكي يتم تقدير الحالة المتوقعة لخرسانة الدرع البيولوجي عند تقدير سنوات تشغيل المحطة بالاستنطاعة الكاملة الفعالة<sup>7</sup> (EFPY)، فإننا بحاجة إلى معرفة سويات الإشعاع التي يتوقع أن تتعرض لها خلال هذا العمر. ومن الضروري إجراء الحسابات المتعلقة بسنوات التشغيل بالاستنطاعة الكاملة الفعالة من أجل كل محطة. وفي مثل هذه المقارنة للحسابات نحن بحاجة إلى معرفة الطرق التي تسمح لنا بحساب السوية المتوقعة للسيالة النيوترونية الساقطة على خرسانة جدار الدرع البيولوجي CBS انطلاقاً من معرفة السويات المتوقعة للسيالة النيوترونية الخارجة من فولاذ وعاء الضغط للمفاعل وفقاً لما تقدمه برامج مراقبة وعاء الضغط للمفاعل الخاص بكل محطة.

**A. السيادة النيوترونية عند القطر الداخلي للدرع البيولوجي:** إن سيالة نيوترونية ذات طاقة  $E$  أكبر من 0.1 MeV هي السيالة الأساسية التي تستخدم حالياً من أجل تقدير الحالة المتوقعة للخرسانة، نظراً لأن معظم العيوب النقطية<sup>8</sup> المتشكلة في ركام الخرسانة إنما تنشأ بفعل نيوترونات تمتلك هكذا طاقات [15]. ويمكن حساب السيالة النيوترونية التي تتعرض لها الخرسانة انطلاقاً من السيالة النيوترونية الموجودة في وعاء الضغط للمفاعل RPV، التي عادة تكون محسوبة بدقة في كل محطة. وعلى الرغم من أنه يمكن حساب السيالة النيوترونية

<sup>7</sup> إن 72 EFPY يمكن أن تمثل 80 عاماً من العمر الزمني للمحطة plant chronological age على فرض أن عامل القدرة هو 90% capacity factor.

<sup>8</sup> إن العيوب النقطية هي مناطق صغيرة يحدث فيها انخلاع لمجموعة من الذرات المتجاورة من الشبكة البلورية للركام، التي تتسبب بتوسعات حجمية في الخرسانة.

الموجودة في وعاء الضغط للمفاعل RPV التي تمتلك طاقة أكبر من  $E > 0.1 \text{ MeV}$ ، إلا أنه من الضروري أن يتم أولاً حساب السيادة النيوترونية المتوقعة التي تمتلك طاقة  $E > 0.1 \text{ MeV}$  عند القطر الداخلي (ID) لوعاء الضغط للمفاعل، انظر الشكل (1).



**الشكل (1):** رسم مقطع عرضي للمفاعل يظهر أجزاءه من قلب المفاعل حتى خرسانة الدرع البيولوجي.

وهذا ما يجب عمله من أجل كل محطة على حده. ومن ثم أن يتم تقدير السيادة النيوترونية ( $n/cm^2$ )، التي يتم توهينها من عند القطر الداخلي ID لوعاء الضغط للمفاعل RPV حتى عند قطره الخارجي (OD). وذلك باستخدام معادلة التوهين الموجودة في الدليل التنظيمي المرجع [19]. مع ملاحظة أن المعادلة 3 في الدليل التنظيمي هذا مبنية على أساس أن عوامل التوهين قد تم تعيينها من أجل سماكة قدرها ذرة واحدة أو انزياح لكل ذرة (dpa). ووفقاً لما ذكر راندول **Randall** [20]، فإنهم كانوا سابقاً يحسبون السيادة النيوترونية الموهنة باستخدام شكل آخر لهذه المعادلة فيه قوة العامل الأسّي، المبني على أساس التوهين، تكون

$-0.24x$ ، حيث  $x$  هي سماكة الوعاء مقدره بالإنش (inches). وعلى كل حال، إن المعادلة المناسبة من أجل تعيين التوهين للسيالة النيوترونية العابرة لجدار وعاء الضغط للمفاعل RPV هي:

$$\Phi_{1.0 \text{ MeV}} = \Phi_{\text{surf}} (e^{-0.33x}) \quad (1)$$

حيث  $\Phi_{1.0 \text{ MeV}}$  هي قيمة السيالة النيوترونية ( $\text{n/cm}^2$ ) ذات الطاقة  $E > 1.0 \text{ MeV}$  عند السطح الخارجي لوعاء الضغط للمفاعل. و  $\Phi_{\text{surf}}$  هي السيالة النيوترونية ( $\text{n/cm}^2$ ) ذات الطاقة  $E > 1.0 \text{ MeV}$  عند السطح المبلل الداخلي لوعاء الضغط للمفاعل. و  $x$  هي سماكة جدار وعاء الضغط للمفاعل RPV مقدره بالإنش.

من أجل السهولة، عند الدراسة التحليلية، يستخدم بعض المؤلفين نسبة السيالة النيوترونية بين السيالة OD عند  $E > 0.1 \text{ MeV}$  وعند  $E > 1.0 \text{ MeV}$  التي تعتمد على سماكة الوعاء. وقد أجريت دراسة مرجعية للحصول على البيانات المتاحة من التقييمات السابقة من قبل باحثي المراجع [3,4,20]، وذلك من أجل تحديد نسبة بين السيالتين النيوترونييتين من أجل هاتين الطاقيتين. ولقد أظهرت مطابقة أفضل منحنى مع هذه البيانات أن هذه العلاقة تكون:

$$\Phi_{0.1 \text{ MeV}}/\Phi_{1.0 \text{ MeV}} = 2.123 (e^{0.191x}) \quad (2)$$

حيث  $\Phi_{0.1 \text{ MeV}}$  هي السيالة النيوترونية ( $\text{n/cm}^2$ ) ذات الطاقة  $E > 0.1 \text{ MeV}$  عند السطح الخارجي لـ RPV.

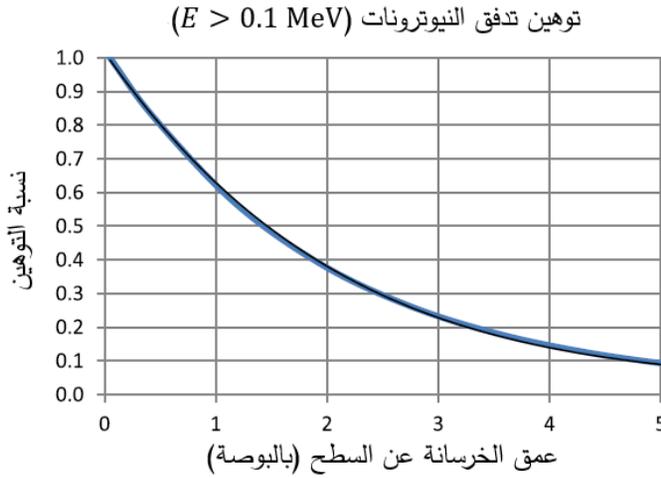
لقد تم استقراء البيانات المقدمة من مفاعلات الماء المضغوط PWRs ومفاعلات الماء المغلي BWRs في الولايات المتحدة [4] من أجل تقدير السيالة النيوترونية عند الجدار الخارجي OD لوعاء الضغط للمفاعل RPV المتوقعة بعد 80 عاماً من بدء تشغيل المفاعل (مع افتراض EFPY قدرها 73.6 years)، فكانت، من أجل مفاعلات الماء المضغوط PWRs:  $\Phi_{0.1 \text{ MeV}} = 6.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ . وكانت من أجل مفاعلات الماء المغلي BWRs:  $\Phi_{0.1 \text{ MeV}} = 1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ . مرة أخرى، نذكر بأنه من الضروري أن يتم إجراء تقدير مستقل للسيالة النيوترونية للمحطات كل على حده لتوفير قيم دقيقة تنطبق على كل محطة بذاتها.

باستخدام السيادة النيوترونية التي عند القطر الخارجي OD للوعاء، يمكن حساب السيادة النيوترونية التي عند القطر الداخلي ID لخرسانة الدرع البيولوجي CBS. إن السيادة النيوترونية ذات الطاقة  $E > 0.1 \text{ MeV}$  التي عند القطر الداخلي ID لخرسانة الدرع البيولوجي CBS ستكون أخفض مما هي عليه عند القطر الخارجي OD لوعاء الضغط للمفاعل RPV. ويرجع ذلك في المقام الأول إلى وجود فجوة هوائية بين OD للوعاء و ID للخرسانة. وقد تم استخدام التحليلات التي أجراها مختبر أوك ريج الوطني (ORNL) [4] ومعهد أبحاث الاستطاعة الكهربائية (EPRI) [11] لمقارنة قيم السيادة النيوترونية عند OD للوعاء مع تلك التي للخرسانة عند ID للجدار الداخلي لـ CBS. في كل من التحليلين، عند كلا الموضعين قد تم الحساب من أجل  $E > 0.1 \text{ MeV}$  لمحطة مفاعل ماء مضغوط PWR ذات حلقتين لويستغهاوس ولمحطة ذات ثلاثة حلقات لويستغهاوس<sup>9</sup>. ولكلاهما تم استخدام الكثافة الخرسانية، والمكونات العنصرية، والمحتوى المائي التي تم أخذها من تقرير اللجنة التنظيمية النووية NUREG-6453 [21]. وقد بينت النتائج أن السيادة النيوترونية التي عند القطر الداخلي لخرسانة الدرع البيولوجي CBS تكون أقل بـ 0.9 مرة من تلك التي تكون عند القطر الخارجي لوعاء الضغط للمفاعل RPV OD. وعلى هذا الأساس، يوصي أنه عند إجراء أي تقدير يجب أن يتم استخدام حصة محافظ عليها (ثابتة) للسيادة النيوترونية عند القطر الداخلي قدرها 0.9 من السيادة النيوترونية عند RPV OD.

**B. التوهين عبر الخرسانة:** إن التوهين عبر الخرسانة هو من المقادير الهامة من أجل تقدير القدرة البنوية لجدار الدرع البيولوجي، نظراً لأن القدرة البنوية تحافظ على نفسها أكثر كلما كانت السيادة النيوترونية أصغر. يمكن حساب التوهين باستخدام كودات عبور النيوترونات وفوتونات غاما التي تحاكي التأثيرات المتبادلة لها مع مادة الخرسانة [4]. وقد تم حساب ذلك من أجل خرسانة عادية وخرسانة تتضمن تسليحاً بالفولاذ [3]. يبين الشكل (2) رسماً بيانياً لنتائج هذه الحسابات. علماً أن هذه الحسابات كانت قد أجريت من أجل محطة نموذجية ذات حلقتين وذات ثلاث حلقات. وقد كانت النتائج من أجل ذات الحلقتين هي الأكثر محافظة

<sup>9</sup> حلقات تبريد بالماء.

(ثباتاً). ولهذا، هي التي تم تقديمها في **الشكل (2)**. في هذا الشكل تم رسم نسبة التوهين  $\Phi_0/\Phi_x$  بتدرج خطي ( $x + \Delta x, x = 0,1,2,\dots$ ) بحيث يمكن تمييز التعبير في التدفق أو السيادة مع العمق بسهولة أكبر. لاحظ أن قيمة السيادة النيوترونية تتناقص حوالي رتبة واحدة (من 1.0 حتى 0.1) خلال الـ 5 إنشات (12.7 cm) الأولى. وأن نسبة التوهين ضمن الـ 5 إنشات الأولى هذه من الخرسانة تكون كبيرة. ويتناقص التدفق النيوتروني إلى النصف تقريباً ضمن الإنش ونصف الأولى (3.8 cm) من بداية الخرسانة.



**الشكل (2):** نسبة توهين السيادة النيوترونية ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) عبر خرسانة اسمنت بورتلاند بدلالة العمق في الخرسانة خلال أول 5 إنشات من بداية الخرسانة.

وبمطابقة المنحنى الناتج، **الشكل (2)**، مع خط اتجاه لمتعدد-حدود polynomial

trend line تم الحصول عبارة لنسبة التوهين attenuation ratio تعطى **بالمعادلة (3)** أدناه:

$$A_n = (-9.5577 \times 10^{-6})d^5 + (4.8793 \times 10^{-4})d^4 - (9.6891 \times 10^{-3})d^3 + (9.4840 \times 10^{-2})d^2 - 0.47235d + 1.016565 \quad (3)$$

حيث  $A_n$  هو نسبة التوهين للسيادة في خرسانة اسمنت بورتلاند، و  $d$  هو السماكة أو

العمق في جدار CBS من سطح عند القطر الداخلي ID للخرسانة بالإتش.

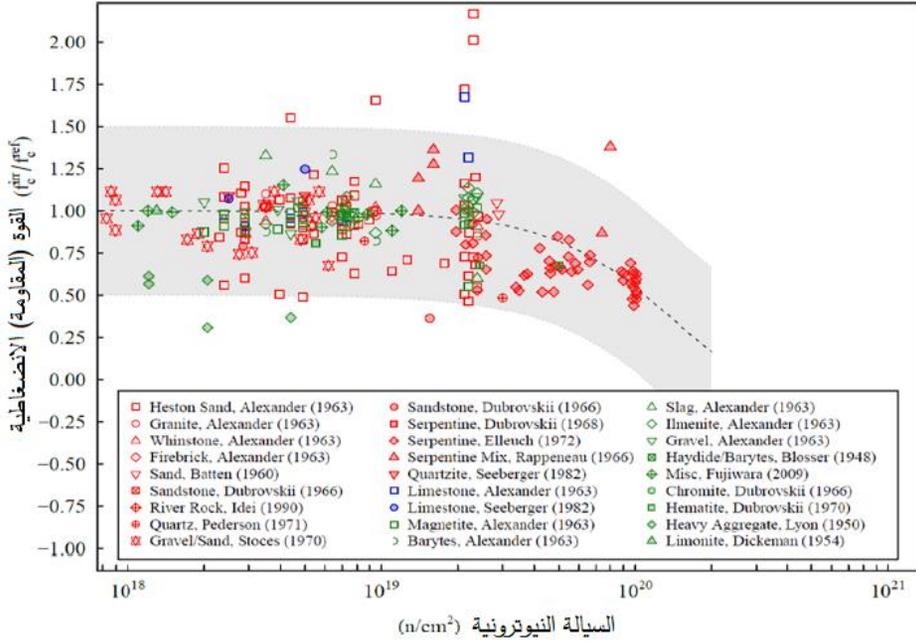
### 2.2.3. اختبارات تأثير السيادة النيوترونية

لسنوات عديدة، كان المرجع الذي يستخدمه معظم الباحثين لتحديد عتبة تعرض الخرسانة هو مقالة هيلسدورف وزملائه. حيث إن هيلسدورف وزملائه [22] نشروا في عام 1978 مقالة عن آثار أو تأثيرات الإشعاع النووي على الخواص الميكانيكية للخرسانة. كانوا قد قاموا فيها بتجميع وتنسيق وتلخيص كافة البيانات التجريبية المنشورة مسبقاً عن تأثيرات الإشعاع على خصائص الميكانيكية للخرسانة. إن ما يمكن ملاحظته في هذه البيانات أن اختبارات تأثير السيالة النيوترونية على الخرسانات كانت قد أجريت عند درجات الحرارة مختلفة جداً ومن أجل أيضاً طاقات نيوترونية مختلفة جداً. ورغم ذلك، توصل هيلسدورف وزملائه من خلال توحيد البيانات إلى أن تعرض الخرسانة إلى سيالة نيوترونية أكبر من  $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$  يمكن أن يؤدي إلى مفعول تناقص سريع في كل من مقاومة الخرسانة ومعامل المرونة [22]؛ أي بلوغ عتبة الضرر.

ومنذ عام 1978 حتى عام 2016 أنجزت أيضاً أعمال كثيرة عن تأثيرات الإشعاع النووي في الخرسانة الدرع البيولوجي التي تم نشرها في بحوث كثيرة منها [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15]. وفي عام 2017 تم تجميع قاعدة بيانات كبيرة عن الخصائص الميكانيكية للخرسانات المشعة بالنيوترونات من قبل فيلد وزملاؤه [16]. حيث أن فيلد وزملاؤه قدموا الشكل (3) الذي يبين رسماً بيانياً لمقاومة الانضغاط النسبية للخرسانة بدلالة السيالة النيوترونية. إن هذا الرسم يدل على أن مقاومة الانضغاط النسبية تبدي تناقصاً سريعاً عند سيالة قدرها  $1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ . وعلماً أن طاقة النيوترونات ودرجة حرارة الخرسانة، كما نوهنا، كانتا تختلفان بشكل كبير من اختبار لآخر. حتى أن بعض هذه البيانات كانت تتعلق باختبارات أجريت عند طاقات درجات حرارة مخالفة وأعلى من تلك التي في محطات الطاقة النووية.

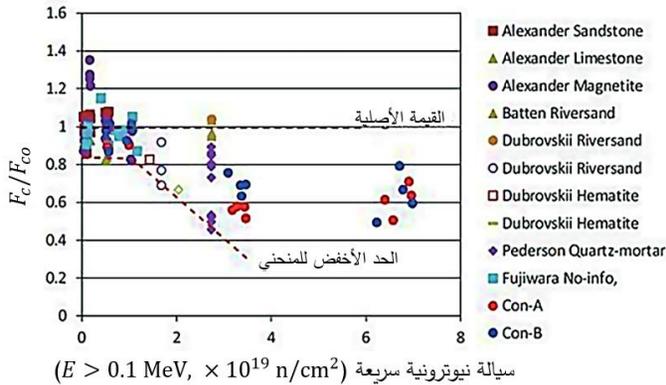
وفي عام 2017 قدم ماروياما وزملاؤه [23] بيانات منسقة من أجل طاقة للنيوترونات  $E > 0.1 \text{ MeV}$  وعند درجات حرارة اختبارية أقل من  $212^\circ\text{F}$  ( $100^\circ\text{C}$ ) إلى جانب نتائج اختباراتهم الجديدة. ولقد تمت دراسة الخرسانة في هذه الاختبارات كخرسانة نموذجية يمكن الاستفادة منها في تشغيل المفاعلات النووية التجارية. وقد تم تلخيص هذه البيانات في الشكل

(4). وهذا الشكل أيضاً يبين أن تناقصاً سريعاً لمقاومة الانضغاط النسبية يبدأ عند سيالة نيوترونية قدرها  $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ . وهذه النتيجة تتفق مع الآراء المطروحة من قبل المؤلفين في المؤلفات التقنية ومع ما قدمه هيلسدورف وزملائه.



الشكل (3): رسم بياني لمقاومة الانضغاط النسبية للخرسانة بدلالة السيالة

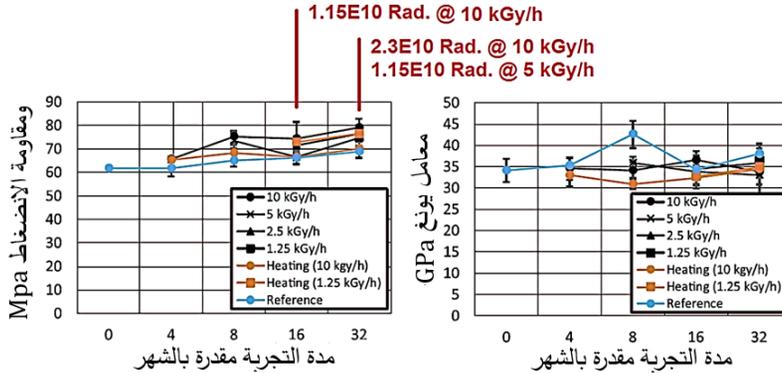
النيوترونية [16].



**الشكل (4):** رسم بياني لمقاومة الانضغاط النسبية للخرسانية ( $f_c/F_{co}$ ) بدلالة سيالة نيوترونية سريعة ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) [23]. حيث  $f_c$  هي مقاومة الانضغاط المختبرة بعد التشعيع؛  $F_{co}$  مقاومة الانضغاط الأصلية قبل التشعيع.

### 3.2.3. اختبار غاما

لقد قدم هيلسدروف وزملائه [22] في عام 1978 أيضاً التغير في مقاومة الانضغاط بدلالة جرعة غاما ، لكن من أجل كمية محدودة من البيانات المجمعة. وإن نزعة القيمة الوسطى المستقرأة من الرسم البياني لهذه البيانات تدل على أن هنالك التناقص في مقاومة الانضغاط يصبح ملحوظاً عند جرع غاما تبدأ من  $2.0 \times 10^{10} \text{ Rad}$  حتى  $3.0 \times 10^{10} \text{ Rad}$ . لكن على كل حال، إن البيانات في الرسم البياني كانت متباينة بشكل كبير ولا يمكن اعتبارها ممثلة لظروف التشغيل في المفاعلات التجارية. ولقد قدم ماروياما وزملاؤه [23] أيضاً دراسة مرجعية لبيانات اختبارات جرعات غاما السابقة وقد لاحظوا فيها أن تسخين العينات كان يؤثر على العديد من نتائج الاختبار. ولذلك، قاموا بتصميم اختبارات غاما للحد من التسخين ، كما قاموا بإجراء هذه الاختبارات، وتلخيص بياناتها [23]. يبين الشكل (5). البيانات الممثلة لمقاومة الانضغاط ومعامل المرونة. وقد تم التعليق أعلى هذا الشكل على أن الخطوط هي من أجل معدلات تعرض مختلفة لأشعة غاما. ويلاحظ منها، بصورة عامة، أن هنالك نزعة تزايد لمقاومة الانضغاط للعينات كلما طالت فترة تشعيها، خلافاً لما هو متوقع.



**الشكل (5):** تغير مقاومة الانضغاط ومعامل المرونة بدلالة الجرعة لأشعة غاما ومن أجل جرع مختلفة مشار إليها أعل الشكل [23].

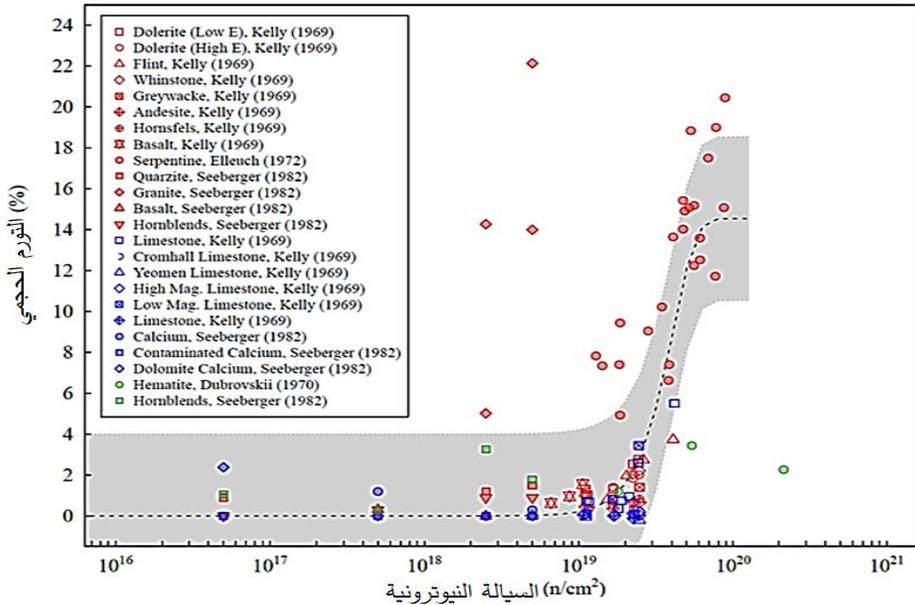
وقد اقترح ماروياما في مقاله أيضاً أنه يجب علينا إما أن نقوم برفع القيمة المرجعية للعتبة من أجل التعرض لأشعة غاما إلى سوية أعلى أو أنه يجب علينا التخلي عنها مطلقاً. وبالتالي، بالنظر في بيانات هيلسدورف السابقة وبيانات الاختبارات التي قدمها ماروياما، يبدو لنا أن التشبع بغاما حتى عتبة قدرها  $2.3 \times 10^{10}$  Rad ليس له تأثيراً ضاراً على الخصائص الميكانيكية للخرسانة.

### A. تغير خصائص الخرسانة

ونستخلص مما سبق أنه في ظروف محاكية لما يتعرض له الدرغ البيولوجي الخرساني، إن القدرة البنوية للدرغ البيولوجي الخرساني CBS تتأثر بشدة عندما تتجاوز قيمة السيالة النيوترونية ( $E > 0.1$  MeV) عتبة الضرر البالغة  $1.0 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>. وتتأثر الخرسانة متأثراً غير ذي شأن عندما تتجاوز جرعة غاما عتبة قدرها  $2.3 \times 10^{10}$  Rad. وعندما تتجاوز قيمة السيالة النيوترونية  $1.0 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>، تكون الانتفاخات الحجمية في الخرسانة الناتج الإشعاع (RIVE) مصحوباً ببدء تناقص سريع في خصائصها الميكانيكية. وعندما تتجاوز جرعة غاما العتبة  $2.3 \times 10^{10}$  Rad، يتوقع حدوث تناقص إضافي ما في مقاومة الانضغاط النسبية، ولكنه ضئيل. ولذلك، فإن التقديرات البنوية فيما يلي سوف تستند على سويات للسيالة النيوترونية فقط، والتي سوف نعتبر فيها أن العتبة  $1.0 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup> هي بمثابة قيمة وسطى لعتبات مختلفة، كما سيتوضح لاحقاً.

وبناء على ما سبق أيضاً، يجب أن ننبه إلى إن التغييرات الكبيرة في خصائص الميكانيكية لخرسانة تكون كبيرة جداً على عمق قدره عدة إنشات من القطر الداخلي للدرغ البيولوجي الخرساني CBS. وأن هذا العمق يتوقف على قيمة السيالة النيوترونية عند القطر الداخلي ID للدرغ البيولوجي الخرساني CBS. وأننا لا نفترض حدوث تغييرات مخيفة عندما تكون السيالة النيوترونية أخفض من عتبة الضرر.

لقد وصف المرجع [9] بشكل كامل حدوث الانتفاخات الحجمية في الخرسانة الناتجة الإشعاع RIVE والتغيرات في مقاومة الانضغاط ومقاومة الشد ومعامل المرونة. يبين الشكل (6) الانتفاخات الحجمية الناتجة عن الإشعاع RIVE، الذي يلاحظ فيه أن تزايداً سريعاً في الانتفاخات الحجمية يبدأ عند السيالة النيوترونية الموافقة لبدء الانخفاض السريع في مقاومة الانضغاط للدرع البيولوجي الخرساني المبين في الشكل (4). وهناك أيضاً تغيراً مشابهاً في كل من مقاومة الشد ومعامل المرونة تم ذكره في التقرير [9].



**الشكل (6):** الانتفاخات الحجمية بدلالة السيالة النيوترونية. علماً أن مجال طاقة النيوترونات ودرجة الحرارة يختلفان بشكل كبير من اختبار لآخر وليس كليهما ممثلين للظروف في المحطات النووية [9].

وقد تم تحويل الرسوم البيانية السابقة إلى علاقات رياضية تربط الخاصة الميكانيكية المختبرة بالسيالة النيوترونية من قبل لي بابي [7]. وسيتم فيما يلي ذكر العلاقة الخاص بكافة الخصائص الميكانيكية الهامة:

لقد جرى حساب الانتفاخات الحجمية العائدة إلى التوسع الحجمي الناتج عن الإشعاع RIVE، كتابع للسيالة المتراكمة من قبل لي بابي [7]. حيث قام لي بابي بفرز أو تصنيف مجمل البيانات وتحديد البيانات التي يمكن اعتبارها ممثلة لمجمل مكونات مفاعلات الماء الخفيف. فوجد أن علاقة الانتفاخات الحجمية هي:

$$\varepsilon_{sw}(\Phi) = \kappa \varepsilon_{\max} \frac{e^{\delta\Phi} - 1}{\varepsilon_{\max} + \kappa e^{\delta\Phi}} \quad (4)$$

حيث  $\varepsilon_{sw}(\Phi)$  هي الانتفاخات الحجمية كتابع للسيالة النيوترونية، و  $\Phi$  هي السيالة النيوترونية  $E > 0.1 \text{ MeV}$  بوحدة  $\text{n/cm}^2$ ، و  $\kappa$  هو بارامتر؛ تجانس الانفعال، ليس له أبعاد ويساوي 0.00968، و  $\varepsilon_{\max}$  هي الانتفاخات الحجمية الأعظمية وتساوي 0.00936، و  $\delta$  هو مقلوب السيالة ويساوي  $3.092 \times 10^{-20} \text{ cm}^2/\text{n}$

واستناداً إلى نفس البيانات وجد لي بابي [7] أن علاقة مقاومة الانضغاط للخرسانة كتابع للسيالة النيوترونية هي:

$$f_c(\Phi) = f_{co} e^{-(\Phi \times 7.253 \times 10^{-21})^{1.582}} \quad (5)$$

حيث  $f_{co}$  هي مقاومة الانضغاط للخرسانة المصممة بعد 28 يوماً بدون تشيع، مقدرة بوحدة الباوند على الإنش المربع psi، و  $\Phi$  هي السيالة النيوترونية ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ ) مقدرة بـ  $\text{n/cm}^2$ .

واستناداً إلى نفس البيانات وجد لي بابي [7] أن علاقة لمقاومة الشد للخرسانة كتابع للسيالة النيوترونية هي:

$$f_t(\Phi) = f_{to} e^{-(\Phi \times 8.649 \times 10^{-21})^{0.436}} \quad (6)$$

حيث  $f_{to}$  هي مقاومة الشد للخرسانة قبل التشيع، محسوبة وفقاً لمتطلبات معهد الخرسانة الأمريكية (ACI)، ومقدرة بـ psi.

واستناداً إلى نفس البيانات وجد لي بابي [7] أن علاقة عامل المرونة للخرسانة كتابع للسيالة النيوترونية هي:

$$E(\Phi) = E_o e^{-(\Phi \times 4.073 \times 10^{-22})^{0.4025}} \quad (7)$$

حيث  $E_0$  هو معامل المرونة للخرسانة قبل التشيع، محسوباً وفقاً لمتطلبات معهد الخرسانة الأمريكية (ACI) ، ومقدراً ب  $\psi$ .

ونحن نرى أن العلاقات الرياضية السابقة الممثلة لكافة الدراسات الهامة بالنسبة السلامة المفاعل، التي تقدم لنا توصيفاً إجمالياً للخصائص الميكانيكية لمجمل خرسانات الدروع البيولوجية المستخدمة في محطات الاستطاعة النووية الحالية، لا يمكن الاطمئنان إليها من أجل التنبؤ بالعمر التشغيلي الآمن لمحطة استطاعة نووية معينة مختارة، لأنها في الحقيقة أولاً تقدم قيماً وسطى للخصائص الميكانيكية لمجمل خرسانات الدروع البيولوجية المستخدمة في محطات الاستطاعة النووية. وثانياً لأنه ربما تكون خرسانة الدرع البيولوجي للمحطة المعنية المختارة ذات مقاومة ابتدائية (قبل التشيع) أصغر من تلك التي توافق القيمة الوسطى لمجمل الخرسانات المستخدمة. وعندئذ، إذا ما توقعنا العمر التشغيلي لهذه المحطة، اعتماداً على الدراسات السابقة والعلاقات الممثلة، وقررنا عدم إيقاف هذه المحطة حتى ينتهي العمر التشغيلي المتوقع، فإننا سنكون، لا سمح الله، قد سمحنا بحدوث كارثة نووية، لأن مثل هذه الخرسانة سيكون لها، كما سيتبين لاحقاً، عتبة ضرر أصغر من العتبة المستنتجة من الدراسات السابقة والتي يمكن التنبؤ بها من العلاقات أعلاه، والتي هي  $1.0 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$ .

لكن على كل حال، يمكننا من إعادة استقراء البيانات المذكورة للتوصل إلى عمر تشغيلي مطمئن نضمن خلاله عدم حدوث كارثة نووية. كما يمكن وضع طريقة لتحديد العمر التشغيلي الافتراضي الآمن للخرسانة التي سيتم منها إنشاء الدرع البيولوجي لاحقاً. وكما يمكن أيضاً من خلالها فهم الدراسة المرجعية اقتراح التعديلات في الخرسانة وفي بنية المفاعلات من أجل إطالة عمر أي محطة استطاعة نووية.

#### 4. تقدير العمر التشغيلي للمحطات النووية

لقد كانت كافة الاستقراءات والمعالجات التي أجراها هيلسدورف وزملائه [22] وفيلد وزملائه [16] وماروياما وزملائه [23] على البيانات المجمعة المتوفرة عن الخصائص الميكانيكية للخرسانات المشعة بالنيوترونات قد تمت بطرق متشابهة تقريباً وقد أعطت نتائج

متقاربة جداً لمقاومة الخرسانة، وذلك لأنه في جميعها قد تم إيجاد السلوك أو التابع الوسطى لتأثير النيوترونات على مقاومة خرسانة الدرع البيولوجي.

ونحن سنقوم بقبول السلوك الوسطى لكافة الخرسانات على أنه سلوكاً عاماً لأي خرسانة تدرس بشكل منفصل ومستقل لكن في ظروف خرسانة الدرع البيولوجي لمحطة معينة بذاتها. ونحن نرى بأن هذه الاستقرارات والمعالجات رغم أنها جيدة ومفيدة، إلا أنها تُفقد البيانات الكثير من المعلومات التي تتضمنها، والتي يمكن أن تكون مفيدة في تحديد عمر كل منشأة على حدة. فبما أن البيانات المتوفرة قد تم الحصول عليها من خرسانات مختلفة ومتنوعة بشكل كبير من حيث البنية، فإنه من المفترض أن يكون لكل خرسانة مستقلة منها خصائص ميكانيكية خاصة بها. وبالتالي، فإن التغيرات في مقاومة كل منها مع الزمن، وبالتالي، مع السيادة النيوترونية يجب أن تكون مختلفة.

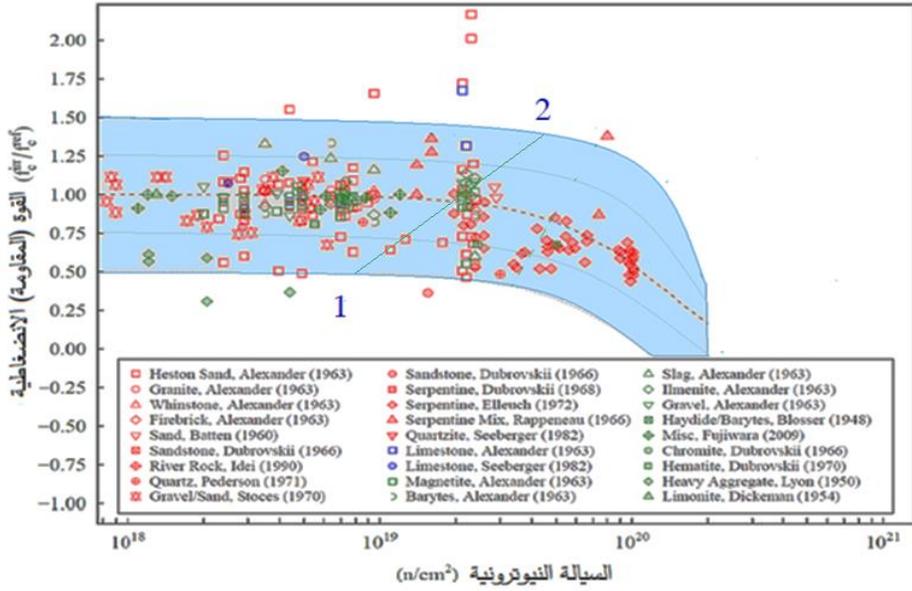
وبما أن حديد التسليح والاسمنت يتم إنتاجها عالمياً وفق مواصفات ومعايير تقريباً متماثلة وخاصة في الدول المتقدمة، فإن التغير في مقاومة حديد التسليح والاسمنت نتيجة تأثير النيوترونات سيكون متماثلاً تقريباً في خرسانة يستخدمان فيها.

وبما أن الركام يشكل حوالي 70% من مكونات الخرسانة، فإن التغير في مقاومة الخرسانة إنما يحصل بشكل رئيسي في الركام. وبما أن كل نوع من الركام إنما يؤخذ عادة من صخور البلد الذي يتم فيه بناء المحطة. وهذه الصخور تكون عادةً مكونة من مواد معدنية بلورية مختلفة. وبالتالي، فإن هذه الصخور ستمتلك شبكات بلورية مختلفة (مكعبية، مشورية، ...). وبالتالي، سيكون لها طاقات ارتباط للذرات في شبكاتها البلورية مختلفة. وبكلام آخر، إن طاقات ارتباط الذرات تكون مختلفة من ركام لآخر. بالتالي، فإن التغيرات في مقاومات الخرسانات نتيجة تأثير النيوترونات على رُكُمها المختلفة ستكون مختلفة من خرسانة لأخرى. ولذلك، قمنا باستقراء البيانات المتوفرة بطريقة مختلفة.

#### 1.4. تقدير العمر التشغيلي للمحطات النووية من أجل مقاومة الانضغاط النسبية للخرسانة:

في هذا البحث، سنقدم فقط نموذجاً واحد عن طريقة استقراءاتنا والمعالجة للبيانات المتوفرة عن تغير المقاومة الانضغاطية النسبية ومقاومة الشد النسبية ومعامل المرونة النسبي مع السيالة النيوترونية. إن استقراء تغير المقاومة الانضغاطية النسبية مع تزايد السيالة ميبين في المنطقة الملونة في الشكل (7).

في استقراء البيانات المتوفرة المشار إليه بالمنطقة الملونة في الشكل (7) حاولنا أن نعطي أولاً للبيانات المستوحاة تغيراً تناقصياً، لأنه كلما زادت السيالة النيوترونية تزايدت الانتفاخات الحجمية، وبالتالي تناقصت المقاومة الانضغاطية النسبية. وثانياً اعتبرنا أن الخطين الطرفين الحدوديين للمنطقة الملونة يمثلان خرسانتين مختلفتين. ولذلك أعطينا لهما بدايتي تناقص سريع مختلفتين، حيث إنه، وفقاً لتصوراتنا، إن الخطين الحدوديين ينتجان عن خرسانتين مختلفتين تمتلكان خصائصاً ميكانيكية مختلفة. ولذلك، فإن بداية التناقص السريع لهما تكون عند نقطتين مختلفتين أشرنا لهما على الشكل (7) ب 1 و 2. وهاتان النقطتان توافقان سيالتان مختلفتان. وفضلاً على ذلك، إننا نفترض بأن كل خرسانة المدروسة كان سيكون لها سلوكاً مماثلاً للسلوك الوسطي لتغير المقاومة الانضغاط النسبية مع تغير السيالة النيوترونية، المبين في الشكل (7)، فيما لو عينت مقاومة الخرسانة عند ظروف ثابتة محددة مماثلة لظروف خرسانة الدرع البيولوجي الذي يبني منها.



**الشكل (7):** استقراء تغير المقاومة الانضغاط النسبية مع تزايد السيادة النيوترونية.

وفقاً لهذه المنهجية قمنا باستقراء تقريبي لخمس مجموعات من البيانات التي نفترض أنها تعود، في الواقع، لخمس خرسانات مختلفة. يبين **الجدول (1)** خمس مجموعات من البيانات المستقراء من **الشكل (7)** التي نفترض أنها تعود لخمس خرسانات مختلفة افتراضية. وبالتالي، تعود لخمس محطات نووية مختلفة افتراضية.

**الجدول (1):** خمس مجموعات من البيانات تعطي تغير مقاومة الانضغاط النسبية

المستقره التي تعود لخمس خرسانات مفترضة مختلفة منفصلة موجودة في الواقع، في خمس محطات نووية منفصلة.

$\frac{f_{c5}}{F_{co5}}$	$\frac{f_{c4}}{F_{co4}}$	$\frac{f_{c3}}{F_{co3}}$	$\frac{f_{c2}}{F_{co2}}$	$\frac{f_{c1}}{F_{co1}}$	$\Phi$ (n/cm <sup>2</sup> )
1.5	1.25	1	0.75	0.5	1E+18
1.48	1.24	0.98	0.72	0.46	1E+19
1.47	1.22	0.97	0.7	0.44	5E+19
1.46	1.21	0.96	0.69	0.43	6E+19
1.45	1.2	0.95	0.67	0.4	6.5E+19
1.44	1.19	0.94	0.65	0.35	7E+19
1.43	1.18	0.92	0.63	0.3	7.5E+19
1.42	1.17	0.9	0.61	0.25	8E+19
1.41	1.15	0.88	0.59		8.5E+19
1.4	1.14	0.86	0.57		9E+19
1.39	1.13	0.84	0.55		9.5E+19
1.38	1.11	0.82	0.51		1E+20
1.33	1.03	0.75			1.20E+20
1.23	0.89				1.50E+20
1.1	1.25				2E+20

ونظراً لأن بيانات أي عمود مقاومة انضغاطية نسبية في **الجدول (1)** تمثل خرسانة معينة، فإنه لو تم أخذ هذه القياسات لكل خرسانة على انفراد لكان من المفترض أن تبدأ كلها من الواحد، مثلها مثل المقاومة الانضغاطية النسبية الوسطى. ولذلك، يجب أن نقوم بعمل انزياح للقيم بمقدار ثابت بحيث تصبح أول قيمة في كل عمود مقاومة انضغاطية نسبية مساوية للواحد،

فمثلا يجب إنقاص قيم العمود الأخير بمقدار نصف (-0.5)، ويجب إضافة نصف إلى قيم العمود الأول (+0.5). وهكذا بناء عليه، فإننا نحصل على **الجدول (2)**.

**الجدول (2):** مجموعات بيانات تغير مقاومة الانضغاط النسبية المستقرآه العائدة لخمس خرسانات مفترضة مختلفة منفصلة بعد أن تمت إزاحتها لتصبح وكأنها مأخوذة لخمس خرسانات مستقلة بذاتها.

$\frac{f_{c5}}{F_{co5}}$	$\frac{f_{c4}}{F_{co4}}$	$\frac{f_{c3}}{F_{co3}}$	$\frac{f_{c2}}{F_{co2}}$	$\frac{f_{c1}}{F_{co1}}$	$\Phi$ (n/cm <sup>2</sup> )
0.995	0.99	0.987	0.985	0.98	1E+18
0.98	0.98	0.98	0.97	0.96	1E+19
0.97	0.97	0.97	0.95	0.94	5E+19
0.96	0.96	0.96	0.94	0.93	6E+19
0.95	0.95	0.95	0.92	0.9	6.5E+19
0.94	0.94	0.94	0.9	0.85	7E+19
0.93	0.93	0.92	0.88	0.8	7.5E+19
0.92	0.92	0.9	0.86	0.75	8E+19
0.91	0.9	0.88	0.84		8.5E+19
0.9	0.89	0.86	0.82		9E+19
0.89	0.88	0.84	0.8		9.5E+19
0.88	0.86	0.82	0.76		1E+20
0.84	0.78	0.75			1.20E+20
0.75	0.64				1.50E+20
0.6	0.35				2E+20

لنقم برسم تابعة المقاومة الانضغاطية النسبية كتابع للسليالة النيوترونية في الجدول (2) من أجل الخرسانات الخمس المفترضة 1 و 2 و 3 و 4 و 5 أولاً بواسطة برنامج ماثكاد من أجل مطابقتها (مقايستها) مع تابع مقترح توحى به النقاط البيانية.

إن الشكل العام لمعادلة المنحنى المقترح لمقايصة بيانات المقاومة الانضغاطية النسبية

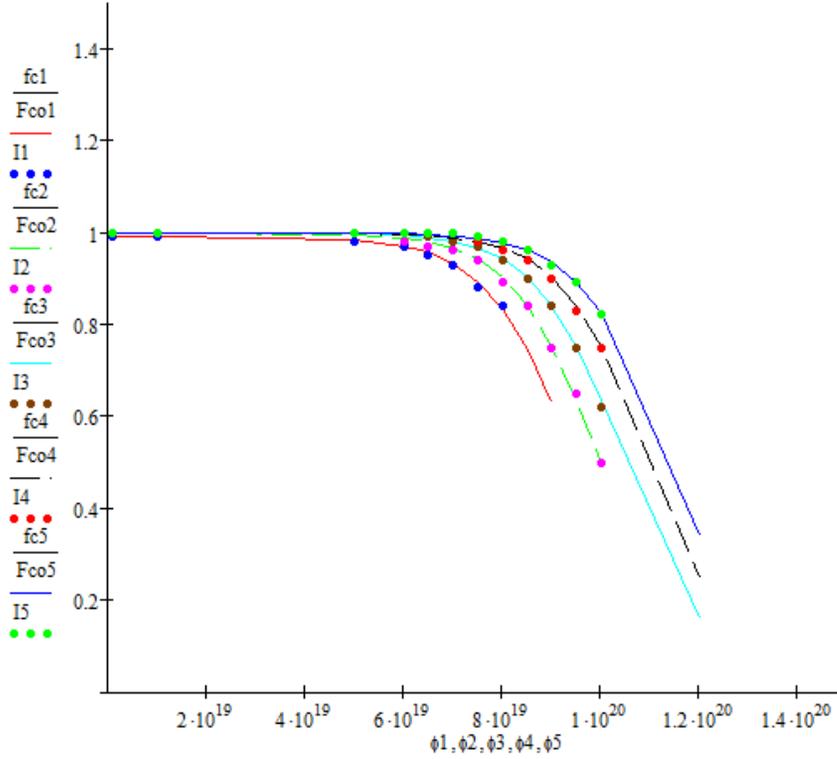
هو من الشكل:

$$\frac{f_{ci}(\Phi)}{F_{coi}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi-A}{B}}} \quad (8)$$

حيث إن  $f_{ci}$  في المعادلة (8) تمثل مقاومة الانضغاطية للخرسانة في أثناء التشيع بالسليالة النيوترونية، و  $t$  تمثل رقم الخرسانة و  $F_{coi}$  تمثل مقاومة الانضغاط قبل التشيع، ، إن A, B هما بارامتران يمكن تعيينهم من خلال النقاط البيانية.

بإجراء مقايصة (مطابقة) بواسطة المربعات الأصغرية للنقاط البيانية للمقاومة

الانضغاطية مع المعادلة (8) بواسطة الماثكاد، نحصل على الشكل (8).



**الشكل (8):** مقارنة النقاط البيانية للمقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 كتابية للسائلة النيوترونية بواسطة الماتكاد.

إن توابع المقايمة للنقاط البيانية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 هي:

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = \frac{0.99}{1 + e^{\frac{\Phi_1 - 9.5 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (9)$$

$$\frac{f_{c2}(\Phi)}{F_{co2}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_2 - 10 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (10)$$

$$\frac{f_{c3}(\Phi)}{F_{co3}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_3 - 10.5 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (11)$$

$$\frac{f_{c4}(\Phi)}{F_{co4}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_4 - 11 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (12)$$

$$\frac{f_{c5}(\Phi)}{F_{co5}} = \frac{1}{1 + e^{\frac{\Phi_5 - 11.4 \times 10^{19}}{9 \times 10^{18}}}} \quad (13)$$

يبين الجدول (3) قيمتي البارامترين  $A, B$  من أجل الخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

الجدول (3): قيمتي البارامترين  $A, B$  من أجل الخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

	خرسانة 1	خرسانة 2	خرسانة 3	خرسانة 4	خرسانة 5
A	$9.5 \times 10^{19}$	$10 \times 10^{19}$	$10.5 \times 10^{19}$	$11 \times 10^{19}$	$11.4 \times 10^{19}$
B	$9 \times 10^{18}$	$9 \times 10^{18}$	$9 \times 10^{18}$	$9 \times 10^{18}$	$9 \times 10^{18}$

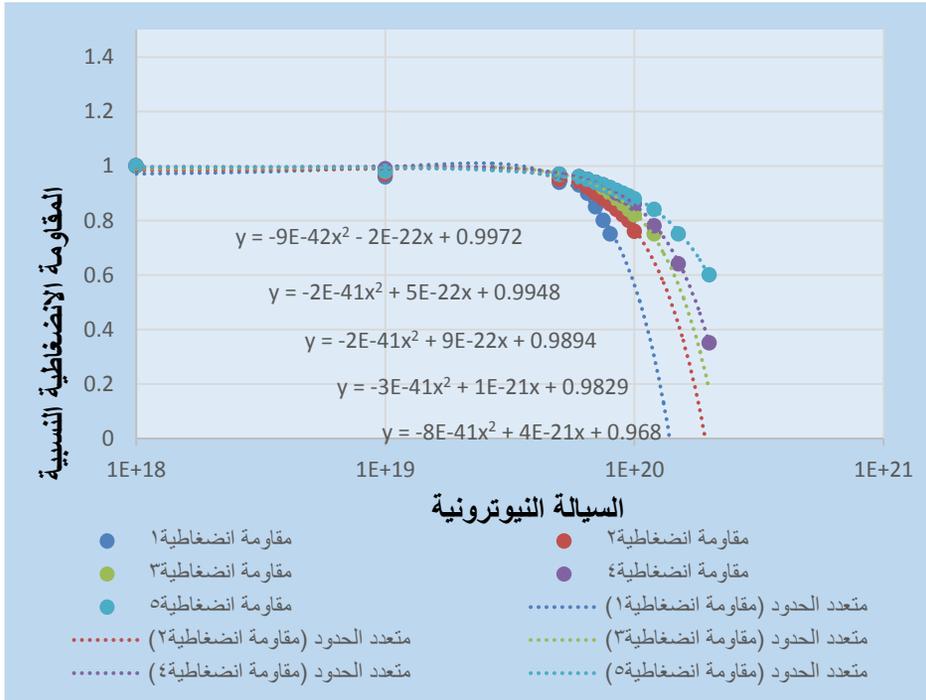
كما قمنا بمقايسة النقاط البيانية أيضاً مع تابع متعدد حدود من الدرجة الثانية له الشكل:

$$\frac{f_{ci}(\Phi)}{F_{coi}} \cong a\Phi^2 + b\Phi + c \quad (14)$$

باستخدام برنامج اكسل من خلال إيجاد معادلة خط الاتجاه (منحني المقايسة).

يبين الشكل (9) مقايسة النقاط البيانية للمقاومة الانضغاطية النسبية كتابع للسيالة

بواسطة الاكسل. مع توابع المقايسة (المطابقة).



**الشكل (9):** مقايسة النقاط البيانية للمقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 معاً كتابع للسيلة وبواسطة الاكسل.

إن توابع المقايسة النقاط البيانية للخرسانات 1 و 2 و 3 و 4 و 5 من خلال الاكسل هي:

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = -8 \times 10^{-41}\Phi^2 + 4 \times 10^{-21}\Phi + 0.968 \quad (15)$$

$$\frac{f_{c2}(\Phi)}{F_{co2}} = -3 \times 10^{-41}\Phi^2 + 1 \times 10^{-21}\Phi + 0.9829 \quad (16)$$

$$\frac{f_{c3}(\Phi)}{F_{co3}} = -2 \times 10^{-41}\Phi^2 + 9 \times 10^{-22}\Phi + 0.9894 \quad (17)$$

$$\frac{f_{c4}(\Phi)}{F_{co4}} = -2 \times 10^{-41}\Phi^2 + 5 \times 10^{-22}\Phi + 0.9948 \quad (18)$$

$$\frac{f_{c5}(\Phi)}{F_{co5}} = -9 \times 10^{-42}\Phi^2 - 2 \times 10^{-22}\Phi + 0.9972 \quad (19)$$

يبين **الجدول (4)** قيم البارامترات  $a, b, c$  من أجل خمس خرسانات؛ 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

**الجدول (4):** قيم البارامترات  $a, b, c$  من أجل خمس خرسانات؛ 1 و 2 و 3 و 4 و 5.

	خرسانة 1	خرسانة 2	خرسانة 3	خرسانة 4	خرسانة 5
$a$	$-8 \times 10^{-41}$	$-3 \times 10^{-41}$	$-2 \times 10^{-41}$	$-2 \times 10^{-41}$	$-9 \times 10^{-42}$
$b$	$4 \times 10^{-21}$	$1 \times 10^{-21}$	$9 \times 10^{-22}$	$5 \times 10^{-22}$	$-2 \times 10^{-22}$
$c$	0.968	0.9829	0.9894	0.9948	0.9972

**تعين العمر التشغيلي الآمن للمفاعل:** نعين نحن العمر التشغيلي الآمن لمحطة بناء على تعريفنا له كما يلي. انطلاقاً من تعريفنا لعتبة فقدان المقاومة للخرسانة، يكون:

$$\frac{f_{ci}(\Phi)}{F_{coi}} = 0.9 \cong a\Phi^2 + b\Phi + c \quad (20)$$

حيث إن البارامترات  $a$  و  $b$  و  $c$  في المعادلة يتم إيجادها، كما ذكرنا أعلاه،

إن العمر التشغيلي الافتراضي للمحطة يكون:

$$t = \frac{\Phi \times 1 \text{ years}}{\Phi_1} \quad (21)$$

حيث  $\Phi_1(1 \text{ years}) = 8.31 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2$  هي السيادة النيوترونية عند القطر الداخلي لخرسانة الدرع البيولوجي CBS خلال عام واحد من تشغيل المحطة النووية. وهو مقدار يختلف من محطة لأخرى.

**تطبيق (1):** إيجاد العمر التشغيلي الآمن بالنسبة للخرسانة ( $i = 1$ ) فيما يتعلق بالمقاومة الانضغاطية النسبية.

من خلال العلاقة (15) التي تمثل تغيرات مقاومة الانضغاط النسبية بتغير السيادة النيوترونية بالنسبة للخرسانة ( $i = 1$ ):

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = -8 \times 10^{-41} \Phi^2 + 4 \times 10^{-21} \Phi + 0.968 \quad (15)$$

$$\frac{f_{c1}(\Phi)}{F_{co1}} = 0.9 \Rightarrow 0.9 = -8 \times 10^{-41} \Phi^2 + 4 \times 10^{-21} \Phi + 0.968$$

$$-8 \times 10^{-41} \Phi^2 + 4 \times 10^{-21} \Phi + 0.068 = 0$$

بحل هذه المعادلة نجد:

$$\Phi = 6.3405 \times 10^{19}, \quad \Phi' = -1.3405 \times 10^{19} \text{ (مرفوض)}$$

وعندئذ، فإن العمر التشغيلي الافتراضي للمحطة يكون:

$$t = \frac{\Phi \times 1 \text{ years}}{\Phi_1} = \frac{\Phi}{\Phi_1} = \frac{6.3405 \times 10^{19}}{8.31 \times 10^{17}} = 76.29 \text{ years}$$

يبين **الجدول (5)** العمر التشغيلي الافتراضي لخمس خرسانات تم استقراؤها من البيانات التجريبية المتوفرة التي يمكن أن نعزيها لخمس محطات نووية افتراضية ذات مفاعل ماء مضغوط.

**الجدول (5):** السيادة الموافقة لعتبة فقدان المقاومة الانضغاطية النسبية والعمر التشغيلي الافتراضي لخمس محطات مفاعل ماء مضغوط.

	$\Phi_2$	$\Phi_3$	$\Phi_4$	$\Phi_5$	$\Phi_6$
$\Phi_i(n/cm^2)$	$6.34 \times 10^{19}$	$6.97 \times 10^{19}$	$7.49 \times 10^{19}$	$8.12 \times 10^{19}$	$9.09 \times 10^{19}$
$t(\text{years})$	76.29	83.88	90.23	97.71	109.38

هكذا يكون بذلك قد قمنا باستقراءاتنا للبيانات المتوفرة هو تغير المقاومة الانضغاطية النسبية مع السيادة النيوترونية فيما يتعلق بالمقاومة الانضغاطية النسبية وتوصلنا الى تحديد العمر التشغيلي الآمن للمحطة النووية وذلك من أجل خمس خرسانات مختلفة كما تم ذكرها سابقاً.

### 5. توصيات من أجل إطالة عمر محطة:

إن إطالة عمر أي محطة النووية قيد التشغيل هو إحدى أهداف هذا البحث. لقد تبين لنا من خلال الدراسة المرجعية ومن معالجة النتائج التجريبية أنه نطيل عمر محطة يجب علينا إجراء بعض التعديلات على التصميم الحالي للمفاعل. وهذه التعديلات كلها تركز على تقليل السيادة النيوترونية الساقطة على خرسانة الدرع البيولوجي. لأنه، كما ذكرنا أعلاه، كلما كانت السيادة النيوترونية الساقطة خلال وحدة الزمن على خرسانة الدرع البيولوجي أصغر، كلما كان عمر الخرسانة أكبر. وبالتالي، كان عمر المحطة أكبر.

لذلك، من أجل تقليل السيادة النيوترونية يمكننا أن نقدم بعض من التوصيات:

**أولاً** تغليف وعاء الضغط للمفاعل بغلاف قابل للتبديل من مادة أو مواد خليط يكون احتمال التفاعل من أجلها قليل وعدد التشعيرات صغير، مثل:  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{39}\text{K}$ .

**ثانياً** باستبدال تيار الهواء في الفجوة الهوائية بتيار من غاز أو مزيج غازي ذي مقطع عرضي كبير لامتصاص أو أسر النيوترونات، ويفضل أن يكون خاملاً كيميائياً وإشعاعياً مثل الهليوم مع زيادة كثافة هذا الغاز بالقدر المتاح.

**ثالثاً** تركيب بطانة معدنية قابلة للتبديل على الجهة الداخلية للخرسانة من معدن عاكس للنيوترونات بسماكة مناسبة مثل:  $^{27}\text{Al}$ ,  $^{56}\text{Fe}$ .

## 6 . المناقشة

تقسم التفاعلات النيوترونية-النوية إلى: تفاعلات تشتت مرن ولا مرن، وتفاعلات امتصاص أو أسر، وتفاعلات الانشطار في العناصر الثقيلة. إن أحد أنواع تفاعلات التشتت الأكثر تأثيراً نسميها تفاعلات إزاحة الذرات عن مواقعها في الشبكة البلورية للجسم الصلب، حيث يعطي فيها النيوترون جزءاً من طاقته إلى النواة المتشنتة. فإذا كانت طاقة الارتداد للنواة المتشنتة أكبر من طاقة ارتباط ذرتها في الشبكة البلورية، فإن الذرة ككل تُقتلع من موضعها بطاقة حركية ما، وعادة ما تكون هذه الطاقة كبيرة بما يكفي أن تقتلع في طريقها عدداً كبيراً من ذرات الشبكة البلورية، مشكلة بذلك ذرات خلالية، ومنطقة خالية أو شاغرة من الذرات، وهذا ما يعرف بعيب فرنكل.

إن عدد هذه العيوب يزداد مع زيادة التعرض للسيلة النيوترونية، مما يؤدي إلى تشكل مجموعات من عيوب فرنكل، التي تسمى عيوباً عنقودية. وفي نهاية المطاف، يؤدي ذلك إلى تناقص مقاومة الخرسانة. فكلما ازداد عدد عيوب فرنكل كلما تناقصت قيمة المقاومة. وعند عدد عيوب معين تنخفض قيمة المقاومة الانضغاطية بمقدار 0.1 من قيمتها قبل التشجيع. وعندئذ، نعتبر أن الخرسانة قد وصلت إلى عتبة الضرر (خطر الانهيار). وبالتالي، يجب إيقاف المفاعل عن العمل وإنهاء عمل المحطة. إن التقليل من هذا النوع من التفاعلات يمكن يُطيل من عمر خرسانة الدرع البيولوجي. وبالتالي، من عمر المحطة. إن أحد الآليات التي تقلل من تأثير هذه التفاعلات هي إعادة الاتحاد لأزواج فرنكل.

## 7 . الاستنتاجات:

1. إن تغيرات المقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانة توصف بالمعادلة (8).
2. يمكن أن يتم وصف تغيرات المقاومة الانضغاطية النسبية للخرسانة بتابع متعدد الحدود من الدرجة الثانية يعطى بالمعادلة (14).
3. يمكن أن يتم حساب العمر التشغيلي الآمن للمفاعل النووي وفقاً للمعادلة (21).
4. إن تفاعل التشتت غير المرن للنيوترون هو التفاعل الذي يتسبب بأكبر ضرر في الخرسانة نتيجة تشكيل عيوب فرنكل فيها.

5. إن مجال الأعمار الآمن للمفاعلات النووية الحالية المعين اعتماداً على تغير المقاومة الانضغاطية النسبية يتراوح تقريباً بين 76.29 سنة حتى 109.38 سنة.

## المراجع

- [1] Bruck, P. M., et al. "Structural assessment of radiation damage in light water power reactor concrete biological shield walls." *Nuclear Engineering and Design* 350 (2019): 9-20.
- [2] Askeland, Donald R.; Phulé, Pradeep P. (2006). *The science and engineering of materials* (5th ed.). Cengage Learning. p. 198. ISBN 978-0-534-55396-8.
- [3] Electric Power Research Institute, *Study of Radiation Damage to Structural Components in Nuclear Reactors*, EPRI Report NP-152, January 1976.
- [4] Remec, I., *Study of Neutron Flux and Dpa Attenuation in the Reactor Pressure Vessel Wall*, ORNL/NRC/LTR-99/5, June 1999.
- [5] Remec, I., 2013. *Radiation Environment in Biological Shields of Nuclear Power Plants*. Oak Ridge National Laboratory (ORNL).
- [6] Le Pape, Y., Giorla, A., Sanahuja, J., 2016. Combined Effects of Temperature and Irradiation on Concrete Damage. *J. Adv. Concr. Technol.* 14, 70–86.
- [7] Rosseel, T., Maruyama, I., Le Pape, Y., Kontani, O., Giorla, A., Remec, I., 2016. Review of the Current State of Knowledge on the Effects of Radiation on Concrete. *J. Adv. Concr. Technol.* 14, 366–383.
- [8] Le Pape, Y., 2015. Structural Effects of Radiation-Induced Volumetric Expansion on Unreinforced Concrete Biological Shields. *Nucl. Eng. Des.* 534–548.
- [9] Field, K.G., Le Pape, Y., Remec, I., February 2015. Perspective on Radiation Effects in Concrete for Nuclear Power Plants – Part I: Qualification of Radiation Exposure and Radiation Effects. *Nucl. Eng. Des.* 282, 126–143.
- [10] Electric Power Research Institute, *Effects of Radiation on Concrete – a Literature Survey and Path Forward*, EPRI Report 1025584, 2012.
- [11] Electric Power Research Institute, *Expected Condition of Reactor Cavity Concrete after 80nYears of Radiation Exposure*, EPRI Report 3002002676, 2014.

- [12] Electric Power Research Institute, Long-Term Operations: Impact of Radiation Heating on PWR Biological Shield Concrete, EPRI Report 3002008129, 2016a.
- [13] Electric Power Research Institute, Structural Model of PWR Concrete Reactor Pressure Vessel Supports – Effects of Chronic Radiation Exposure on Margin, EPRI Report 3002007347, Rev. 1, 2016b.
- [14] Electric Power Research Institute, Structure Disposition of Neutron Radiation Exposure in BWR Vessel Support Pedestals, EPRI Report 3002008128, 2016c.
- [15] Electric Power Research Institute, Irradiation Damage of the Concrete Biological Shield: Basis for Evaluation of Concrete Biological Shield Wall for Aging Management, EPRI Report 3002011710, Rev. 0, 2018.
- [16] Remec, I., Rosseel, T., Field, K., Le Pape, Y., 2017. Characterization of Radiation Fields for Assessing Concrete Degradation in Biological Shields of NPPs. EPJ Web of Conferences 153, 05009.
- [17] Kontani, O., Ichikawa, Y., Ishizawa, A., Takizawa, M., Sato, O., 2010. Irradiation Effects on Concrete Structures. In: International Symposium on the Aging Management and Maintenance of Nuclear Power Plants, pp. 173-182.
- [18] Maruyama, I., Haba, K., Sato, O., Ishikawa, S., Kontani, O., Takizawa, M., 2016. A Numerical Model for Concrete Strength Change under Neutron and Gamma-Ray Irradiation. J. Adv. Concr. Technol. 14, 144–162.
- [19] US NRC Regulatory Guide 1.99, Rev. 2, Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials, May 1988.
- [20] Randall, P., 1986. Basis for Revision 2 of the US Nuclear Regulatory Commission’s Regulatory Guide 1.99. Radiation Embrittlement of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steels An International Review (second Volume), ASTM, STP 909, 149–162.
- [21] Remec, I., Kam, F.B.K., H.B. Robinson-2 Pressure Vessel Benchmark, NUREG/CR-6453, October, 1997.

- [22] Hilsdorf, H.K., Kropp, J., Koch, H.J., 1978. The Effects of Nuclear Radiation on the Mechanical Properties of Concrete. American Concrete Institute, Special Publications SP 55-10, 223-254.
- [23] Maruyama, I., Kontani, O., Takizawa, M., Sawada, S., Ishikawa, S., Yasukouchi, J., Sato, O., Etoh, J., Igari, T., 2017. Development of Soundness Assessment Procedure for Concrete Members affected by Neutron and Gamma-Ray Irradiation. J. Adv. Concr. Technol. 15, 440-523.



# نظرية ميلنيكوف وتطبيقها على معادلة دفينغ

## ذات القساوة السالبة

طالبة الماجستير: بنان كاخيا كلية العلوم - جامعة البعث

الدكتور المشرف: د. محمد العلي

### ملخص البحث

يهدف هذا البحث إلقاء الضوء على نظرية ميلنيكوف وتطبيقها على معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة.

نعتبر في بداية البحث منظومة ديناميكية ذات درجة حرية واحدة مع اضطراب دوري، بحيث تملك المنظومة الأساسية للمنظومة المضطربة نقطة ثابتة زائدية متصلة مع نفسها بمسار هوموكليني.

بعد ذلك نقوم بتعريف المنظومة المعلقة المتعلقة بها والتي تملك فضاء طوري ثلاثي البعد، وتعريف تطبيق بوانكاريه المتعلق بها والذي يملك نقطة ثابتة متوافقة لمسار دوري للمنظومة المعلقة .

بعدها نقوم بحساب المسافة بين المتنوعتين المستقرّة وغير المستقرّة للنقطة الثابتة الزائدية الموافقة لتطبيق بوانكاريه للتقاطعات الرأسية في فضاء طوري، والتي نستنتج من خلالها دالة ميلنيكوف التي أصفارها تشير إلى وجود الفوضى.

أخيراً، نطبق هذه الطريقة على معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة

كلمات مفتاحية: المنظومة الهاملتونية المضطربة - المنظومة المعلقة - النقطة الثابتة

الزائدية - دالة ميلنيكوف - معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة - المسار الهوموكليني.

# The Melnikov method and its application to the Duffing's equation with negative stiffness

**Master Student: Banan Kakhia**

**Faculty of Science – Albaath University**

**Supervisor: Dr. Mohamad Alali**

## Abstract

We aim in this research to study the Melnikov's method and applying it to the Duffing's equation with negative stiffness.

First, We consider a dynamical system with one- degree of freedom and periodic perturbation, such that , its basic unperturbed system has a hyperbolic fixed point connected to itself through a homoclinic orbit.

, We define the suspended system with three – dimensional phase space and its poincare map of cross sections which has a fixed point corresponding to periodic orbit of the suspended system.

Hence, we define the distance function between the stable and unstable manifolds of the fixed point of the Poincare map of cross sections in the phase space.

We deduce the formula for Melnikov's function that its zeros refer to chaos.

Finally We apply it to the Duffing's equation with negative stiffness.

**Keywords:** Perturbed Hamiltonian system - Suspended system - Hyperbolic fixed point - Melnikov's function - Duffing's Equation with negative stiffness - Homoclinic orbit.

## 1 - مقدمة:

طريقة ميلينكوف هي واحدة من الطرق التحليلية القليلة الموجودة لاكتشاف الفوضى ودراستها، وتمكننا هذه الطريقة من إثبات وجود نقاط التقاطع الرأسية الهوموكليينية (homoclinic) والتشعبات الهوموكليينية في فئة محددة وهامة من المنظومات الديناميكية.

تعود الفكرة الأساسية لهذه الطريقة للعالم بوانكاريه عندما كتب ورقة البحث الشهيرة حول مسألة الأجسام الثلاثة، حيث أنه كان يحاول إثبات عدم قابلية حل مسألة الأجسام الثلاثة المقصورة، إلا أن مساهمات ميلنيكوف [Melnikov (1963)] و أرنولد [Arnold (1964)] الهامة أدت إلى ظهور طريقة مبسطة يمكن من خلالها إثبات عدم قابلية مثل هذه المنظومات الديناميكية للمكاملة. وقد قام سميل [Smale (1967)] وتشيريكوف [Chirikov (1979)] وهولمز [Holmes (1980)] وتشاو [Chow, Hale and (1980)]، لاحقاً بإحياء هذه الطريقة و تثبيتها من خلال تطبيقها.

سنذكر في هذا البحث عملية استنتاج هذه الطريقة، وإيجاد دالة ميلنيكوف وتطبيقها على معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة.

## 2- هدف وأهمية البحث:

دراسة المنظومة الهاملتونية المضطربة ومنظومتها الأساسية غير المضطربة والمنظومة المعلقة المتعلقة بها وتطبيق بوانكاريه وإيجاد دالة المسافة بين المتنوعتين المستقرة وغير المستقرة و تطبيقها على معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة.

وتكمن أهمية البحث بالآتي:

### 3- طرق وأدوات البحث:

سنقوم بذكر أهم التعاريف الأساسية المتعلقة ببحثنا وإيجاد دالة ميلنيكوف وتطبيقها على معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة.

### 4- مشكلة البحث:

قد نعلم من دراسات سابقة أنّ بعض المنظومات الهاملتونية تسلك سلوكاً فوضوياً، لذلك سنبحث عن طرائق التنبؤ بالسلوكية الفوضوية لمثل هذه المنظومات وأفضل الطرائق للتحقق من ذلك.

### 5- التعاريف الأساسية:

من أجل متطلبات هذا البحث يلزم تقديم التعاريف الآتية:

### المنظومة الديناميكية: [1]

مجموعة من المعادلات الرياضية (تفاضلية (differential) أو فرقية (difference) أو تكاملية (integral) أو جبرية (algebraic) أو مزيج منها معاً)، تعطي قيمة المتغير الذي يحدد حالة المنظومة الديناميكية مع تغيير الزمن بدلالة الحالة أو الحالات السابقة لهذه المنظومة، وتتكون المنظومة الديناميكية من فضاء الموضع أو الحالة  $\Pi$  (phase space or state space) الذي يمكن أن يكون أي مجموعة جزئية من  $\mathbb{R}^N$  تصف إحدائياته الحالة الحركية للمنظومة في أية لحظة زمنية، ومتحول الزمن  $t$  الذي يمكن أن يكون مستمراً

$(t \in \mathbb{R})$  أو متقطعاً  $(t \in \mathbb{Z})$ ، وعلاقة ديناميكية (دالة رياضية) تحدد قانون التغير

الزمني لمتغير الحالة مع الزمن. يحدد قانون التغير الزمني،

الحالة المستقبلية لمتغيرات فضاء الموضع بدلالة القيم

الحالية لها فقط، على افتراض أن هذه الدالة تحقق الشروط التالية:

$$\phi(0, x) = x \quad .1$$

$$\phi(t_1, \phi(t_2, x)) = \phi(t_1 + t_2, x) \quad .2$$

.3 الدالة  $\phi(t, x)$  مستمرة بالنسبة للمتغيرات  $(t, x)$ .

#### النقطة الثابتة: [1]

ليكن لدينا الانسياب المعرف بالشكل:

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \mu) \quad (1)$$

تسمى النقطة  $x^* \in \mathbb{R}^n$  التي تحقق العلاقة  $f(x^*, \mu) = 0$ ، نقطة توازن أو نقطة ثابتة

للمنظومة. يمكننا أن نفرض دون المساس بعمومية المسألة أن النقطة هي  $x^* = 0$

بالتالي يمكن جعل هذه المنظومة خطية عن طريق النشر حول هذه النقطة وكتابتها

على الشكل:

$$\frac{dx}{dt} = A(\mu) \cdot x + g(x, \mu).$$

حيث أن  $A(\mu)$  هي المصفوفة اليعقوبية للدالة  $f(x, \mu)$ ، والتي نحصل عليها من

قيم مشتقات الدالة  $f$  بالنسبة لإحداثيات  $x$  في نقطة التوازن، وأن:

$$g(x, \mu) = f(x, \mu) - A(\mu) \cdot x \approx 0(x, \mu)$$

و على أي حال، لكي ندرس الاستقرار المحلي للمنظومة (1) قرب نقطة التوازن، نقوم بدراسة الاستقرار الخطي للمنظومة الخطية التالية:

$$\frac{dx}{dt} = A(\mu) \cdot x$$

و يتم ذلك عادةً عن طريق دراسة القيم الذاتية للمصفوفة  $A(\mu)$  والتي هي قيم  $\lambda$  التي نحصل عليها عن طريق حل المعادلة المميزة  $|\lambda \cdot I - A(\mu)| = 0$ ، حيث أن  $I$  هي المصفوفة الواحدية من المرتبة  $n$ . فإذا كان الجزء الحقيقي لجميع القيم الذاتية لا يساوي الصفر، فإن نقطة التوازن تدعى زائدية (hyperbolic).

#### المنحى المستقر ( غير المستقر): [1]

نقول عن متجه قيمة ذاتية  $e_i$  مقابل للقيمة الذاتية  $\lambda_i$  أنه منحى مستقر ( أو غير مستقر) إذا وفقط إذا كان  $\lambda_i < 0$  ( أو  $\lambda_i > 0$ ). أما إذا كان  $\lambda_i$  عدداً مركباً (عقدي)، وبالتالي لا بدّ من وجود مرافق عقدي لهذه القيمة الذاتية، عندئذٍ نقول أنّ نقطة التوازن  $x^*$  هي مركز مستقر (أو غير مستقر) إذا وفقط إذا كان  $\text{Re}\{\lambda_i\} < 0$  (أو  $\text{Re}\{\lambda_i\} > 0$ )، حيث أنّ  $\text{Re}\{\lambda_i\}$  هو الجزء الحقيقي للعدد المركب  $\lambda_i$ .

#### المتنوعة المستقرة ( غير المستقرة): [1]

يسمى الفضاء الجزئي من فضاء موضع المنظومة الديناميكية في جوار نقطة التوازن  $x^*$  والمتولّد بجميع المتجهات التي تمثل المناحي المستقرة ( أو غير المستقرة ) للمصفوفة  $A(\mu)$  بالمتنوعة المحلية المستقرة ( أو غير المستقرة ) للنقطة  $x^*$ . وهكذا فإن المتنوعة المستقرة ( أو غير المستقرة ) للنقطة  $x^*$ ، بشكل عام، هي مجموعة نقاط

فضاء موضع المنظومة الديناميكية التي تسعى إلى النقطة  $x^*$  عندما يسعى الزمن  $t$  إلى  $+\infty$  (أو  $-\infty$ ).

### 6- النتائج والمناقشة:

ليكن لدينا منظومة هاملتونية مضطربة ذات درجة حرية واحدة :

$$\frac{dX}{dt} = F(X) + \varepsilon f(X, t) \quad (2)$$

حيث  $X = [x, y]^T$  و  $F: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$  و  $f: \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$  دالة دورية بالنسبة لـ  $t$  دورها  $T$ ، أي أنه من أجل كل  $x$  و  $t$  تحقق الدالة  $f$  العلاقة  $f(X, t) = f(X, t+T)$  كما أنّ  $\varepsilon f(X, t)$  هو اضطراب صغير. [2]

عندها  $\varepsilon=0$ ، نحصل على المنظومة الأساسية وهي:

$$\frac{dX}{dt} = F(X) \quad (3)$$

والتي هي منظومة هاملتونية مستقلة، تمتد مساراتها على منحنيات معادلاتها  $H(y, x) = E$ ، حيث أنّ  $E$  ثابتة مختلفة. بالإضافة إلى ذلك، نفرض أنّ هذه المنظومة تملك نقطة سرجية  $X_0$  ذات اتصال هوموكليني، حيث أنّ  $\{q_0(t)\}$  هو المسار الهوموكليني للمنظومة ويحقق المعادلة (3) و يسعى هذا المسار إلى  $X_0$  عندما يسعى الزمن إلى  $\pm\infty$ .

تطبق  $q_0(t)$  على كلتي المتنوعتين المستقرّة  $W^s(X_0)$  وغير المستقرّة  $W^u(X_0)$  لـ  $X_0$  للمعادلة (3) ومن أجل كلّ  $t$  تتطابق المتنوعتان المستقرّة وغير المستقرّة على طول المسار الهوموكلييني.

لاحظ أنّ فضاء الطور للمنظومة (3) هو فضاء ثنائي البعد وأنّ متنوعاتها هي فقط منحنيات سوية.

في حال كانت  $\varepsilon \neq 0$ ، سيكون من المفيد اعتبار المنظومة المعلقة:

(4)

$$\frac{dX}{dt} = F(X) + \varepsilon f(X, \theta) \quad ; \quad \frac{d\theta}{dt} = 1$$

وهي منظومة تلقائيّة، فضاءها الطوري ثلاثي البعد بالنسبة لـ  $(x, \theta)$  ومطابقة للمنظومة الأساسية لـ (2).

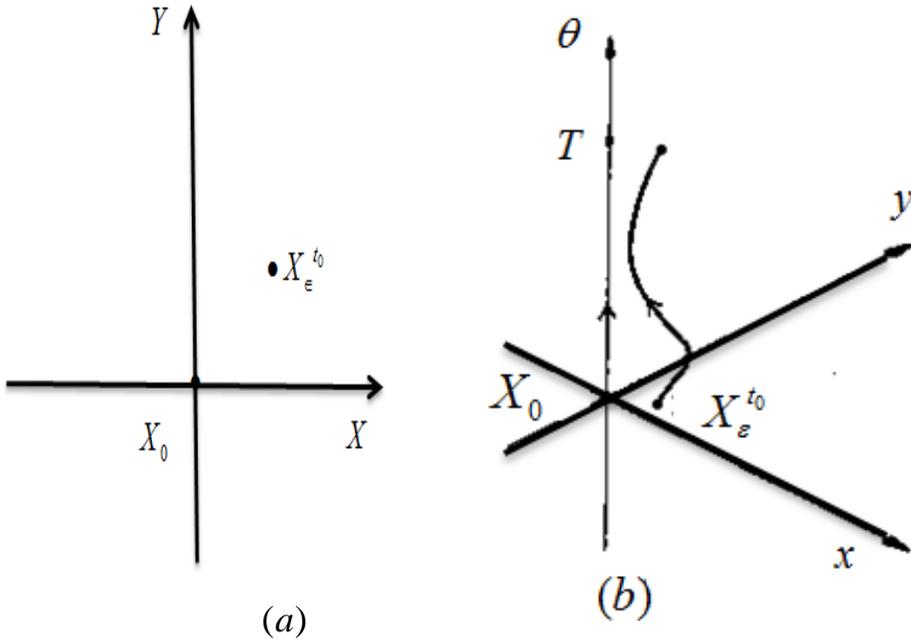
لنعزّف تطبيق بوانكاريه لهذه المنظومة بالشكل:

$$P_\varepsilon^{t_0} : \Sigma^{t_0} \rightarrow \Sigma^{t_0}$$

حيث

$$\Sigma^{t_0} = \{(x, \theta) : \theta = t_0 \in [0, t)\}$$

يملك هذا التّطبيق  $P_\varepsilon^{t_0}$  نقطة ثابتة  $X_\varepsilon^{t_0}$  تحقق  $X_\varepsilon^{t_0} = X_0 + O(\varepsilon)$ ، وتتطابق هذه النّقطة الثّابتة مع مسار دوري للمنظومة (4) كما هو موضح بالشكل:



الشكل (1) في (a): النقطة الثابتة  $X_\epsilon^{t_0}$  للتطبيق  $P_\epsilon^{t_0}$  و النقطة الثابتة  $X_0$  للتطبيق  $P_\epsilon^{t_0}$  في المستوي  $(x, y)$  وفي (b): المسار الدوري للمنظومة (2) الموافق للنقطة الثابتة  $X_\epsilon^{t_0}$  والمسار الدوري الموافق للمنظومة (3)

نرمز للمتوعة المستقرة للنقطة الثابتة لتطبيق بوانكاريه  $P_\epsilon^{t_0}$  بالرمز  $M_\epsilon^s(X_\epsilon^{t_0})$  والمتوعة غير المستقرة بـ  $M_\epsilon^u(X_\epsilon^{t_0})$ .

وبشكل خاص، سنأخذ  $M_0^s(X_0) = W^s(X_0)$  و  $M_0^u(X_0) = W^u(X_0)$  على طول المسار الهوموكليني. من جهة أخرى أيّ كان  $x \in M_\epsilon^s(X_\epsilon^{t_0})$  تتقارب صور هذه النقاط وفق تطبيق بوانكاريه  $(P_\epsilon^{t_0})^n(x)$  بشكل

أسي من  $X_\varepsilon^{t_0}$  عندما  $n \rightarrow \infty$ ، وبشكل مشابه أيًا كان  $x \in M_\varepsilon^u(X_\varepsilon^{t_0})$  عندها تتقارب الصور العكسيّة  $(P_\varepsilon^{t_0})^n(x)$  بشكل أسي من  $X_\varepsilon^{t_0}$  عندما  $n \rightarrow -\infty$  [3]

باختيار نقطة كفيّة  $q_0$  على المسار الهوموكليني للمنظومة الأساسيّة (3) وبأخذ طور الحل  $q_0$  التي من أجلها تكون  $q_0(0)$  النّقطة المختارة. بعدها بحساب المسافة  $M$  بين المتنوّعة المستقرّة  $M_\varepsilon^s(X_\varepsilon^{t_0})$  وغير المستقرّة  $M_\varepsilon^u(X_\varepsilon^{t_0})$  في جوار النّقطة  $q_0(0)$  من أجل كلّ  $t_0$  على أن نلاحظ أنّ هذه المسافة  $M$  ستكون تابعة لـ  $q_0(0)$  والطور  $t_0$ . فإذا وجدت قيمة لـ  $t_0$  تتقاطع المتنوّعتان المستقرّة  $M_\varepsilon^s(X_\varepsilon^{t_0})$  وغير المستقرّة  $M_\varepsilon^u(X_\varepsilon^{t_0})$  بشكل أسي في التقاطع الرأسي  $\Sigma^{t_0}$ ، وذلك لأنّ  $t_0$  طور  $q_0$  فقط، والانسحاب الزمني يكافئ إلى الانسحاب على المسار الهوموكليني، وتتقاطع المتنوّعتان عدد لا نهائي من المرات ليس فقط من أجل هذه القيمة ولكن من أجل كلّ قيم  $t_0$ .

الآن نوجد بدايةً معادلات المسارات  $\{q_\varepsilon^s(t, t_0), t\}$  و  $\{q_\varepsilon^u(t, t_0), t\}$  والتي تحقّق أنّ المعادلة (4) تقع على طول المتنوّعتين المستقرّة  $M_\varepsilon^s(X_\varepsilon^{t_0})$  وغير المستقرّة  $M_\varepsilon^u(X_\varepsilon^{t_0})$  في الفضاء الطوري ثلاثي البعد.

بعدها، بنشر حلّي المنظومة (2) في جوار  $t_0$  نجد:

(5)

$$q_{\varepsilon}^s(t, t_0) = q_0(t-t_0) + \varepsilon q_1^s(t, t_0) + O(\varepsilon^2) \quad t \geq t_0$$

$$q_{\varepsilon}^u(t, t_0) = q_0(t-t_0) + \varepsilon q_1^u(t, t_0) + O(\varepsilon^2) \quad t \leq t_0$$

وباختيار الحدود الخطية فقط في جوار  $q_0$  من أجل  $\varepsilon$  صغير نجد أن:

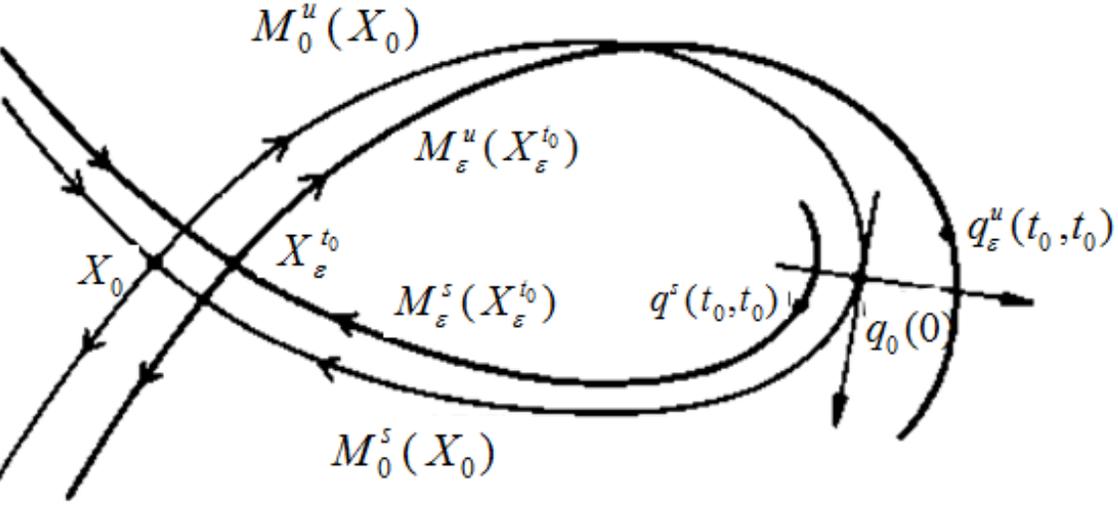
$$\frac{dq_1^s(t, t_0)}{dt} = J(q_0(t-t_0)) q_1^s(t, t_0) + f(q_0(t-t_0), t) \quad (6)$$

من أجل  $t \geq t_0$ ، حيث  $J$  المصفوفة اليعقوبية لـ  $F$ ، تحقق  $q_1^u(t, t_0)$  المعادلة (6) من أجل كل  $t \leq t_0$ .

من أجل  $\varepsilon$  صغير، نحسب البعد بين المتنوعتين المستقرّة وغير المستقرّة عن طريق قياسها في اتجاه ناظم المسار الهوموكليني للمنظومة (3) في النقطة  $q_0(0)$  حيث يعطى متجه الإزاحة بالعلاقة:

$$d(t_0) = q_{\varepsilon}^u(t_0, t_0) - q_{\varepsilon}^s(t_0, t_0) \quad (7)$$

علماً أنّ  $q_{\varepsilon}^s(t, t_0)$  و  $q_{\varepsilon}^u(t, t_0)$  نقطتان مجاورتان لـ  $q_0(0)$ ، والمتنوعتان مماسان للمسار الهوموكليني عند  $q_0(0)$ ، كما في الشكل 2:



الشكل (2) : المسافة بين المدارات على المتتوعتين المستقرة وغير المستقرة بالقرب من  $q_0(0)$  في اللحظة

$$t_0$$

ونلاحظ أنه إذا كان:  $F = [F_1, F_2]^T$  عندئذ يعطى متجه واحدة الناظم الخارجي بالشكل:

$$n = [-F_2(q_0(0)), F_1(q_0(0))]^T / |F(q_0(0))|$$

تعرف مسافة ميلنيكوف بين المتتوعتين في النقطة  $q_0(0)$  بالشكل:

$$D(t_0) = d \cdot n \quad (8)$$

$$= \frac{\varepsilon F(q_0(0)) \wedge \{q_1^u(t_0, t_0) - q_1^s(t_0, t_0)\}}{|F(q_0(0))|} + O(\varepsilon^2)$$

(9)

حيث الجداء الخارجي لأي زوج من المتجهين  $a = [a_1, a_2]^T$  و  $b = [b_1, b_2]^T$ ،  
معرف بالعلاقة :

$$a \wedge b = a_1 b_2 - a_2 b_1$$

من أجل حساب  $D$ ، تساعدنا المعادلة (6) في إزالة  $q_1^s$  و  $q_1^u$  من العبارة (8) وذلك  
لأن  $q_1^s$  و  $q_1^u$  غير معرفة صراحةً.

نعرف بدايةً:

$$\Delta^s(t, t_0) = F(q_0(t-t_0)) \wedge q_1^s(t, t_0) \quad (10)$$

بالاشتقاق نجد أن:

$$\begin{aligned}
 \frac{d \Delta^s(t, t_0)}{dt} &= J(q_0(t-t_0)) F(q_0(t-t_0)) \wedge q_1^s(t, t_0) \\
 &\quad + F(q_0(t-t_0)) \wedge \frac{d q_1^s(t, t_0)}{dt} \\
 &= J(q_0(t-t_0)) F(q_0(t-t_0)) \wedge q_1^s(t, t_0) \\
 &\quad + F(q_0(t-t_0)) \wedge \{ J(q_0(t-t_0)) q_1^s(t, t_0) + f(q_0(t-t_0), t) \} \\
 &= \text{trace}\{J(q_0(t-t_0))\} F(q_0(t-t_0)) \wedge q_1^s(t, t_0) \\
 &\quad + F(q_0(t-t_0)) \wedge f(q_0(t-t_0), t) \\
 &= F(q_0(t-t_0)) \wedge f(q_0(t-t_0), t). \\
 (11)
 \end{aligned}$$

و ذلك لأن:

$$(J a) \wedge b + a \wedge (J b) = (\text{trace } J)(a \wedge b)$$

$$\text{trace } J = \partial F_1 / \partial x_1 + \partial F_2 / \partial y = \partial^2 H / \partial x \partial y - \partial^2 H / \partial y \partial x = 0$$

بمكاملة (11) من  $t_0$  إلى  $\infty$  نجد أن:

$$\Delta^s(t_0, t_0) = \Delta^s(\infty, t_0) - \int_{t_0}^{\infty} F(q_0(t-t_0)) \wedge f(q_0(t-t_0), t) dt$$

(12)

حيث

$$\Delta^s(\infty, t_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} F(q_0(t-t_0)) \wedge q_1^s(t, t_0) = 0$$

لأن  $q_1^s(t, t_0)$  محدود و  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(q_0(t-t_0)) = \lim_{t \rightarrow \infty} F(X_0) = 0$

بالتعويض في (11) نجد أن:

$$\Delta^s(t_0, t_0) = - \int_{t_0}^{\infty} F(q_0(t-t_0)) \wedge f(q_0(t-t_0), t) dt \quad (13)$$

بنفس الطريقة نجد أن:

$$\Delta^u(t_0, t_0) = \int_{-\infty}^{t_0} F(q_0(t-t_0)) \wedge f(q_0(t-t_0), t) dt \quad (14)$$

بتعويض (13) و (14) في المعادلة (9) نجد أن:

$$D(t_0) = \frac{\varepsilon M(t_0)}{|F(q_0(0))|} + O(\varepsilon^2) \quad (15)$$

حيث أن  $M(t_0)$  هي دالة ميلنيكوف المعرّفة بالشكل :

$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} F(q_0(t_0-t)) \wedge f(q_0(t_0-t)) dt \quad (16)$$

بشكل عام، إذا ملكت الدالة  $M$  صفراً بسيطاً  $\tau$ ، عندها تملك المسافة  $D$  صفراً بسيطاً في جوار  $\tau$  من أجل  $\varepsilon$  صغير وتتقاطع المتنوعتان المستقرّة وغير المستقرّة عدداً لا نهائياً من المرات عند النقطة الموافقة لـ  $t_0 = \tau$ .

و إذا لم تملك الدالة  $M$  صفراً بسيطاً عندها لن تملك المسافة  $D$  صفراً بسيطاً أيضاً، ولن تتقاطع المتنوعتان المستقرّة وغير المستقرّة. [4]

### مثال تطبيقي:

تعطى معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة بالشكل:

$$\frac{dx}{dt} = y \quad \frac{dy}{dt} = x - x^3 + \varepsilon(\gamma \cos wt - \delta y)$$

حيث  $0 < \varepsilon \leq 1$  و  $r, \delta, w > 0$ .

لنضع  $f = [0, \gamma \cos wt - \delta y]^T$  و  $F = [y, x - x^3]^T$  من أجل  $\varepsilon = 0$ ، توجد نقطة سرجية عند نقطة الأصل  $(0, 0)$  في المستوي الطوري مع منحنين هوموكلينيين متناظرين. [5]

وتملك مسارات المنظومة الأساسية المعادلة  $H(y, x) = E$ ، حيث

$$F = (\partial H / \partial y, -\partial H / \partial x) \Rightarrow (y, x - x^3) = (\partial H / \partial y, -\partial H / \partial x)$$

$$\partial H / \partial y = y \Rightarrow H = \frac{1}{2} y^2$$

$$-\partial H / \partial x = x - x^3 \Rightarrow H = \frac{1}{4} x^4 - \frac{1}{2} x^2$$

$$\Rightarrow H = \frac{1}{2}y^2 - \frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{4}x^4 = E$$

ومنه ينتج معادلة المسارات الهوموكليتيّة ، وذلك عندما  $E=0$  ، أي أنّ

$$\frac{1}{2}y^2 = \frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{4}x^4 \Rightarrow y = \pm x \sqrt{1 - \frac{1}{2}x^2} \quad (17)$$

ومن معادلة دفينغ لدينا  $y = \frac{dx}{dt}$  بتعويضها في (16) وبالمكاملة نجد أنّ:

$$\int \frac{\frac{dx}{\sqrt{2}}}{\frac{x}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)^2}} = t \Rightarrow t = \operatorname{arcsec} h \frac{x}{\sqrt{2}}$$

ومنه نجد  $x = \sqrt{2} \operatorname{sech} t$  ، وبالتعويض في (17) نجد:

$$y = \pm \sqrt{2} \operatorname{sech} t \sqrt{1 - \frac{1}{2} 2(\operatorname{sech} t)^2} = \pm \sqrt{2} \operatorname{sech} t \sqrt{1 - \frac{1}{\cosh^2 t}} = \pm \sqrt{2} \operatorname{sech} t \tanh t$$

ويصبح الحل الهوموكليتي معطى بالشكل:

$$q(t) = \pm \left( \sqrt{2} \operatorname{sech} t , \sqrt{2} \operatorname{sech} t \tanh t \right)$$

و بأخذ  $q_0(0) = (\pm \sqrt{2} , 0)$  ، ولنوجد دالة ميلنيكوف المعطاة بالشكل:

$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(q_0(t-t_0)) \wedge f(q_0(t-t_0)) dt$$

بتعويض قيمة الدالتين  $F$  و  $f$  في عبارة التكامل:

$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} y_0(t-t_0) \{ \gamma \cos wt - \delta y_0(t-t_0) \} dt. \quad (18)$$

بإجراء تغيير في المتحول أي  $x=t-t_0$  وتعويضها في (18) نجد:

$$M(t_0) = \sqrt{2} \gamma \sin wt_0 \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x \tanh x \sin wx dx - 2\delta \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech}^2 x \tanh^2 x dx. \quad (19)$$

نلاحظ أن قيمة الدالة  $M$  مرتبطة بقيمة التكاملين، ولنوجد قيمة التكاملين:

$$I_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} \tanh^2 x \operatorname{sech}^2 x dx = \frac{1}{3}(1+1) = \frac{2}{3} \quad (20)$$

أما التكامل الثاني فيحل عن طريق نظرية الرواسب

$$I_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x \tanh x \sin wx dx$$

نعلم أن  $e^x = \cos x + i \sin x$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x \tanh x e^{iwx} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x \tanh x \cos x dx + i \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x \tanh x \sin wx dx$$

نكامل الطرف الأول بالتجزئة:

$$u = e^{iwx} \quad , \quad du = i w e^{iwx} dx$$

$$dv = \operatorname{sech} x \tanh x \quad , \quad v = -\operatorname{sech} x$$

بالتعويض في التكامل نجد أن:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x \tanh x e^{iwx} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x e^{iwx} dx$$

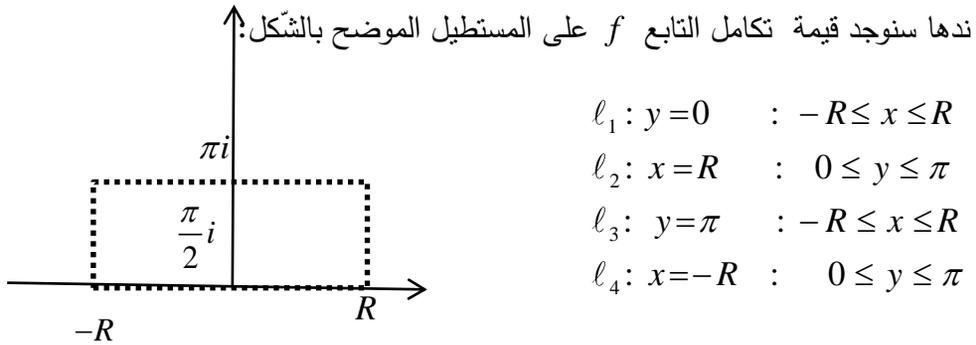
من جهة أخرى يمكن كتابة التكامل بالشكل الآتي:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \operatorname{sech} x e^{iwx} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{iwx}}{e^x + e^{-x}} dx = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}} dx$$

لنفرض أن التابع  $f = \frac{2e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}}$  يملك عدد لا نهائي من النقاط الشاذة في المستوي

العقدي  $x = (2k+1)\frac{\pi}{2}i$  ، فإنه من غير المناسب اختيار منطقة التكامل

على شكل دائرة كبيرة فإنها سوف تحتوي عدد لا نهائي من النقاط الشاذة.



ونلاحظ أن النقطة الشاذة  $x = \frac{\pi i}{2}$  تقع داخل  $C$  حسب مبرهنة كوشي للرواسب

$$\begin{aligned}
 \oint_C \frac{e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}} dx &= \int_{-R}^R \frac{2e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}} dx + \int_0^\pi \frac{2e^{(iw+1)(R+iy)}}{1+e^{2(R+iy)}} i dy \\
 &+ \int_{+R}^{-R} \frac{2e^{(iw+1)(x+\pi i)}}{1+e^{2(x+\pi i)}} dx + \int_\pi^0 \frac{2e^{(iw+1)(-R+iy)}}{1+e^{2(-R+iy)}} i dy \\
 &= 2\pi i \operatorname{Res} \left( \frac{2e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}}, \frac{\pi}{2} i \right) = 2\pi i \frac{e^{(iw+1)\frac{\pi}{2}i}}{e^{\pi i}} = 2\pi e^{-\frac{w\pi}{2}}
 \end{aligned}$$

ويجعل  $R \rightarrow \infty$  نجد أن:

$$\left| \int_\pi^0 \frac{2e^{(iw+1)(-R+iy)}}{1+e^{2(-R+iy)}} i dy \right| \leq \pi \frac{2e^{-(iw+1)R}}{1+e^{-2R}} \rightarrow 0$$

$$\left| \int_0^\pi \frac{2e^{(iw+1)(R+iy)}}{1+e^{2(R+iy)}} i dy \right| \leq \int_0^\pi \frac{2e^{(iw+1)R}}{1+e^{2R}} dy = \pi \frac{e^{(iw+1)R}}{1+e^{2R}} \rightarrow 0$$

و

$$\begin{aligned}
 \int_{-R}^{+R} \frac{e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}} dx - \int_{-R}^{+R} \frac{e^{(iw+1)(x+\pi i)}}{1+e^{2(x+\pi i)}} dx &= \int_{-R}^{+R} \frac{e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}} dx - \int_{-R}^{+R} \frac{e^{(iw+1)x} e^{(iw+1)\pi i}}{1+e^{2x} e^{2\pi i}} dx = \int_{-R}^{+R} \frac{e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}} dx \\
 + \int_{-R}^{+R} \frac{e^{(iw+1)x} e^{-w\pi}}{1+e^{2x}} dx &= (1+e^{-w\pi}) \int_{-R}^{+R} \frac{2e^{(iw+1)x}}{1+e^{2x}} dx = 2\pi e^{-\frac{w\pi}{2}}
 \end{aligned}$$

ومنه نجد أن

$$\int_{-R}^{+R} \frac{2e^{(i w+1)x}}{1+e^{2x}} dx = \frac{2\pi e^{-\frac{w\pi}{2}}}{1+e^{-w\pi}} = \frac{2\pi}{e^{\frac{w\pi}{2}} + e^{-\frac{w\pi}{2}}} = \pi \operatorname{sech} \frac{w\pi}{2} \quad (21)$$

بتعويض قيمة التكاملين (20) و (21) في (19) نجد أن:

$$M = -\frac{4\delta}{3} + \sqrt{2} \pi \gamma w \operatorname{sech}\left(\frac{1}{2} \pi w\right) \sin(wt_0)$$

بفرض أن:

$$R^0(w) = \frac{4 \cosh\left(\frac{\pi w}{2}\right)}{3\sqrt{2} \pi w}$$

فإذا كان  $\frac{\gamma}{\delta} > R^0(w)$  عندها تتقاطع المتنوعتان المستقرّة وغير المستقرّة من أجل  $\varepsilon$

صغير، بينما إذا كان  $\frac{\gamma}{\delta} < R^0(w)$  عندها  $M < 0$  ولن تتقاطع المتنوعتان المستقرّة

وغير المستقرّة.

ملاحظة: [6]

إذا كانت الدالة  $f$  هاملتونية (أي مشتقة من دالة هاملتونية):

$$f_1 = \frac{\partial G}{\partial y} \quad f_2 = -\frac{\partial G}{\partial x}$$

عندها تصبح دالة ميلنيكوف معطاة بالشكل :

$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \{H(q_0(t-t_0)), G(q_0(t-t_0)), t\} dt$$

حيث  $\{H, f\}$  قوس بواسون المعطى بالشكل:

$$\{H, G\} = \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial G}{\partial y} - \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial G}{\partial x}.$$

#### الاستنتاجات والمقترحات:

بعد استنتاج طريقة ميلنيكوف بشكل نظري، استطعنا تطبيق هذه الطريقة على منظومة ذات درجة حرية واحدة والتي هي معادلة دفينغ ذات القساوة السالبة، وأوجدنا دالة ميلنيكوف، وبيئاً أنّ أصفار هذه الدالة تشير إلى النقطاعات الرأسية المتنوعتين المستقرة وغير المستقرة.

بالإضافة إلى ذلك، يمكن تطبيق طريقة ميلنيكوف في حال كانت المنظومة أكثر من درجة حرية واحدة، وكانت الدالة  $F$  المذكورة في المعادلة (1) غير هاملتونية، لذلك نرجو دراسة تلك الطريقة في تلك الحالات مع ذكر أمثلة توضيحية لذلك.

المراجع:

- 1- ALI M., 2005- Chaos predictability and controiability in nonlinear system  
" Ph D Thesis", University of Delhi, Delhi.
- 2- BENETTIN G., 2002- The elements of Hamiltonian perturbation theory , Dipartimento di Matematic ,  
University de Padava, Italy.
- 3- WIGGINS S., 2003- Introduction to applied nonlinear dynamical systems and chaos. Volume 2 ed, Springer science & Business Media, New york , USA.
- 4- Drazin P.G, 1992 – Nonlinear systems. Cambridge University press , NewYork , USA.
- 5- FASSO F., 2016 – Homoclinic chaos and the Poincare – Melnikov method. University de Padova " Galileo Galilei" , Italy.
- 6- Matkowsky B., 1970- A simple nonlinear dynamical stability problem , Bull,Amer,Moscow,Russia.



# دراسة نظرية وتجريبية لتأثير تركيز الإلكترونات في المعادن على المقطع العرضي لتشتت الفوتون

حامد برهوم<sup>1</sup>

د. سليمان ديبو<sup>3</sup>

د. عبدالله رستناوي<sup>2</sup>

## الملخص

في هذا البحث، استناداً إلى مفاهيم احتمالية، اشتققنا علاقة تعطي المقطع العرضي لتشتت الإلكترون عن الفوتون. هذه العلاقة توحي بأن المقطع العرضي يتأثر بتغير طاقة الفوتون واختلاف طاقة الإلكترون. كما أجرينا قياسات تجريبية على عدة معادن هي الألمنيوم والحديد والقصدير والرصاص من أجل التحقق من صلاحية العلاقة المشتقة. لقد وجدنا أن قيم المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون التي تعطيها علاقتنا هي من نفس رتبة القيمة التي تعطيها علاقة كلاين-نيشينا. ولكنها، من أجل العناصر المدروسة، تكون أكبر بقليل من تلك التي تعطيها علاقة كلاين-نيشينا. وإن المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون وفقاً لعلاقة كلاين-نيشينا هو مقدار ثابت من أجل كافة الإلكترونات، بينما هو وفقاً لعلاقتنا يتغير من مادة لأخرى.

**الكلمات المفتاحية:** هضبة كومبتون، علاقة كلاين ونيشينا، احتمال التشتت.

<sup>1</sup> طالب ماجستير فيزياء نظرية في قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

<sup>2</sup> قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

<sup>3</sup> قسم الفيزياء بكلية العلوم في جامعة البعث.

# Study of the effect of the concentration of electrons in metals on the cross-section of photon scattering

Hamed Barhom<sup>4</sup>

Dr. Abdullah Rastanawi<sup>5</sup>

Dr. Solaiman Dibo<sup>6</sup>

## Abstract

In this paper, based on probabilistic concepts, we derive a relationship that gives the cross-section of the scattering of an electron from a photon. This relationship suggests that the cross-section is affected by the photon energy change and the electron energy difference. We also conducted experimental measurements on several metals, namely aluminum, iron, tin and lead, in order to verify the validity of the derived relationship. We have found that the photon-electron scattering cross-sectional values given by our relationship are of the same order as that given by the Klein-Nishina Formula. However, for the studied elements, it is slightly greater than that given by the Klein-Nishina Formula. The cross-section of the photon scattering from the electron according to the Klein-Nishina Formula is a constant for all electrons, while according to our relationship it varies from one material to another.

**Keywords:** Compton Plateau, Klein-Nishina formula, scattering probability.

<sup>4</sup> Master student in Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University

<sup>5</sup> Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University.

<sup>6</sup> Department of Physics- Faculty of Science- Al-Baath University.

### 1. مقدمة

لقد استنتج طومسون ثم كومبتون ثم ديراك-وغوردن ثم كلاين-ونيشينا العلاقة التي تعطي المقطع العرضي لتشتت فوتون (اكس أو غاما) عن إلكترون، انظر العلاقات من (1) حتى (4) في الدراسة النظرية المرجعية أدناه. ونظراً لكون سرعة فوتون اكس أو غاما (نفس سرعة الضوء) كبيرة، فقد افترضوا ضمناً بأنه زمن التأثير المتبادل يكون صغيراً جداً، وبالتالي يمكن النظر إلى الإلكترون وكأنه ساكن خلال زمن التأثير المتبادل. بمعنى آخر أن اختلاف سرعة الإلكترون ليس لها تأثير على المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون، وهذا لا يكون صحيحاً إلا إذا كانت السرعة الوسطى للإلكترونات في جميع المواد هي نفسها. لكن بما أن التركيز الإلكتروني يكون مختلفاً من مادة إلى أخرى، فإن السرعة الوسطى للإلكترونات، عند نفس درجة الحرارة للمادة، تكون مختلفة من مادة إلى أخرى. ولذلك، فإننا نتوقع أن يؤثر نوع المادة وبالتالي تركيز الإلكترونات (أو السرعة الوسطى للإلكترون) على المقاطع العرضية لتشتت الفوتون عن الإلكترونات في المواد المختلفة. وبما أن سرعة الفوتون في أي مادة تكون أقل منها في الخلاء، فإننا نتوقع أيضاً أن يؤثر اختلاف سرعة الفوتون في المواد المختلفة على المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون.

### 3. هدف البحث

إن مشكلة البحث هي أن أفضل علاقة للمقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون، وهي التي أوجدها كلاين-ونيشينا، لا تتعلق بتركيز الإلكترونات أو بكلام آخر لا تتعلق بنوع المادة التي يحصل فيها التشتت الفوتونات على الإلكترونات؛ بمعنى أن المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون، وفقاً لكلاين-ونيشينا، هو مقدار ثابت في كافة المواد. لذلك، فإن الهدف من هذا البحث يكون اشتقاق علاقة نظرية جديدة

للمقطع العرضي لتشتت فوتونات غاما على الإلكترونات، يمكن تطبيقها تجريبياً، تأخذ بعين الاعتبار اختلاف تركيز الإلكترونات من مادة لأخرى واختلاف سماكة العينة. ومن ثم تعيين المقاطع العرضية لتشتت الفوتون عن الإلكترون تجريبياً في مواد مختلفة، ثم مقارنة المقاطع العرضية لهذه المواد مع المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون الذي تعطيه علاقة كلاين-نيشينا ومناقشة مدى التطابق بينهما.

#### 4. مواد وطرق البحث

##### دراسة نظرية مرجعية

إن إحدى أعظم الثورات العلمية في تاريخ البشرية كانت نشوء ميكانيك الكم. فلقد كانت عملية ولادته صعبة للغاية، ولقد امتدت من بداية مقالة بلانك في عام 1900 حتى فترة ظهور المقالات التي قدمها أينشتاين Einstein، و بور Bohr، وهايزنبرغ Heisenberg، وشرودنجر Schrödinger وديراك Dirac والعديد من العلماء الآخرين. ثم ما بعد الفترة 1925-1927، تم وضع نظرية ناجحة استطاعت أن تشرح العديد من الظواهر المعقدة في الطيوف الذرية. ولذلك، توجه حينها الاهتمام نحو دراسة الظواهر التي تحصل عند طاقات أعلى من تلك التي تظهر في الطيوف الذرية. وبالتحديد هذا هو ما حدث خلال فترة ما بين 1928-1932، التي كانت مفعمة بالأفكار العلمية العظيمة الجديدة وبفوضى كبيرة، لعبت فيها علاقة كلاين-نيشينا Klein-Nishina Formula دوراً حاسماً في التقليل من تلك الفوضى. لقد نشر كلاين ونيشينا علاقتهما في عام 1929 في مجلة Nature and Z. Physik. وفيها كانا قد عالجا مشكلة كلاسيكية شهيرة، وهي تشتت الموجة الكهرومغناطيسية (الفوتونات) على جسيمات مشحونة (الإلكترونات). وهذه هي المشكلة الكلاسيكية التي كان قد درسها طومسون J. J. Thomson. حيث إنه بحسب المفاهيم النظرية الكلاسيكية؛ من

المفترض أن يكون تردد الموجة المنتشرة مماثلاً تماماً لتردد الموجة الواردة، وبناء عليه توصل طومسون إلى أن المقطع العرضي الكلي للتشتت يكون ثابتاً ويعطى بالعلاقة:

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m^2 c^4} \quad (1)$$

حيث  $e$  هي شحنة الإلكترون، و  $m$  هي كتلة الإلكترون، و  $c$  سرعة الضوء [1].

لكن في عام 1923 في فترة إجراء كومبتون لتجربته، وجد بأن الأمواج المشتتة تمتلك ترددات أصغر من ترددات الأمواج الواردة. كما بين أيضاً بأنه إذا ما تم تبني أفكار أينشتاين المتعلقة بالكموم الضوئية (الضوء سيل من الفوتونات)، فإن تطبيق قوانين انحفاظ الطاقة والدفع كمومياً يقود أيضاً إلى أن الأمواج المنتشرة ستكون ذات ترددات أصغر من ترددات الأمواج الواردة. وقد حاول كومبتون أيضاً تقدير المقطع العرضي لهذا التشتت، باستخدام مفاهيم نصف الكلاسيكية مع إضافة فكرة أن تردد الموجة المنتشرة يكون ذا قيم أصغر من تردد الموجة الواردة، فحصل على العلاقة التالية:

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m^2 c^4} \frac{1}{1 + 2\alpha} \quad ; \quad \alpha = \frac{h\nu}{mc^2} \quad (2)$$

وعندما تكون طاقة الكم الضوئي الوارد (الفوتون)  $h\nu$  صغيرة جداً بالمقارنة مع الطاقة المكافئة للكتلة السكونية للإلكترون  $mc^2$ ، فإن  $\alpha \approx 0$ ، والعلاقة (2) تؤول إلى علاقة طومسون (1) [1].

إن نظرية كومبتون هذه هي إحدى تلك الأعمال التخمينية الساحرة التي يمكن اعتبارها على أنها نموذجاً عن تلك الأفكار التي كانت سائدة خلال فترة العشرينيات من القرن الماضي، وكان كومبتون يعلم أن نظريته هذه ليست صحيحة بشكل مطلق، لكنه قدم أفضل ما لديه [2]. ثم في وقت لاحق، وبالتحديد في عام 1926، استخدم كل من ديراك وغوردن ميكانيك الكم. ورغم أنهما اتبعا طريقتين مختلفتين، إلا أنهما، من أجل

المقطع العرضي الكلي للتشتت الذي كان طومسون وكومبتون قد استنتجاه من قبل، فقد حصل كلاهما كل على حده على نفس العلاقة التالية:

$$\sigma = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right] \quad (3)$$

لذلك تسمى العلاقة (3) بعلاقة ديراك-غوردن. ورغم أن هذه العلاقة تشبه إلى حد كبير علاقة كومبتون، إلا أنها أكثر تعقيداً ليس إلا. وهي أيضاً لم تكن صحيحة بشكل مطلق، لكونهما، كما علق البعض على ذلك، لا تحتوي في ثناياها على سببين للإلكترون [2,3].

ثم في عام 1928 جاءت معادلة ديراك النسبية Dirac's relativistic equation التي رغم أنها قادت إلى نجاح عظيم إلا أنها أدت إلى فوضى أعظم. وحتى بعد مرور 40 عاماً عليها، استخدم أوبنهايمر Oppenheimer، في المقابلة الصحفية التي أجراها معه الفيلسوف توماس كون T.S. Kuhn، مؤلف كتاب "هيكلية الثورات العلمية"، الاستعارة المكنية التالية: **السحر والمرض** لوصف معادلة ديراك. لماذا هي سحر؟ لأنه؛ (أ) قبل معادلة ديراك، كان اللف الذاتي للإلكترون (السبين) مجرد فرضية، لكن بمعادلة ديراك صار اللف الذاتي للإلكترون أمراً طبيعياً مسلم به. (ب) ولكونها تتضمن اقتراناً صحيحاً للسبين-مدار، (ج) وكونها تتضمن عزمًا مغناطيسياً للإلكترون يأخذ قيمةً صحيحة. ورغم ذلك السحر، إلا أنها بحد ذاتها كانت مرضاً لوجود "الحالات الطاقية السالبة" فيها التي قادت إلى تناقضات كبيرة. ولقد قادت هذه التناقضات إلى تشويش علماء الفيزياء في تلك الفترة، وحتى أنها أحياناً قادت البعض منهم إلى الجنون. فعلى سبيل المثال لا الحصر، لقد علق عليها إدينغتون Eddington مستكراً ومتهكماً؛ "إن معادلة ديراك هي  $4 \times 4$  و  $4$  هي  $2 \times 2$ ، لكن بما أن  $(8 \times 8 + 2 \times 2) \times 2 = 136$ ، فإننا نستنتج بأن ثابت البنية الدقيقة fine structure constant يجب أن يكون

له قيمة قدرها 1/136". ثم بعد عام واحد، علق من جديد على التعديل المعمول على نظرية ديراك، قائلاً "الآن، لا، يجب عليك أن تضيف إليها واحداً. ولذلك، يصبح ثابت البنية الدقيقة 1/137. وقبل حوالي أشهر من وفاة إدينغتون قال: "باستمرار كنت أحاول معرفة لماذا يجد الناس أن نهجي (أو مقاربتني في حل مشاكل الفيزياء) كان غامضاً. لكنني أود أن أوضح أنه حتى ما كتبه أينشتاين كان غامضاً، وأن المئات من الناس ما تزال تعتقد أنه من الضروري أن يتم شرحه. فأنا بحق لا أستطيع أن أصدق أنني وصلت بالناس إلى الغموض الذي أوقع ديراك فيه الناس. لكن على كل حال، بالنسبة لأينشتاين وديراك، كان الناس يعتقدون أنه من المجدي أن يتم كشف ذلك الغموض في كتاباتهما. ولذا أنا أظن أنهم سيفهمون جيداً ما كتبت عندما يدركون أن عليهم فعل نفس ما فعلوا بالنسبة لهما؟ وعند ذلك يصبح شرحهم لما كان غامضاً في نهجي قاعدة متبعة". فهكذا كان أثر سحر ديراك ومرضه على إدينغتون [3].

في ذلك الجو المفعم الأفكار المشحونة بالفوضى، الذي كان فيه السؤال السائد في الفيزياء في 1928-1930 هو: هل حقاً إن معادلة ديراك صحيحة؟، استطاع كلاين-ونيشينا في سبتمبر من عام 1928 التوصل إلى تطوير للعلاقة التي تعطي المقطع العرضي لتشتت الكم الضوئي على الإلكترون:

$$\sigma = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right] + \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \left[ \frac{1}{2\alpha} \ln(1 + 2\alpha) - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right] \quad (4)$$

لقد كانت هذه العلاقة جديرة بالاهتمام والتدقيق لسببين: أولاً لقد تبين أنها صحيحة إلى حد كبير جداً، b. وثانياً أنها كانت تستند إلى نظرية ديراك المشكوك في صحتها، المنشورة في عام 1928، لكونها تحتوي حالات طاقة سالبة (المرض) [3].

وبعد وقت قصير من مقالة كلاين-ونيشينا، وجد أن علاقة كلاين-ونيشينا تتفق إلى حد كبير مع النتائج التجريبية المتعلقة بامتصاص أشعة اكس في المادة، ولذلك تم اعتبارها على أنها داعمًا إضافيًا لمعادلة ديراك. ولكن بقيت "الحالات السالبة" مرضاً أساسياً، وكانت تتسبب بمعاناة كبيرة للناس. ولقد علق أوبنهايمر Oppenheimer لاحقاً على آراء باولي التي كانت في حينها مرضاً قاتلاً إن "أي نظرية تكون مصابة بمرض كهذا، ويجب أن تكون منقذة فقط بالصدفة مع التجربة" [4].

ثم جاءت نظرية الثقوب لديراك Hole Theory of Dirac. فلقد قال ديراك: حسناً، هنالك العديد من الحالات السالبة، لكن بحر الحالات السالبة هذا يكون عادة مشغولاً بشكل تام. وبمجرد، أن يتخلق هنالك ثقب، فسيظهر لنا أن هنالك جسيماً مشحوناً إيجابياً. تلك هي نظرية الثقوب. فهو، اقترح الفكرة أولاً، في رسالة بعثها إلى نيلز بور Niels Bohr بتاريخ 26 نوفمبر 1929، ثم لاحقاً نشرها في علم 1930. إن هذه الفكرة الثورية لديراك قدمت نظرة جديدة ثاقبة عن تعقيد الخلاء. وهكذا بدأت نظرية الحقل الكمومي الحديثة في الكهرطيسية: التي ندعوها اليوم بالإلكتروديناميك الكمومي Quantum Electro-Dynamics (QED). وفي خطاب جرى في 1959 في برين ماور Bryn Mawr، تم مشابهة اقتراح ديراك الجريء لنظرية الثقوب بأول طرح للأرقام السالبة.

الآن، ماذا عن علاقة كلاين-ونيشينا في نظرية الثقوب الجديدة؟ التي قد تم توضيحها من قبل ديراك، وولر Waller بشكل مستقل، رغم أن علاقة كلاين-ونيشينا، قد تم استنتاجها بدون ذلك البحر اللامتناه للثقوب، إلا أنها كانت رغم ذلك صحيحة بشكل ساحر. وهكذا أصبحت علاقة كلاين-ونيشينا أول علاقة صحيحة من علاقات الإلكترونيديناميك الكمومي QED المكتشفة من قبل الفيزيائيين. فاتفقوا مع التجارب كان،

على سبيل المثال، قد قدمه رذرفورد في خطاب المجلس الرئاسي أمام الجمعية الملكية [4]. لكن يبقى الكلام ساري المفعول عليها بأنها سحر ومرض.

رغم ذلك، إن معظم النظريين لا يزالون يرفضون الاعتقاد بنظرية الثقوب، التي كانت فكرتها ثورية جداً. فلقد وقف باولي Pauli، وبور Bohr، ولاندو Landau، بيرليس Peierls جميعاً ضدها. ولقد سخروا من حالات الطاقة السالبة ولقبوها؛ أي الثقوب، "بالإلكترونات الحمار". لماذا هي "الإلكترونات حمار"؟ لأنه في حالات الطاقة السالبة، عندما نقوم بتطبيق قوة عليها، فإنه كلما زادت القوة المطبقة عليها، كلما زادت مقاومتها، وهذا السلوك شبيه بسلوك الحمير. ومما زاد في التشويش اقتراح ديراك الأصلي بأن البروتونات هي أيضاً بمثابة ثقوب. وقد عنون مقاله عام 1930 بـ "نظرية الإلكترونات والبروتونات" [5].

وفي وقت لاحق تم إنهاء هذا التشويش الخاص من خلال المقالات النظرية لأوبنهايمر Oppenheimer وتام Tamm وديراك Dirac، التي جميعها كانت في عام 1930. حيث إنهم جميعاً، في هذه المقالات، قد أثبتوا أن الثقب لا يمكن أن يكون بروتوناً، لأنه إذا ما كان بروتوناً، فإن الإلكترون سيقفز إليه، خلال زمن من رتبة  $10^{-10}$  ثانية، مما يعني أن ذرة الهيدروجين لن تكون مستقرة. فتوصلوا الاستنتاج مفاده أنه يجب أن يكون هنالك بحران، أحدهما للإلكترونات والآخر للبروتونات. وهكذا بحلول نهاية عام 1930 كان قد اكتمل العمل الرئيسي النظري في إطار QED. لكن أيضاً كان قد ظهر تشويشاً تجريبياً جديداً في عام 1930، مما أدى لتأخير قبول QED لسنتين أخريين.

ولقد أجريت تجربة امتصاص أشعة غاما من قبل عناصر ثقيلة. حيث إنه في وقت سابق، كان العمل بفوتونات ذات طاقات أخفض قد أدى لتوافق مع علاقة كلاين-ونيشينا. عندئذ، صارت أشعة غاما، التي تمتلك طاقة أعلى، متوفرة بطاقات حتى حوالي

2.6 MeV من منبع الثوريوم C. thorium. فبدأ الفيزيائيون بالتحقق من صلاحية علاقة كلاين-ونيشينا بواسطة أشعة غاما الجديدة. وفي مقالة لأندرسون C. D. Anderson نشرها في عام 1983 يذكرنا بالفترة ما بين عامي 1930-1932 يقول فيه: في ذلك الوقت، كان هنالك اعتقاد سائد بأن امتصاص الأشعة ذات "الطاقة العالية" من خلال تشتت كومبتون إنما يتم بشكل تام تقريباً، وأنه محكوم بعلاقة كلاين-ونيشينا. ولقد كان أندرسون حينها طالب دراسات عليا عند ميليكان Millikan، الذي كان قد كلف طالب دراسات عليا آخر، هو تشاو C. Y. Chao، بدراسة عملية الامتصاص هذه بواسطة العدادات من أجل معرفة فيما إذا كان تشتت أشعة غاما يتوافق مع علاقة كلاين-ونيشينا [4].

في تجربة بسيطة وجميلة، وجد تشاو Chao أنه من أجل الأهداف الثقيلة عند طاقة 2.6 MeV، يوجد هنالك امتصاص أكثر مما تنتبأ به علاقة كلاين-ونيشينا. وقد سمى ذلك بـ "الامتصاص الشاذ" "anomalous absorption". وعلاوة على ذلك، في تجربة ثانية وجد تشاو Chao ما سماه بـ "الأشعة المتشتتة الإضافية" "additional scattered rays" في التشتت.

لم يتم فهم هذه الاكتشافات من الناحية النظرية، وكان يعتقد أنها ظواهر نووية، لا علاقة لها QED. ومما زاد، للأسف، في التشويش أن مجموعتين تجريبيتين أخريين لم تتوافق نتائج تحقيقهما مع ما وجد تشاو. كما سنذكر أدناه، كانت نتائج التحقيق التي توصل إليها تشاو صحيحة في الواقع، و "الامتصاص الشاذ" و "الأشعة المتشتتة الإضافية" كانت فعلاً هي ظواهر QED أساسية تتطلبها نظرية الثقوب.

ولكن هذا الفهم لم يتحقق إلا بعد اكتشاف أندرسون في عام 1932، للبويزيترون من خلال صورة للحجرة الضاببية، التي تبين بوضوح صحة نظرية ثقوب. عندئذ، عاد الفيزيائيون إلى الورا إلى تجربة تشاو، فوجدوا أن: "الامتصاص الشاذ" ما هو إلا تشكل

أزواج، و"الأشعة المشتتة الإضافية" ما هي إلا فناء لهذه الأزواج. فكلا الظاهرتين أساسيتين في QED! ولذلك، فإنه بحلول عام 1932 كان العمل في إطاره النظري لـ QED قد اكتمل، وكان على توافق مع كافة التجارب [5].

رغم تقديرنا وثناءنا على ما قدمه الفيزيائيون السابقون، إلا أنه، كما أسلفنا، يبقى هكذا هو حال بالنسبة للفيزيائيين النظريين في كل زمان. حيث إننا نرى بأن المشكلة تكمن بأن مبدأ الارتياح التجريبي لهايزنبرغ ساري المفعول حتى على البشر. فهكذا نحن معاصر البشر لا نستطيع تقبل الغموض والتناقض، لكن إذا ما توضحا كشفنا لنا عن ثغرات كامنة جديرة بالاهتمام في تلك النظريات. والحق إن هذه الثغرات هي التي كانت تتسبب لنا بالوقوع في الريب، وهذا ما جعلنا ننطلق في محاولة استنتاج بطريق آخر من أجل الوصول إلى ما هو أفضل وأدق.

إن أحد المفاهيم الغامضة في نظرية كلاين-نيشينا هي أنهما، كغيرهم تصوروا، أن البحور الإلكترونية في المواد المختلفة كلها سواء. ونحن نرى أن البحور الإلكترونية للمواد المختلفة لها تراكيز مختلفة من مادة لأخرى. وهذا ما نتوقع أنه يمكن أن يتسبب بوجود تباين في المقاطع العرضية لتشتت الفوتونات عن الإلكترونات في مواد مختلفة. لذلك بهدف الوصول إلى قيم أدق وأصح للمقطع العرضي سوف نقوم باستنتاج نظري جديد بطريق احتمالي لعلاقة المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون آخذين بعين الاعتبار تأثير اختلاف تركيز الإلكترونات الحرة في المعادن والتحقق من ذلك تجريبياً.

##### 5. الدراسة النظرية: استنتاج المقطع العرضي لتشتت فوتون غاما عن إلكترون

لنفرض أن لدينا حزمة من فوتونات غاما تتحرك في وسط مادي معين (عينة-هدف)، ولنلتصور، من باب التبسيط، بأن الإلكترونات في هذا الوسط هي كريات متماثلة تتوزع بشكل منتظم في الوسط. وأن نصف-قطر الكرية منها هو من نفس نصف-القطر الجغرافي للإلكترون.

عند قذف العينة-الهدف بحزمة من فوتونات غاما، يمكننا النظر إلى عمليات التأثير المتبادل مع الإلكترونات كحوادث عشوائية؛ بمعنى أنه لا يمكننا التنبؤ متى وأين ستحصل تلك التأثيرات المتبادلة، لكن يمكننا الحديث فقط عن احتمال أن يعاني أو احتمال أن لا يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً. وأن كل ما هو معروف لدينا، من التجربة عن التأثير المتبادل هذا، هو أن احتمال أن يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً في أثناء عبوره خلال العينة الهدف هو تابع ما لسماكة العينة  $x$ ؛ أي:  $P = P(x)$ . وأن احتمال أن يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً في أثناء عبوره سماكةً جزئية قدرها  $dx$  في وسط ما يتناسب فقط مع قيمة السماكة الجزئية هذه  $dx$ ، فكلما كانت السماكة الجزئية  $dx$  أكبر كان الاحتمال الجزئي هذا  $dP$  أكبر؛ أي أن  $dP \propto dx$ ، وبالتالي يمكننا أن نكتب:

$$dP = a dx \quad (1.5)$$

حيث  $a$  هو ثابت تناسب، نسميه بالمقطع الفعال الماكروسكوبي للتأثير المتبادل للفوتون مع الإلكترون. وهو يمثل احتمال أن يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً خلال وحدة المسار للوسط الذي يعبره، من الواضح أن هذا الثابت **يتعلق بطبيعة الوسط**، وبالتحديد يتعلق بعدد الإلكترونات في وحدة المسار من الوسط.

لنرمز لاحتمال أن لا يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً في أثناء عبوره مسافة قدرها  $x$  في الوسط بـ  $P(x)$ . وحتى نتمكن من إيجاد هذا التابع علينا أن نتذكر بأن احتمال أن يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً عند عبوره جزءاً من الطريق قدره  $dx$  هو  $adx$ . وبالتالي، فإن احتمال أن لا يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً في أثناء عبوره نفس الجزء من الطريق  $dx$  سيكون:  $1 - adx$ . وبالتالي، فإن أن احتمال أن لا يعاني فوتون تأثيراً متبادلاً في أثناء عبوره مسافة قدرها  $x + dx$ ؛ أي  $P(x + dx)$ ، سيكون احتمالاً مركباً من جداء احتمالين مستقلين، الأول هو احتمال أن لا يعاني فوتون غاما تأثيراً

متبادلاً خلال الطريق  $x$ ، والثاني هو احتمال أن لا يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً خلال الطريق  $dx$ ؛ أي أن:

$$P(x + dx) = P(x)(1 - adx) \quad (2.5)$$

لكن، من ناحية ثانية، بما أن التابع  $P(x + dx)$  هو تابع مستمر، فإنه يمكننا نشره في سلسلة تايلور. وإذا ما توقفنا في النشر عند الحد ذي المشتق الأول بالنسبة لـ  $dx$ ، فإننا سنحصل على:

$$P(x + dx) = P(x) + \frac{dP(x)}{dx} dx + \dots \quad (3.5)$$

وبالمساواة بين (2.5) و (3.5)، طبعاً مع إهمال الحدود غير المكتوبة لصغرها،

نجد:

$$P(x) + \frac{dP(x)}{dx} dx \cong P(x)(1 - adx)$$

وبالاختصار نحصل على المعادلة التفاضلية التالية:

$$\frac{dP(x)}{dx} \cong -aP(x) \quad (4.5)$$

إن حل المعادلة التفاضلية (4.5) له الشكل:

$$P(x) = Ce^{-ax} \quad (5.5)$$

حيث  $C$  هو ثابت التكامل، الذي يمكن تعيينه من شروط البدء؛ فعندما  $x = 0$ ، فإن  $C = f(0)$ ؛ أي أن ثابت التكامل يمثل احتمال أن لا يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً عندما تكون المسافة المجتازة صفراً. بالحقيقة إن هذا الاحتمال سيكون هو الاحتمال الأكيد؛ أي  $C = f(0) = 1$ ، وبالتالي فإن:

$$P(x) = e^{-ax} \quad (6.5)$$

وبما أن المقطع الفعال الماكروسكوبي  $a$  يمثل احتمال أن يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً خلال وحدة المسار في أثناء عبوره للوسط المادي، فإن المقدار  $ax$  سيمثل احتمال أن يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً خلال سماكة قدرها  $x$  من الوسط.

ليبان مدلول تسمية  $a$  بالمقطع الفعال الماكروسكوبي، نفرض أن فوتون غاما واحد يرد بشكل عمودي على قاعدة أسطوانة مساحتها  $1 \text{ cm}^2$  وارتفاعها  $1 \text{ cm}$ . حيث نتصور أن الإلكترونات فيه على هيئة كريات متماثلة لها مقاطع عرضية متساوية، مساحة مقطع كل منها تساوي مساحة مسقط الكرة  $\sigma$  على سطح قاعدة الأسطوانة. وأن التأثير المتبادل بين فوتون غاما والإلكترون هو تصادم ميكانيكي.

عندئذ، فإن احتمال أن يعاني فوتون غاما في أثناء عبوره الأسطوانة تأثيراً متبادلاً سيكون مساوياً إلى نسبة مساحة مساقط الكريات على القاعدة مقسوماً على مساحة القاعدة. وبفرض أن  $n$  هو عدد الإلكترونات في الأسطوانة المذكورة؛ أي عدد الإلكترونات في وحدة الحجم، عندئذ، تكون مساحة المساقط هي  $n\sigma \text{ cm}^2$ . أما مساحة الورود فستكون هي مساحة قاعدة الأسطوانة التي ترد إليها الفوتونات؛ أي  $1 \text{ cm}^2$ . وبالتالي، فإن احتمال أن يعاني فوتون غاما تأثيراً متبادلاً في أثناء عبوره للأسطوانة؛ أي احتمال أن يعاني تأثيراً متبادلاً خلال وحدة المسار ( $1 \text{ cm}$  ارتفاع الأسطوانة)، سيكون:

$$a = n \sigma \frac{\text{collisions}}{\text{cm}} \quad (7.5)$$

لاحظ أن وحدة  $a$  هي تصادم في  $1 \text{ cm}$ ؛ أي تصادم في وحدة المسار.

نسمي المقدار  $\sigma$  بالمقطع الفعال الميكروسكوبي أو المقطع العرضي الفعال للتشتت، الذي له أبعاد مساحة، وهذه المساحة تقدر عادة بـ البارن، الذي يكافئ  $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ . من هنا بالتحديد تأتي تسمية  $a$  مقطوعاً فعالاً ماكروسكوبياً، وذلك لأنه يمثل المقطع الفعال الميكروسكوبي  $\sigma$  مضروباً بعدد الإلكترونات  $n$ ، الذي

هو نفس عدد الإلكترونات في وحدة الحجم. وبما أن الإلكترونات في المادة، بصورة عامة، إما أن تكون مرتبطة بالذرة أو أن تكون غير مرتبطة. وأن غير المرتبطة منها هي التي تشكل ما يسمى الغاز الإلكتروني في المعدن. وأن عملية تشتت الفوتونات تحصل على كافة الإلكترونات لكنها تحصل بشكل أكبر بكثير على الإلكترونات غير المرتبطة. وأن الفوتونات المنتشرة كافة تجريبياً تُسجل في هضبة كومبتون لطيف غاما.

بتعويض العلاقة (7.5) في العلاقة (6.5) نحصل على:

$$P(x) = e^{-n\sigma x} \quad (8.5)$$

ومن أجل حزمة من فوتونات غاما ذات تدفق  $\Phi(0)$  (عدد الفوتونات التي تسقط على وحدة المساحة؛  $1 \text{ cm}^2$ ، خلال وحدة الزمن  $1 \text{ s}$ )، التي ترد على عينة مساحة قاعدتها  $1 \text{ cm}^2$  وسماكتها  $x$ ، فإن جزءاً من الفوتونات تتصادم مع الإلكترونات، وبالتالي سيجتاز السماكة  $x$  عبر وحدة المساحة  $1 \text{ cm}^2$  تدفقاً قدره  $\Phi(x)$  أقل من  $\Phi(0)$ . إن  $\Phi(x)$  يمثل عدد الفوتونات التي اجتازت السماكة  $x$  عبر وحدة المساحة  $1 \text{ cm}^2$  خلال وحدة الزمن  $1 \text{ s}$ ؛ أي عدد الفوتونات التي لم تعاني أي تصادم. وبالتالي فإن احتمال أن لا يعاني فوتون غاما تشتتاً سيكون مساوياً إلى نسبة عدد الفوتونات التي لم تشتتت  $\Phi(x)$  إلى عدد الفوتونات الساقطة  $\Phi(0)$ ، وذلك عندما تنتهي قيمة عدد الفوتونات الساقطة  $\Phi(0)$  إلى قيمة لا نهائية. لكن تجريبياً نكتفي بأن يكون التدفق الوارد  $\Phi(0)$  كبير نسبياً. وبالتالي فإن:

$$P(x) = \frac{\Phi(x)}{\Phi(0)} \quad (9.5)$$

بالمساواة بين (9.5) و (8.5) ينتج:

$$\Phi(x) = \Phi(0)e^{-n\sigma x} \quad (10.5)$$

وبالتالي، فإن المقطع الفعال الماكروسكوبي للتشتت:

$$\sigma = -\frac{1}{nx} \ln \frac{\Phi(x)}{\Phi(0)} \quad (11.5)$$

وبتعيين عدد الفوتونات العابرة  $\Phi(x)$  عدد الفوتونات الساقطة  $\Phi(0)$  والسماكة  $x$  والتركيز  $n$ ؛ أي عدد الإلكترونات في وحدة الحجم، يمكننا تعيين المقطع الفعال الميكروسكوبي للتشتت  $\sigma$ . لاحظ أن المقطع العرضي يتعلق بتركيز الإلكترونات بالعينة. وبالتالي، بالعدد الذري.

## 6. الدراسة التجريبية

### 1.6. الأجهزة

هي مطياف غاما بكاشف وميضي بلوري  $\text{NaI(Tl)}$  ويتألف من:

1. منبع مشع السيزيوم  $^{137}\text{Cs}$  يصدر أشعة غاما أحادية الطاقة  $\sim 0.662 \text{ MeV}$ .

2. كاشف وميضي بلوري لأشعة غاما مكوّن من وماغ بلوري  $\text{NaI(Tl)}$ ، وأنبوبة مضاعف ضوئي من النمط ( CRISMATEC, TYPE 6 S8/2A, ) مع مقسم جهد. (PM 9266 B)

3. مغذية استطاعة بجهود عالية مقسم الجهد من النمط ( Phywe 600-1100 ) مناسبة لتشغيل أنبوبة المضاعف الضوئي (V, 0.5 mA) الخاصة بالكاشف (CRISMATEC, TYPE 6 S8/2A, PM 9266 B) الوميضي البلوري  $\text{NaI(Tl)}$ .

4. محلل ارتفاع نبضة Pulse Height Analyzer يتكون من مضخم ومحلل وحيد القناة ذو ماسح.

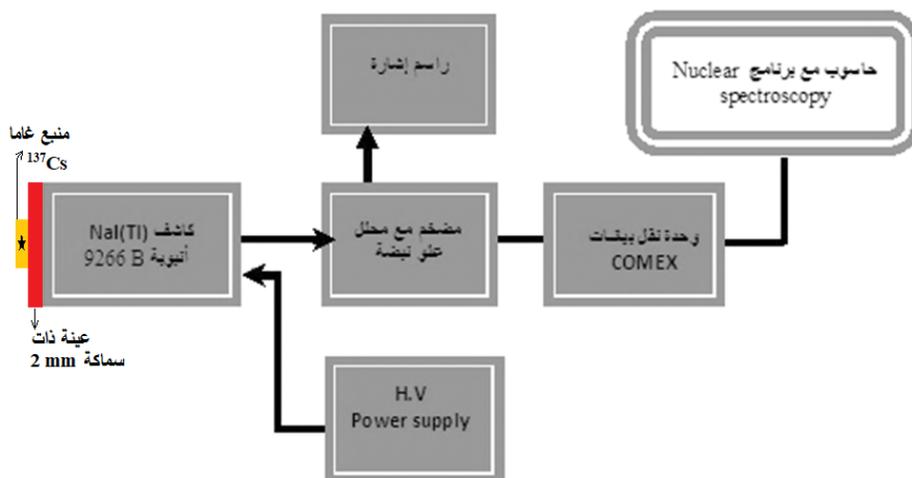
5. حاسوب شخصي، وبرنامج لترقيم الطيوف ومعالجتها ( Nuclear Spectroscopy).

6. وحدة نقل تبادلي للبيانات COMEX من وإلى الحاسوب.

7. راسم إشارة (KENWOOD, 20MHz, Cs 4025).

8. عينات مختلفة

يبين الشكل (1) مخطط صندوقي لمطياف غاما مع المنبع وأحد العينات.



الشكل (1): مطياف غاما بكاشف وميضي بلوري NaI(Tl) مع منبع وعينة.

## 2.6. الإجراءات التجريبية

من أجل دراسة هضبة كومبتون في طيف غاما من أجل عينات معدنية مختلفة لها نفس السماكة، نقوم بتثبيت كافة بارامترات مطياف غاما المستخدم، ومن أجل ذلك نقوم بما يلي:

نضع منبع  $^{127}\text{Cs}$  (0.662 MeV) على المحور المار من مركز الواجهة الأمامية لكاشف NaI(Tl) الأسطواني، ونظراً لضعف الشدة الإشعاعية للمنبع نضعه تقريباً عند مركز الواجهة الأمامية للكاشف. ونجعله عند نفس الموضع من أجل كافة العينات ومن أجل كافة القياسات.

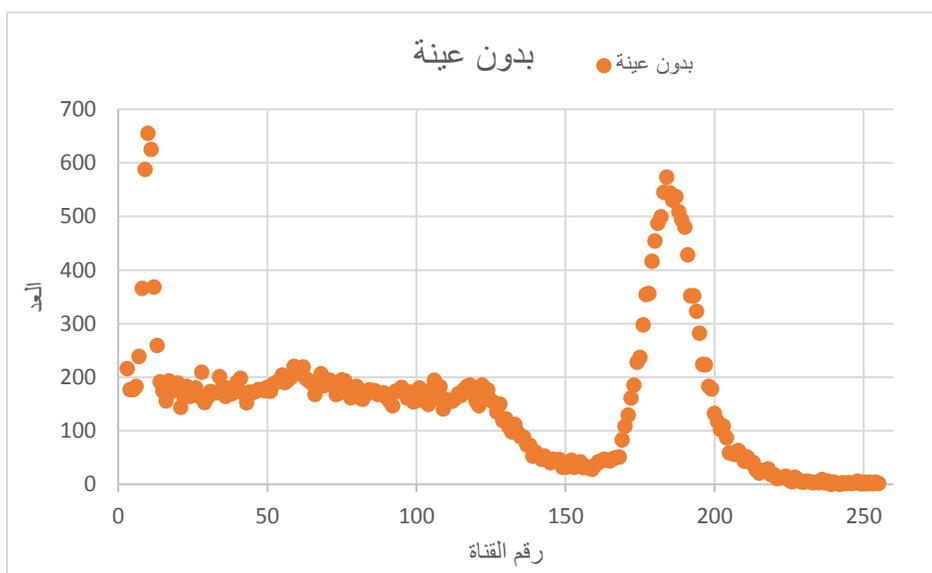
وعلى واجهة محلل علو (ارتفاع) النبضة نضع نافذة محلل علو النبضة عند عرض نافذة ثابت قدره  $100 \text{ mV}$ ، ونضع قاعدة المحلل (مجال تحليل) على  $10 \text{ V}$ ، ونبقيها ثابتة كما هي أيضاً من أجل كافة القياسات. وهذا يعني أن عرض مجال محور القنوات بالفولط سيكون  $1000 \text{ mV}$ ، وهو يتألف من 256 قناة (تدرجة)؛ وهو عدد الخطوات التي تتزاح بها نافذة محلل علو النبضة). وبناء عليه، فإنه خطوة الإزاحة في أثناء عملية مسح المجال التحليل ستكون:  $39 \text{ mV} \cong \frac{10000 \text{ mV}}{256} = 39.0625$ ؛ أي أنه حتى يتم مسح كامل مجال محور القنوات من المفترض أن نجعل عرض النافذة مساوياً لـ  $39 \text{ mV}$ ، لكن واقعياً إن أصغر قيمة لعرض النافذة يتيحها محلل علو النبضة هي  $100 \text{ mV}$ . ولذلك، عند الإزاحة الخطوية سيكون هنالك بين كل خطوة (قناة) والتي سبقتها تقاطع قدره  $61 \text{ mV} = 100 - 39$ ، وهذا يعني أن مقدار عدد النبضات المسجل في كل قناة سيكون أكبر من العدد الحقيقي بحوالي 61%. أي أن عدد فوتونات غاما المكتشف والمسجل كعدد نبضات جهد في كل قناة من الطيف سيكون أكبر من عدد فوتونات غاما الحقيقي الداخلة إلى الكاشف بـ 61%. لذلك يجب إجراء تصحيح للعدد المسجل بمقدار 61%.

ومن البرنامج المستخدم "المطيافية النووية" نختار خطوة المسح (إزاحة النافذة) بواسطة التعليمات "زيادة Increment" بحيث تكون مساوية لـ 1؛ وهذا يعني أن عملية الانزياح تتم خطوة خطوة (قناة قناة). ومنه أيضاً نختار زمناً للقياس (زماً لترسيم الطيف) قدره  $(5 \text{ sec/ch})$ ؛ أي خمس ثوان لكل قناة. ونبقي هذين الخيارين ثابتين من أجل كافة القياسات. **ملاحظة:** لقد لاحظنا بالتجربة أن زمن قياس مختار من البرنامج قدره  $5 \text{ sec/ch}$  يكافئ زمناً حقيقياً قدره  $8.2 \text{ sec/ch}$ .

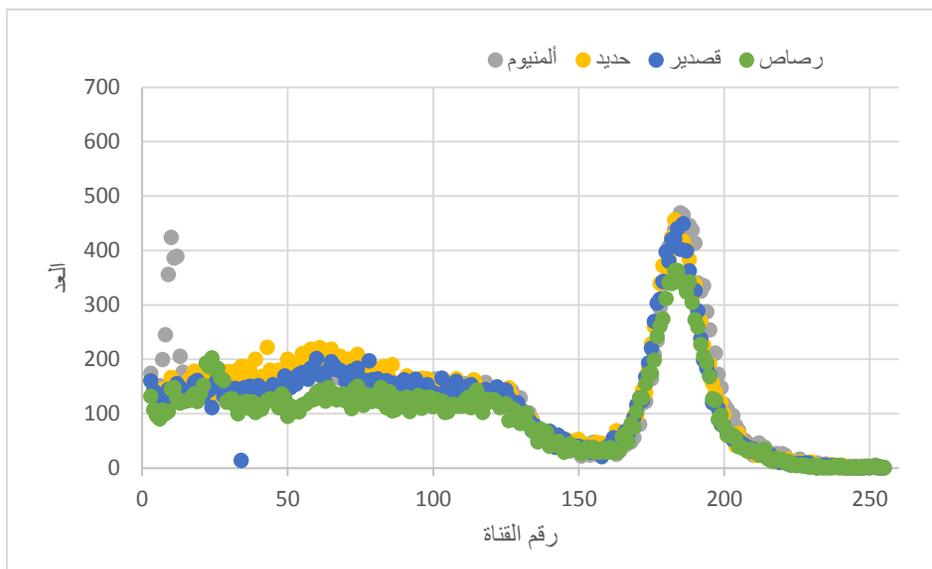
### 3.6. النتائج والحسابات

يبين **الشكل (2)** طيف غاما لمنبع السيزيوم 137 بدون وجود عينة بعد أن حذفنا منه طيف الضجيج الإلكتروني والإشعاع الكوني.

ويبين **الشكل (3)** طيوف غاما لمنبع السيزيوم 137 بوجود أربع عينات مختلفة متماثلة الشكل؛ صفائح لها نفس السماكة 2 mm، وهي من الألمنيوم، والحديد، والقصدير، والرصاص، أيضاً بعد أن حذفنا منها طيف الضجيج الإلكتروني والإشعاع الكوني.

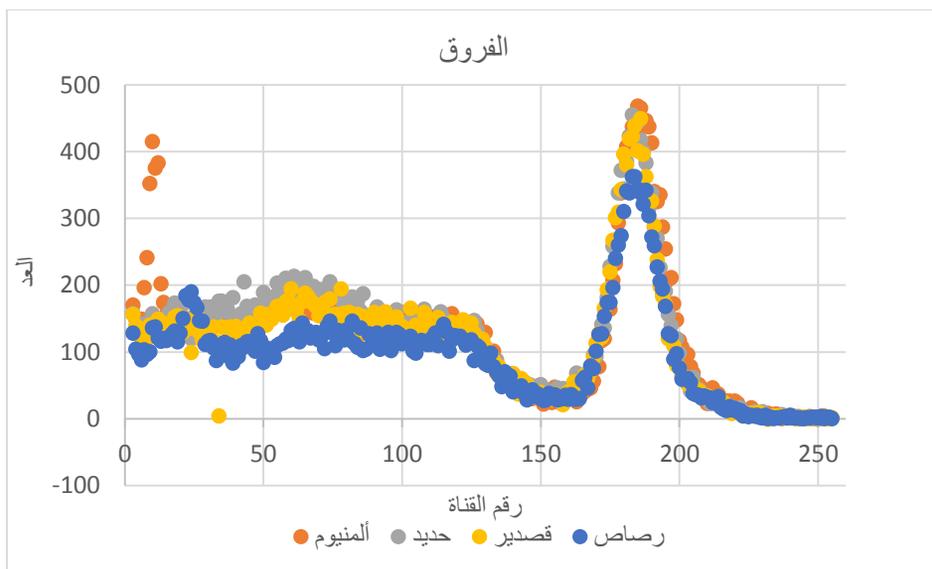


**الشكل (2):** طيف غاما لمنبع السيزيوم 137 بدون وجود عينة بعد أن حذفنا منه طيف الضجيج الإلكتروني والإشعاع الكوني.



**الشكل (3):** طيفو غاما لمنبع السيزيوم 137 بوجود أربع عينات مختلفة هي الألمنيوم، والحديد، والقصدير، والرصاص، بعد أن حذفنا منها طيف الضجيج الإلكتروني والإشعاع الكوني.

ويبين **الشكل (4)** طيفو الفروق بين طيف منبع السيزيوم 137 بدون وجود عينة من طيفو منبع السيزيوم بوجود العينات الأربع المختلفة التي هي الألمنيوم، والحديد، والقصدير، والرصاص.



**الشكل (4):** طيوف أربع تمثل الفروق بين طيف السيزيوم 137 بدون وجود عينة من طيوف السيزيوم بوجود العينات الأربعة المختلفة التي هي الألمنيوم، والحديد، والقصدير، والرصاص.

إن العد في كل طيف من طيوف الفروق في **الشكل (4)** يمثل عدد نبضات الجهد المسجلة المتناسبة مع عدد فوتونات غاما العابرة من العينة خلال زمن القياس. وإن فوتونات غاما العابرة من العينة هي إما فوتونات غاما التي كانت قد عبرت من دون أن تعاني تشتتاً في العينة أو التي كانت قد عبرت العينة بعد أن عانت تشتتاً في العينة. وأن العدد الحقيقي لنبضات غاما المسجل في هضبة كومبتون يمثل عدد فوتونات غاما المكتشفة التي كانت قد عبرت العينة والغلاف الواقي لبلورة الكاشف بعد أن عانت تشتتاً في العينة فقط خلال زمن القياس. يبين العمود الأخير في **الجدول (1)** أدناه عدد فوتونات غاما الحقيقي المسجل في هضبة كومبتون خلال زمن القياس من أجل العينات الأربعة.

### تصحيح تأثير تقاطع موضع النافذة مع الموضع التالي لها عند انزياحها على

**عدد النبضات المسجلة:** إن نبضات الجهد الناتجة عن الكاشف التي تمتلك علواً قدره  $\Delta V$  تسجل في القناة رقم 1، أما التي تمتلك علواً قدره  $n\Delta V$  فتسجل في القناة رقم  $n$ ، حيث إن الرقم  $n$  عدد صحيح يأخذ القيم  $n = 1, 2, \dots, 256$ . وإن مجال القياس بالميلي-فولط هو  $10000 \text{ mV}$  يتم مسحة بـ 256 خطوة (تدرج)؛ أي يتم انزياح نافذة محلل علو النبضة بـ 256 خطوة. وكل خطوة تمثل قناة. وبالتالي، فإن عرض القناة الحقيقي  $\Delta V$  أو مقدار الازاحة الفعلي للنافذة سيكون:

$$\Delta V = \frac{10000 \text{ mV}}{256} = 39.0625 \text{ mV}$$

ولكن بما أن أصغر نافذة تمر عبرها نبضات الجهد متوفرة في محلل علو النبضة قدرها  $100 \text{ mV}$ ، لذلك، فإنه إذا رمزنا بـ  $N'_1$  لعدد النبضات المسجلة في القناة، و بـ  $N_1$  لعدد النبضات الحقيقي في القناة، يكون من أجل نافذة قدرها  $100 \text{ mV}$  لدينا عدداً من النبضات المسجلة قدره  $N'_1$ ، وبالتالي ومن أجل نافذة قدرها  $39.0625 \text{ mV}$  يكون عدد النبضات الحقيقي المسجل:

$$N_1 = \frac{39.0625}{100} N'_1$$

إن كل فوتون يتم اكتشافه من قبل الكاشف يعطي نبضة جهد إلى محلل علو النبضة. وبالتالي، فإن العدد الحقيقي للنبضات المسجلة في قناة ما يساوي **عدد فوتونات غاما المكتشفة** التي تحمل طاقة موافقة لرقم تلك القناة، حيث إن رقم القناة يتناسب مع علو النبضة، وأن علو النبضة يتناسب مع طاقة فوتون غاما المودعة في الكاشف. وبالتالي، فإن عدد النبضات الحقيقي المسجل في هضبة كومبتون يساوي لعدد فوتونات غاما المكتشفة الناتجة عن التشتت في العينة (إذا ما استثنينا فوتونات غاما الناتجة عن التشتت الخلفي في العينة وغيرها وفوتونات أشعة اكس الناتجة عن التحول الداخلي اللتان

تسجلان أيضاً ضمن نفس مجال هضبة كومبتون). إن فوتونات غاما المكتشفة هذه تنتج عن تشتت كومبتون في العينة، طبعاً بعد أن جرى عليها توهين في مادة الغلاف الواقي لبلورة الكاشف الذي هو من الألمنيوم بسماكة 0.4 mm. يبين الجدول (1) العدد الحقيقي للنبضات المسجلة في هضاب كومبتون  $N'$  المبينة في الشكل (3) خلال زمن القياس. كما يبين عدد فوتونات غاما الحقيقي الناتج عن تشتتات كومبتون  $N$  المكتشفة من قبل الكاشف خلال زمن القياس. ويبين الجدول (2) العدد الحقيقي للنبضات المسجلة في كامل الطيف بدون عينة المبين في الشكل (2) وعدد فوتونات غاما الحقيقي المكتشفة من قبل الكاشف خلال زمن القياس.

**الجدول (1):** العدد الحقيقي للنبضات المسجلة في هضبة كومبتون خلال زمن القياس  $N'$ ، وعدد فوتونات غاما الحقيقي الناتج عن تشتت كومبتون  $N$  في العينة خلال زمن القياس والمكتشفة من قبل الكاشف خلال زمن القياس، والعدد الحقيقي لفوتونات غاما المكتشفة وهي تنتج عن تشتت كومبتون في العينة خلال وحدة الزمن (ثانية) لكن بعد أن تتوهن قليلاً عند عبورها للغلاف الواقي لبلورة الكاشف.

العينة	العدد الحقيقي للنبضات المسجلة في هضبة كومبتون خلال زمن القياس $N'$	عدد فوتونات غاما الحقيقي المكتشفة خلال زمن القياس $N$	العدد الحقيقي لفوتونات غاما المكتشفة خلال ثانية $I'(x)$
ألومنيوم	21268	8294.52	1011.52
حديد	21416	8365.62	1020.19
قصدير	19296	7525.44	917.70
رصاص	16238	6332.82	772.29

**الجدول (2):** العدد الحقيقي للنبضات المسجلة في كامل الطيف بدون عينة وعدد فوتونات غاما الحقيقي المكتشفة من قبل الكاشف خلال زمن القياس، وعدد فوتونات غاما الحقيقي المكتشفة في الثانية الواحدة.

منبع السيزيوم 137	العدد الحقيقي للنبضات المسجلة في كامل الطيف	عدد فوتونات غاما الحقيقي المكتشفة	عدد فوتونات غاما الحقيقي المكتشفة في الثانية الواحدة $N''$
عدد النبضات في الطيف بدون عينة	38323	14969.92	1825.60

**حساب المقاطع العرضية للتشتت تجريبياً:** كما نوهنا يمكننا حساب المقاطع العرضية لتشتت فوتونات غاما على الإلكترونات في المعادن المدروسة باستخدام العلاقة (11.5) التي استنتجناها لهذا الغرض. ومن أجل عمل ذلك يجب حساب المقادير الفيزيائية الموجودة في هذه العلاقة:

**أولاً** إن المقدار  $x$  يمثل سماكة العينة، التي هي نفسها  $x = 0.02$  cm من أجل كافة العينات. لكن بما أن إشعاع غاما لا يمر في العينة بصورة متوازية، فإنه يمكن حساب السماكة الوسطى للعينة التي تعبر خلالها فوتونات غاما كما يلي: إن أصغر مسافة تجتاها فوتونات غاما خلال العينة هي  $x_{\min} = 2$  mm وأكبر مسافة تجتاها فوتونات غاما عبر العينة هي  $x_{\max} = 12.658$  mm، انظر **الشكل (7)(b)**.

وبالتالي، فإن السماكة الوسطى التي تعبرها الفوتونات خلال العينة تكون:

$$\bar{x} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} = 7.3 \text{ mm} = 0.73 \text{ cm}$$

**ثانياً** إن المقدار  $n$  يمثل تركيز الإلكترونات (عدد الإلكترونات في وحدة الحجم) وهو يمثل تركيز الذرات (عدد الذرات في وحدة الحجم) للعنصر الكيميائي  $n_a$  مضروباً بعدد الإلكترونات في ذرة هذا العنصر؛ أي  $n = Zn_a$ ، حيث  $Z$  هو العدد الذري. وبما أن تركيز الذرات يعطى بالعلاقة:

$$n_a = \frac{N_A}{M} \rho \quad (12)$$

حيث  $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ atoms} \cdot \text{mol}^{-1}$  هو عدد أفوكارو، و  $M$  هي الكتلة المولية للعنصر، و  $\rho$  هي الكثافة أو كتلة وحدة الحجم للعنصر. فإن تركيز الإلكترونات يعطى بالعلاقة:

$$n = Zn_a = Z \frac{N_A}{M} \rho \quad (13)$$

بتطبيق العلاقة (12) و (13) يمكن تركيز الذرات وتركيز الإلكترونات في

العينات المدروسة، وهي مبينة في **الجدول (3)**.

**الجدول (3):** تركيز الذرات وتركيز الإلكترونات في العينات المدروسة.

تركيز الإلكترونات $n \text{ electrons} \cdot \text{cm}^{-3}$	تركيز الذرات $n_a \text{ atoms} \cdot \text{cm}^{-3}$	الكثافة $\rho \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	الكتلة المولية $M \text{ g/mol [6]}$	العينة العدد الذري $Z$
$7.826 \times 10^{23}$	$0.602 \times 10^{23}$	2.7	26.982	ألمنيوم 13
$22.022 \times 10^{23}$	$0.847 \times 10^{23}$	7.86	55.845	حديد 26
$18.450 \times 10^{23}$	$0.369 \times 10^{23}$	7.29	118.71	قصدير 50 أبيض
$26.978 \times 10^{23}$	$0.329 \times 10^{23}$	11.34	207.2	رصاص 82

**ثالثاً:** إن النسبة  $\Phi(x)/\Phi(0)$  تمثل نسبة تدفق فوتونات غاما الساقطة على

العينة إلى فوتونات غاما العابرة أو النافذة من العينة. وهي، من أجل حزمة فوتونات

غاما متوازية، تكافئ نسبة الشدة الإشعاعية الساقطة على العينة إلى الشدة الإشعاعية النافذة من عينة سماكتها  $x$ ؛ أي:

$$\frac{\Phi(x)}{\Phi(0)} = \frac{I(x)}{I(0)} \quad (14)$$

حيث  $I(0)$  الشدة الإشعاعية الساقطة على العينة، و  $I(x)$  الشدة الإشعاعية العابرة من عينة سماكتها  $x$ .

**حساب الشدة الإشعاعية العابرة من أي عينة  $I(x)$ :** يمكن حساب عدد الفوتونات العابرة من العينة في وحدة الزمن  $I(x)$  من العدد الحقيقي لفوتونات غاما الداخلة إلى بلورة الكاشف بالثانية  $I''(x)$  المبينة في **الجدول (1)**. حيث إن الفوتونات العابرة من العينة تتوهن خلال الجدار الواقي لبلورة الكاشف وفقاً للعلاقة (15) أدناه ثم تكتشف في بلورة الكاشف.

$$I(x) = I''(x)e^{\mu x} \quad (15)$$

حيث  $x = 0.04 \text{ cm}$  هي سماكة الغلاف الواقي لبلورة الكاشف، الذي هو من الألمنيوم، الذي معامل الامتصاص له هو  $\mu = 0.20979 \text{ cm}^{-1}$ . إن عدد الحقيقي لفوتونات غاما الداخلة إلى الكاشف بالثانية  $I''(x)$  يمثل العدد الحقيقي لفوتونات غاما المكتشفة خلال ثانية  $I'(x)$  مقسوماً على مردود الكشف  $\eta$ . وإن مردود الكشف يعرف بأنه نسبة عدد النبضات الحقيقية المسجلة في وحدة الزمن بواسطة الكاشف  $N''$  (أو عدد الحقيقي لفوتونات غاما المكتشفة في وحدة الزمن  $I'(x)$ ) إلى العدد الحقيقي لفوتونات غاما الداخلة إلى الكاشف في وحدة الزمن  $I''(x)$ :

$$\eta = \frac{I'(x)}{I''(x)} \quad (16)$$

من أجل حساب مردود الكشف يجب أن نحسب عدد الفوتونات التي تدخل إلى بلورة الكاشف في وحدة الزمن (وهي نفس الشدة الإشعاعية العابرة للغلاف الواقي لبلورة الكاشف) في حال عدم وجود عينة، وهو مبين في **الجدول (4)**.

**الجدول (4):** الشدة الإشعاعية العابرة للغلاف الواقي لبلورة الكاشف 0.04 cm (عدد الفوتونات الداخلة للكاشف في وحدة الزمن) في حال عدم وجود عينة.

المادة	معامل الامتصاص للألمنيوم $\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	الشدة الإشعاعية العابرة لحامل المنبع	الشدة الإشعاعية العابرة للغلاف الواقي الكاشف (عدد الفوتونات الداخلة للكاشف في وحدة الزمن)
غلاف واقي من ألمنيوم	0.20979	5975.83	5925.89

ويتطبيق العلاقة (16) من أجل طيف السيزيوم 137 المحصول عليه بدون عينة، نجد أن مردود الكشف يكون:

$$\eta = \frac{1825.60}{5925.89} = 0.308$$

يبين **الجدول (5)** الشدة الإشعاعية التي تعبر حامل المنبع وتسقط على العينة أو تسقط على الواجهة الأمامية الغلاف الواقي لبلورة الكاشف في حال عدم وجود عينة.

**الجدول (5):** الشدة الإشعاعية التي تعبر حامل المنبع (البكسيكلاس Plexiglass) أو التي تسقط على العينة أو تسقط على الواجهة الأمامية الغلاف الواقي لبلورة الكاشف في حال عدم وجود عينة.

المادة	معامل الامتصاص الكتلي $\mu_m$ (g. cm <sup>-2</sup> )	الكثافة $\rho$ (g. cm <sup>-3</sup> )	معامل الامتصاص الخطي $\mu$ (cm <sup>-1</sup> )	الشدة الإشعاعية للفوتونات التي تعبر حامل المنبع أو الساقطة على العينة $I(0)$ photons · s <sup>-1</sup>
البكسيكلاس	0.83	1.18	0.09794	5975.83

ويبين **الجدول (6)** نتائج حساب  $I(x)$  باستخدام العلاقة (15).

**الجدول (6):** الشدة الإشعاعية العابرة من العينة  $I(x)$ .

العينة	العدد الحقيقي لفوتونات غاما المكتشفة خلال ثانية $I'(x)$	العدد الحقيقي لفوتونات غاما الداخلة إلى الكاشف بالثانية $I''(x)$	حساب الشدة الإشعاعية العابرة من العينة $I(x)$
ألنيوم	1011.52	3284.09	3311.67
حديد	1020.19	3312.30	3340.12
قصدير	917.70	2977.54	3002.55
رصاص	772.29	2507.43	2527.48

يمكن حساب الشدة الإشعاعية الساقطة على العينة  $I(0)$  كما يلي: لنرمز بـ  $A(t)$  لنشاط المنبع عند لحظة إجراء التجربة  $t$  (تاريخ القياس 2020/10/27)، و  $t$  تمثل المدة الزمنية من لحظة تحضير المنبع (10/1/1982) حتى لحظة إجراء التجربة. إن نشاط المنبع عند لحظة تحضير المنبع هو  $A(0) = 37 \text{ kBq}$ ، وبالتالي فإن:

$$t = 1224325800 \text{ s}$$

إن نشاط المنبع عند لحظة إجراء التجربة  $t$  يعطى بالعلاقة:

$$A(t) = A(0)e^{-\lambda t} \quad (17)$$

حيث  $\lambda = 7.27 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$  هو ثابت التفكك الإشعاعي للمنبع المشع

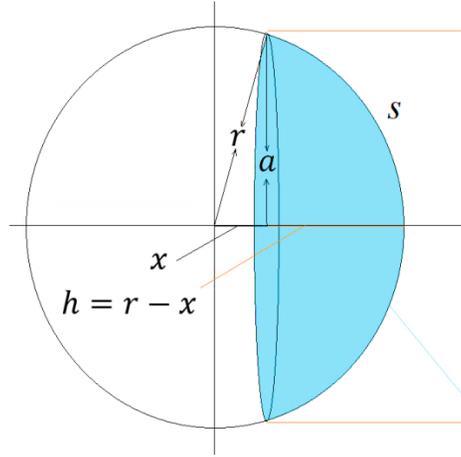
(السيزيوم 137). وبالتعويض في (17) نجد:

$$A(t) = 37 \times e^{-7.27 \times 10^{-10} \times 1224325800} = 15.19 \text{ kBq}$$

إن النشاط  $A(t) = 15.19 \text{ kBq}$  هو عدد فوتونات غاما الصادرة من منبع السيزيوم 137 في الثانية الواحد، وهذه الفوتونات تنتشر في كافة الاتجاهات ضمن زاوية مجسمة قدرها  $4\pi$ ، ويسقط منها على الكاشف فقط ذلك الجزء الذي يقع ضمن زاوية مجسمة  $\Omega$ . لنرمز لذلك الجزء من النشاط الذي يقع ضمن الزاوية المجسمة  $\Omega$  بـ  $I'(t)$  (الشدة الإشعاعية المتجهة نحو الكاشف). عندئذ، فإن:

$$I'(t) = \frac{\Omega}{4\pi} A(t) \quad (18)$$

في هذه العلاقة لدينا مجهول واحد هو الزاوية المجسمة  $\Omega$ . يمكن حساب الزاوية المجسمة  $\Omega$  من التناسب التالي؛ إن زاوية مجسمة  $4\pi$  تقابل سطح كرة مساحته  $4\pi r^2$ ، حيث  $r$  نصف قطر الكرة وهو يمثل بعد المنبع عن حافة الكاشف، انظر الشكلين (5) و (6). وإن الزاوية المجسمة  $\Omega$  تقابل سطح قبة كروية  $s = \pi(a^2 + h^2)$  نصف قطرها  $r$ ، انظر الشكل (5).

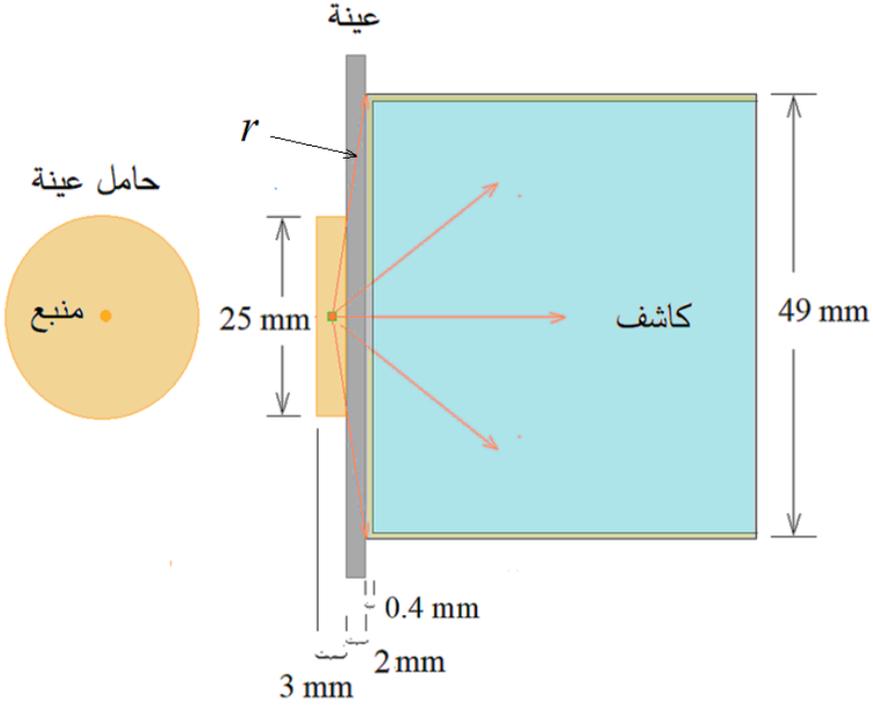


**الشكل (5):** مساحة القبة الكروية تعطى بالعلاقة  $s = \pi(a^2 + h^2)$ . في هذا الشكل إن موقع المنبع يكون عند مركز الكرة، وحافة القبة الكروية التي هي دائرة تكون عند حافة الواجهة الأمامية للكاشف. وبالتالي، فإن:

$$\frac{\Omega}{4\pi} = \frac{\pi(a^2 + h^2)}{4\pi r^2} = \frac{\pi(a^2 + (r - x)^2)}{4\pi r^2} = \frac{a^2 + (r - x)^2}{4r^2} \quad (19)$$

حيث  $a = 24.5 \text{ mm}$  هي نصف قطر الواجهة الأمامية للكاشف. و  $x = 1.5 + 2 + 0.4 = 3.9 \text{ mm}$  تمثل بعد المنبع عن الكاشف. وفي هذه العلاقة مجهول واحد هو  $r$  ويمكن حسابه من العلاقة:

$$r = \sqrt{a^2 + x^2} = \sqrt{(24.5)^2 + (3.9)^2} = 24.808 \text{ mm}$$



الشكل (6): المنبع والعينة والكاشف مع الأبعاد.

بتعويض العلاقة (19) في العلاقة (18) نجد أن الشدة الإشعاعية المتجهة نحو الكاشف تكون:

$$I'(t) = \frac{a^2 + (r - x)^2}{4r^2} A(t) \quad (20)$$

وبتعويض القيم العددية في العلاقة (20) نجد:

$$\begin{aligned} I'(t) &= \frac{(24.5 \text{ mm})^2 + (24.808 \text{ mm} - 3.9 \text{ mm})^2}{4(24.808 \text{ mm})^2} 15190 \text{ Bq} \\ &= 6401.15 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

في الحقيقة إن الشدة الإشعاعية الساقطة على العينة  $I(0)$  تمثل ذلك الجزء من نشاط منبع السيزيوم 137 الذي سقطت العينة بعد أن توهينه في مادة حامل المنبع، ثم

يتوهن في العينة ويسقط على الكاشف. حيث إن منبع السيزيوم 137 هو منبع نقطي موجود في مركز شريحة أسطوانية من البلوكسيكلاس سماكتها 3 mm، وقطرها 25 mm انظر الشكل (6). وبالتالي، فإن فوتونات غاما تجتاز بصورة مباشرة عمودية على العينة سماكة قدرها 1.5 mm بينما التي تسقط على حافة الواجهة الأمامية للكاشف تجتاز سماكة قدرها 12.5 mm.

**حساب الشدة الإشعاعية الساقطة على العينة:** إن الشدة الإشعاعية الساقطة على

العينة  $I(0)$  (هي نفس الشدة الإشعاعية العابرة لمادة حامل المنبع بعد أن توهنت) تعطى بالعلاقة:

$$I(0) = I'(t)e^{-\mu\bar{x}} \quad (21)$$

حيث  $\mu$  هو معامل الامتصاص الخطي لمادة حامل المنبع البلوكسيكلاس، ووحدته هي  $\text{cm}^{-1}$ ، و  $\bar{x}$  هي السماكة الوسطى التي تعبرها الفوتونات في مادة حامل المنبع. إن معامل الامتصاص الكتلي  $\mu_m$  لمادة البلوكسيكلاس هو  $\mu_m = 0.83 \text{ g.cm}^{-2}$  [7]. وبما أن كثافة مادة البلوكسيكلاس هي  $\rho = 1.18 \text{ g.cm}^{-3}$ ، فإن معامل الامتصاص الخطي لها يكون:

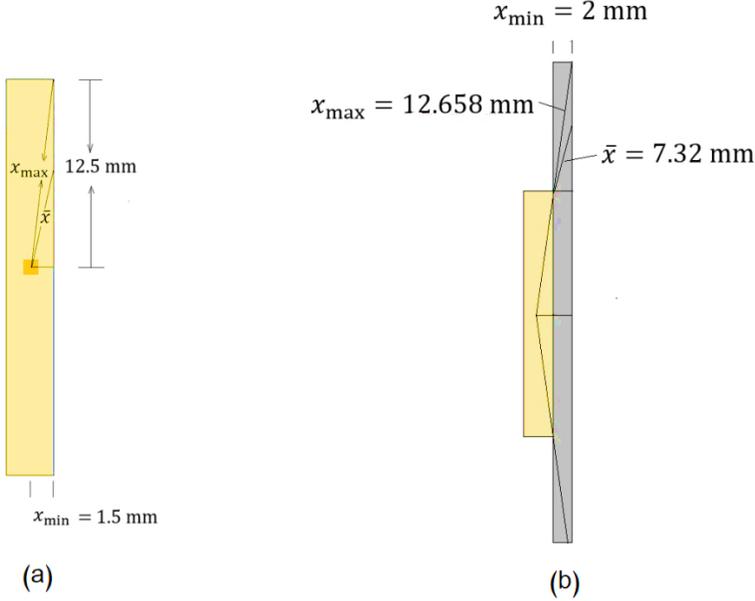
$$\mu = \rho \cdot \mu_m = 1.18 \times 0.83 = 0.09794 \text{ cm}^{-1}$$

إن كافة المقادير في العلاقة (21) أصبحت معلومة عدا السماكة الوسطى  $\bar{x}$  التي تعبرها الفوتونات في مادة حامل المنبع. يمكن حساب السماكة الوسطى  $\bar{x}$  كما يلي: إن أصغر مسافة تجتازها فوتونات غاما عبر حامل المنبع هي  $x_{\min} = 1.5 \text{ mm}$  وأكبر مسافة تجتازها فوتونات غاما عبر حامل المنبع  $x_{\max} = 12.589 \text{ mm}$ ، انظر الشكل (7). وبالتالي، فإن القيمة الوسطى للسماكة تكون:

$$\bar{x} = \frac{x_{\min} + x_{\max}}{2} = 7.02 \text{ mm} = 0.702 \text{ cm}$$

بتطبيق العلاقة (21) نجد أن الشدة الإشعاعية التي تسقط على العينة تكون:

$$I(0) = 6401.15 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1} \times e^{-0.09794 \text{ cm}^{-1} \times 0.702 \text{ cm}} \\ = 5975.83 \text{ photons} \cdot \text{s}^{-1}$$



**الشكل (7): (a)** حامل المنبع من مادة البلوكسيكلاس والسماكة الوسطى التي تعبرها الفوتونات في حامل المنبع. **(b)** العينة والسماكة الوسطى التي تعبرها الفوتونات في العينة.

بتطبيق العلاقة (11.5) نحصل على المقاطع العرضية للإلكترونات في العينات المدروسة، وهي مبينة في **الجدول (7)**.

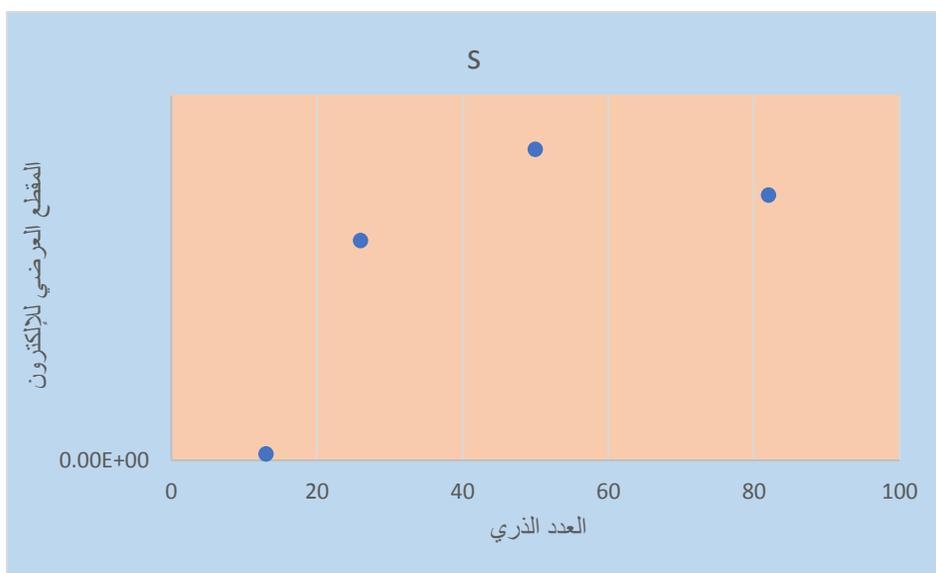
**الجدول (7):** المقاطع العرضية للإلكترونات في العينات المدروسة.

العينة	العدد الذري	التركيز Electrons/cm <sup>3</sup>	الشدة الإشعاعية العابرة من أي عينة	المقطع العرضي للإلكترون

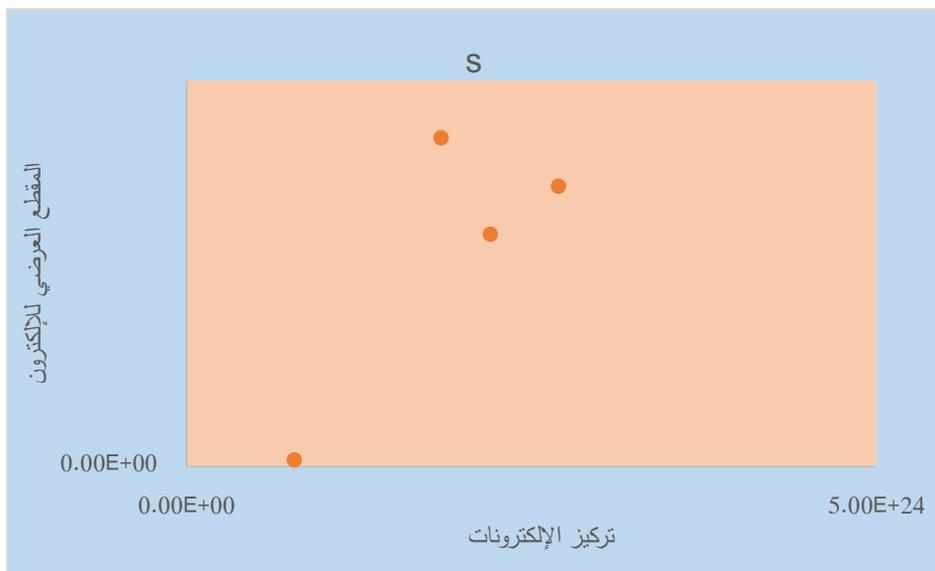
دراسة نظرية وتجريبية لتأثير تركيز الإلكترونات في المعادن على المقطع العرضي لتشتت الفوتون

cm <sup>2</sup>	I(x)			
$10.33 \times 10^{-25}$	3311.67	$7.826 \times 10^{23}$	13	الألمنيوم
$3.61 \times 10^{-25}$	3340.12	$22.02 \times 10^{23}$	26	الحديد
$5.11 \times 10^{-25}$	3002.55	$18.45 \times 10^{23}$	50	القصدير
$4.36 \times 10^{-25}$	2527.48	$26.98 \times 10^{23}$	82	الرصاص

يبين الشكل (8) تابعة المقطع العرضي للإلكترون للعدد الذري من أجل العينات المدروسة. ويبين الشكل (9) تابعة المقطع العرضي للإلكترون لتركيز الإلكترونات في العينات المدروسة.



**الشكل (8):** تابعة المقطع العرضي للإلكترون لـ  $Z$  من أجل العينات المدروسة.



**الشكل (9):** تابعة المقطع العرضي للإلكترون لـ  $n$  من أجل العينات المدروسة.

يبين الشكلين (8) و (9) بوضوح أن المقطع العرضي للإلكترون هو تابع ما لتركيز الإلكترونات، وبالتالي تابع ما للعدد الذري، وليس مقداراً ثابتاً من أجل كافة الإلكترونات في المواد المختلفة كما تعطي العلاقات من (1) حتى (4). فمن أجل علاقة طومسون (1)، إن المقطع العرضي للإلكترون من أجل كافة المواد هو:

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m^2 c^4}$$

$$= \frac{8 \times 3.14}{3} \times \frac{(4.80 \times 10^{-10})^4}{(9.11 \times 10^{-28} \text{ g})^2 \times (3 \times 10^{10} \text{ cm/s})^4}$$

$$= 6.615 \times 10^{-29} \text{ m}^2 = 6.615 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

ومن أجل علاقة كومبتون (2)، إن المقطع العرضي للإلكترون من أجل كافة

المواد هو:

$$\alpha = \frac{h\nu}{mc^2} = \frac{662 \times 10^3 \text{ eV}}{0.511 \times 10^6 \text{ eV}} = 1.29541$$

$$\sigma = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m^2 c^4} \frac{1}{1 + 2\alpha}$$

$$= \frac{8 \times 3.14}{3} \frac{(4.80 \times 10^{-10})^4}{(9.11 \times 10^{-28} \text{ g})^2 \times (3 \times 10^{10} \text{ cm/s})^4} \frac{1}{1 + 2 \times 1.29541}$$

$$= 1.841 \times 10^{-29} \text{ m}^2 = 1.841 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

ومن أجل علاقة ديراك وغوردن (3)، إن المقطع العرضي للإلكترون من أجل

كافة المواد هو:

$$\sigma = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right]$$

$$= \frac{2\pi(4.80 \times 10^{-10})^4}{(9.11 \times 10^{-28} \text{ g})^2 \times (3 \times 10^{10} \text{ cm/s})^4} \frac{1 + 1.2954}{(1.2954)^2} \left[ \frac{2(1 + 1.2954)}{1 + 2 \times 1.2954} \right. \\ \left. - \frac{1}{1.2954} \ln(1 + 2 \times 1.2954) \right] = 1.979 \times 10^{-29} \text{ m}^2$$

$$= 1.979 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

ومن أجل علاقة كلاين-نيشينا (4)، إن المقطع العرضي للإلكترون من أجل

كافة المواد هو:

$$\sigma = \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \frac{1 + \alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1 + \alpha)}{1 + 2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1 + 2\alpha) \right] \\ + \frac{2\pi e^4}{m^2 c^4} \left[ \frac{1}{2\alpha} \ln(1 + 2\alpha) - \frac{1 + 3\alpha}{(1 + 2\alpha)^2} \right].$$

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{2\pi \times (4.80 \times 10^{-10})^4}{(9.11 \times 10^{-28} \text{g})^2 \times (3 \times 10^{10} \text{cm/s})^4} \frac{1 + 1.2954}{(1.2954)^2} \left[ \frac{2(1 + 1.2954)}{1 + 2 \times 1.2954} \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{1.2954} \ln(1 + 2 \times 1.2954) \right] \\ &+ \frac{2\pi \times (4.80 \times 10^{-10})^4}{(9.11 \times 10^{-28} \text{g})^2 \times (3 \times 10^{10} \text{cm/s})^4} \left[ \frac{1}{2 \times 1.2954} \ln(1 + 2 \right. \\ &\quad \left. \times 1.2954) - \frac{1 + 3 \times 1.2954}{(1 + 2 \times 1.2954)^2} \right] = 2.547 \times 10^{-29} \text{m}^2 \\ &= 2.547 \times 10^{-25} \text{cm}^2 \end{aligned}$$

#### 4.6. المناقشة والاستنتاجات

تبين العلاقة (11.5) التي استنتجناها بأن المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون، من ناحية أولى، يتناسب عكساً مع تركيز الإلكترونات في المادة، وبالتالي يتناسب عكساً مع العدد الذري. وكلما زاد العدد الذري زادت السرعة الوسطى للإلكترون، وكلما زادت سرعة الإلكترون نقص المقطع العرضي للتشتت؛ أي المقطع العرضي يتناسب عكساً مع سرعة الإلكترون، وبالتالي يتناسب عكساً مع طاقة الإلكترون. ومن ناحية ثانية، يتناسب عكساً مع سماكة العينة. وبالتالي يتناسب عكساً مع عدد الإلكترونات في وحدة المسار، وكلما كان عدد الإلكترونات في وحدة المسار أكبر كانت المسافة أكبر. وهذا يعني أن المقطع العرضي يتناسب عكساً مع عدد الإلكترونات في وحدة المساحة. فكلما كانت عدد الإلكترونات في وحدة المساحة أكبر كان المقطع العرضي للتشتت أصغر. ولهذا نلاحظ في الشكلين (8) و (9) عدم وجود تابعة واضحة المقطع العرضي للتشتت مع زيادة العدد الذري والتركيز. لكن على كل حال، حتى تظهر التابعة بشكل واضح يجب دراسة عدد كبير من كبير من العناصر. ومما سبق نستنتج أن:

- المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون هو مقدار غير ثابت يتغير من التركيز بسبب اختلاف طاقة الإلكترون، ويتناقص مع السماكة بسبب تناقص الطاقة الوسطى للفوتون.

- إن قيم المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون التي حصلنا عليها من أجل معادن مختلفة بصورة عامة هي من نفس رتبة المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون المحسوب وفق علاقة كلاين-نيشينا والعلاقات الأخرى. لكن لقيمه من أجل المعادن المختلفة المدروسة كانت أكبر قليلاً من قيمة المحسوبة من علاقة كلاين-نيشينا. ونحن نتوقع وجود مواد لها قيمة أصغر من القيمة التي تعطيها علاقة كلاين ونيشينا. لذلك يمكن أن القول إن علاقة كلاين ونيشينا صحيحة وهي تعطي القيمة الوسطى للمقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون.

- بالرجوع إلى استنتاج علاقة كلاين ونيشينا نجد أن استنتاجنا لعلاقة المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون أبسط بكثير وأسهل من استنتاج علاقة كلاين-نيشينا، وهي تعطي قيم تجريبية قريبة مما تعطيه علاقة كلاين ونيشينا. لكن علاقتنا أفضل من حيث أنها توحى بوجود تأثير لتغير طاقة الفوتون مع السماكة واختلاف طاقة الإلكترون من مادة نتيجة اختلاف السرعة الوسطى للإلكترون من مادة لأخرى على المقطع العرضي لتشتت الفوتون عن الإلكترون.

## 8. المراجع

- [1] Chen NingYang (1922). Nobel Laureate in Physics (1957) Tsinghua University (China) and Chinese University (Hong Kong) at the time of this address
- [2] C. N. Yang: The Klein-Nishina Formula & Quantum Electrodynamics, Lect. Notes Phys. **746**, 393–397 (2008)
- [3] DOI 10.1007/978-4-431-77056-5 18 c Nishina Memorial Foundation 2008.
- [4] YANG, Chen Ning. The Klein-Nishina Formula&Quantum Electrodynamics. In: *Nishina Memorial Lectures*. Springer, Tokyo, 2008. p. 393-398.
- [5] YANG, Chen Ning. The Klein-Nishina Formula & Quantum Electrodynamics. In: *Selected Papers of Chen Ning Yang II: With Commentaries*. 2013. p. 281-285.
- [6] Hubbell JH. Photon cross sections, attenuation coefficients and energy absorption coefficients. National Bureau of Standards Report NSRDS-NBS29, Washington DC. 1969 Aug.
- [7]Vahabi, S. M., Bahreinipour, M., & Zafarghandi, M. S. (2017). Determining the mass attenuation coefficients for some polymers using MCNP code: a comparison study. *Vacuum*, 136, 73-76

