

# مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الأساسية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 47 . العدد 22

1447 هـ - 2025 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص

المدير المسؤول عن المجلة

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

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

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

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

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

. هاتف / فاكس : ++ 963 31 2138071

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

. البريد الإلكتروني : [journal.homs-univ.edu.sy](http://journal.homs-univ.edu.sy)

**ISSN: 1022-467X**

## شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
  - طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
  - إذا كان الباحث طالب دراسات عليا:  
يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقة على النشر في المجلة.
  - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:  
يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.
  - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :  
يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.
  - إذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :  
يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.
  - يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):  
عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي ( كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1- مقدمة
  - 2- هدف البحث
  - 3- مواد وطرق البحث
  - 4- النتائج ومناقشتها .
  - 5- الاستنتاجات والتوصيات .
  - 6- المراجع.

- يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات ( الآداب - الاقتصاد - التربية - الحقوق - السياحة - التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):
- عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي ( كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1. مقدمة.
- 2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
- 3. أهداف البحث و أسئلته.
- 4. فرضيات البحث و حدوده.
- 5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
- 6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
- 7. منهج البحث و إجراءاته.
- 8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
- 9. نتائج البحث.
- 10. مقترحات البحث إن وجدت.
- 11. قائمة المصادر والمراجع.
- 7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:
  - أ- قياس الورق 25×17.5 B5.
  - ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 - يمين 2.5- يسار 2.5 سم
  - ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8
  - ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20
- كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي - العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.
- ج. يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.
- 8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.
- 9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة  
11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام ورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

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

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة - الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة - سنة النشر - وتتبعها معترضة ( - ) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة - دار النشر وتتبعها فاصلة - الطبعة ( ثانية . ثالثة ) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة .  
وفيما يلي مثال على ذلك:

-MAVRODEANUS, R1986- Flame Spectroscopy. Willy, New York, 373p.

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

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

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

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

## رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. دفع رسم نشر (50000) ل.س أربعون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (200000) ل.س مئة ألف ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .
3. دفع رسم نشر (200) مننًا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .
4. دفع مبلغ (15000) ل.س ستة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

## المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
26-11	د.علي الدود	دراسة تحليلية لحساب سماكة الطبقة المتآكلة إشعاعياً من قضبان التحكم في المفاعل النووي
50-27	حلا سلمان د.نهلة إبراهيم د.علي داود	الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرعة بمادة نترت الصوديوم
84-51	الاء قححية أ.د. صالح الرحيل	دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تأين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية
103-85	محمد هيثم إسماعيل د.سليمان محمد محمود د.سمير إحسان	الحل العددي لنظام من المعادلات التكاملية- التفاضلية الكسرية الخطية باستخدام طريقة المربعات الصغرى وكثيرات حدود Mamadu-Njoseh المزاحة



## دراسة تحليلية لحساب سماكة الطبقة المتآكلة إشعاعياً من قضبان التحكم في المفاعل النووي

د. علي الدود<sup>1</sup>

### الملخص

تعدّ قضبان التحكم أحد العناصر المحورية في بنية المفاعلات النووية، إذ يعتمد عليها لضبط معدل التفاعل الانشطاري والحفاظ على استقرار المنظومة النووية وأمانها التشغيلي. وفي إطار هذا البحث، تم تطوير صياغة تحليلية تصف بدقة سلوك الطبقة المتآكلة إشعاعياً على سطح قضبان التحكم نتيجة تدفق النيوترونات داخل قلب المفاعل. وقد جرى استخدام هذه العلاقة لتقدير مقدار التآكل تحت تأثير النيوترونات الحرارية على مجموعة من المواد الشائعة الاستخدام في صناعة هذه القضبان. وقد أظهرت النتائج أن الفاناديوم يتمتع بمقاومة أعلى للتآكل بسبب الإشعاع مقارنة بمواد أخرى تعتمد عليها الصناعات النووية عادةً، وكلفته الاقتصادية مقبولة مقارنة بباقي المواد، مما يجعله مرشحاً مناسباً لزيادة عمر الخدمة لقضبان التحكم. كما يتضمن البحث مقترحات عملية تهدف إلى الحد من ظاهرة التآكل دون الحاجة إلى استبدال القضيب بالكامل، وذلك عبر إجراءات هندسية أو تصميمية تساعد على إطالة عمر المكوّن وتحسين كفاءته التشغيلية داخل المفاعل.

**الكلمات المفتاحية:** سماكة الطبقة المتآكلة، تدفق نيوتروني حراري، قضبان التحكم.

<sup>1</sup> دكتوراه في الفيزياء النظرية.

## An Analytical Study to Calculate the Thickness of the Radioactively Corroded Layer of Control Rods in Nuclear Reactors

Ali Al-Doud<sup>2</sup>

### Abstract

Control rods are among the pivotal components in the structure of nuclear reactors, as they are relied upon to regulate the rate of the fission reaction and to maintain the stability and operational safety of the nuclear system.

Within the scope of this study, an analytical formulation was induced -developed to accurately describe the behavior of the radiation eroded layer formed on the surface of control rods as a result of neutrons employed to estimate flux within the reactor core. This formulation was the extent of erosion caused by thermal neutrons for a range of materials commonly used in the manufacture of control rods. The results indicate induced erosion -that vanadium exhibits greater resistance to radiation er materials typically adopted in the nuclear industry. compared with oth In addition, its economic cost is considered reasonable relative to alternative materials, making it a promising candidate for extending the ical proposals service life of control rods. The study also presents pract aimed at mitigating erosion without the need to replace the entire rod, based measures that contribute to -through engineering or design prolonging component lifetime and enhancing its operational efficiency within the reactor.

**Keywords:** Corroded Layer Thickness, Thermal Neutron Flux, Control Rods.

---

<sup>2</sup> PhD in Theoretical Physics.

## 1. مقدمة

إن قضبان التحكم في المفاعل النووي يمكن أن تتآكل إشعاعياً نتيجة للتأثيرات الناجمة عن الإشعاع والحرارة والتآكل الكيميائي. يمكن أن يؤدي التآكل الإشعاعي إلى تغييرات في تركيب المواد وفقدان الكفاءة وزيادة خطر الحوادث. لذلك، من المهم اتخاذ إجراءات للحد من التآكل الإشعاعي وضمان سلامة المفاعل. وفقاً لتقرير الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، يعد التآكل الإشعاعي لقضبان التحكم أحد التحديات المهمة التي يجب مواجهتها في تصميم وتشغيل المفاعلات النووية.

## 2. هدف ومشكلة البحث

يهدف هذا البحث إلى تطوير نموذج تحليلي دقيق يصف عملية التآكل بسبب الإشعاع في قضبان التحكم داخل المفاعلات النووية، وذلك من خلال حساب سماكة الطبقة المتآكلة نتيجة امتصاص النيوترونات.

تتمثل المشكلة الرئيسية في علاقات كمية مباشرة تمكن من تقدير مقدار التآكل مع الزمن وارتباطه بخواص المواد المستخدمة، مما يعيق تحديد العمر التشغيلي الأمثل للقضبان. لذلك، يسعى البحث إلى سد هذه الفجوة من خلال اشتقاق علاقة وتطبيقها عملياً، إضافة إلى اقتراح حلول هندسية تقلل الحاجة إلى استبدال قضبان التحكم بالكامل.

## 3. دراسة مرجعية

تلعب قضبان التحكم دوراً هاماً في المفاعلات النووية. يتم استخدامها للتحكم في التفاعل النووي وضمان سلامة المفاعل. تتكون قضبان التحكم عادةً من مواد تمتص النيوترونات، مما يساعد في تنظيم معدل التفاعل النووي. في هذا السياق، يُثار سؤال حول ما إذا كانت قضبان التحكم تتآكل إشعاعياً في المفاعل النووي أم لا؟

وفقاً للوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA)، يعد تآكل قضبان التحكم أحد العوامل المهمة التي يجب مراعاتها في تصميم وتشغيل المفاعلات النووية [1]. يحدث التآكل الإشعاعي نتيجة

للتأثيرات الناجمة عن الإشعاع على المواد، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها الكيميائي والفيزيائي. هذه الظاهرة يمكن أن تؤثر بشكل كبير على أداء وسلامة المفاعل. كما ذكر تقرير للجنة الدولية لسلامة المفاعلات النووية (ICRS)، فإن التآكل الإشعاعي لقضبان التحكم يمكن أن يكون له تأثيرات خطيرة على سلامة المفاعل [2].

يحدث التآكل الإشعاعي لقضبان التحكم نتيجة لعدة أسباب:

1. التأثيرات الناجمة عن الإشعاع: تتعرض قضبان التحكم لحزمة نيوترونية شديدة، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها الكيميائي والفيزيائي.

2. تأثيرات الحرارة: يتعرض قضبان التحكم لتأثيرات الحرارة الناجمة عن التفاعل النووي، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها.

3. تأثيرات التآكل الكيميائي: يتعرض قضبان التحكم لتأثيرات التآكل الكيميائي الناجمة عن التفاعل مع المواد الأخرى في المفاعل، مما يؤدي إلى تغييرات في تركيبها. وفقاً لدراسة نشرها مركز الأبحاث النووية الأوروبي (ENEA)، فإن تأثيرات الحرارة والإشعاع تؤدي إلى تآكل قضبان التحكم [3].

هذا وتختلف أحجام قضبان التحكم باختلاف أنواع المفاعلات وتصميماتها. عادةً ما تكون قضبان التحكم على شكل أسطواني أو متوازي مستطيلات، وتتراوح أقطارها 10 cm – 1، وأطولها 500 cm – 100. على سبيل المثال، في مفاعلات الماء المضغوط PWR، تكون قضبان التحكم عادةً بقطر 2 cm – 1 وطول 400 – 500 cm [4].

يختلف عدد قضبان التحكم باختلاف حجم المفاعل وتصميمه. عادةً ما يكون عدد قضبان التحكم في المفاعل النووي بين 200 – 50 قضيب. على سبيل المثال، في مفاعل نووي من نوع PWR، يكون عدد قضبان التحكم عادةً حوالي 100 قضيب.

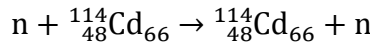
تُصنع قضبان التحكم من مواد لها قدرة عالية على امتصاص النيوترونات. كما أوضحت الوكالة الدولية للطاقة الذرية (IAEA) في تقريرها لعام 1974، فإن تصميم وتشغيل المفاعلات النووية يتطلبان اهتماماً دقيقاً بمواد قضبان التحكم وتصميمها [5].

إن أحجام قضبان التحكم وعددها والمواد المصنوعة منها تعتمد على نوع المفاعل وتصميمه. المواد الشائعة المستخدمة في تصنيع قضبان التحكم هي الكادميوم، البورون، الزركونيوم، والهافنيوم والفولاذ. هذه المواد لها قدرة عالية على امتصاص النيوترونات ومقاومة التآكل، مما يساهم في تحسين أداء المفاعل وزيادة سلامته [6].

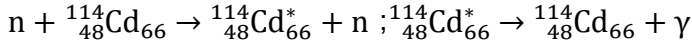
إن تبديل قضبان التحكم في المفاعل النووي يعتمد على عدة عوامل، منها تصميم المفاعل ونوع الوقود المستخدم وظروف التشغيل. عادةً ما يتم استبدال قضبان التحكم بشكل دوري كجزء من برنامج الصيانة الروتينية للمفاعل. ويختلف الجدول الزمني لاستبدال قضبان التحكم من مفاعل إلى آخر. في بعض المفاعلات، قد يتم استبدال قضبان التحكم كل 5 إلى 10 سنوات، بينما في مفاعلات أخرى قد يكون الجدول الزمني أطول أو أقصر. ومن المهم الإشارة إلى أن عملية استبدال قضبان التحكم تتطلب توقف المفاعل عن العمل واتباع إجراءات السلامة اللازمة. فمثلاً قضبان التحكم في مفاعل PWR المصنوعة من سبائك البورون والستانلس ستيل تبدل كل 10 سنوات، بينما قضبان التحكم في مفاعل CABR مصنوعة من الهافنيوم تبدل بعد 5 سنوات من التشغيل [7-9].

#### 4. آلية حدوث التغيير في بنية المواد

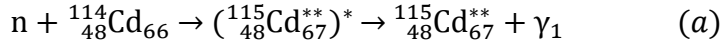
لندرس تفاعل نواة الكادميوم  $^{114}_{48}\text{Cd}_{66}$  مثلاً في قضبان التحكم في المفاعل النووي نتيجة سقوط حزمة من النيوترونات الحرارية عليها، إما أن يكون تشتتاً مرناً من النوع  $(n, n)$ ؛ أي:



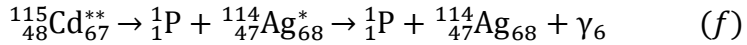
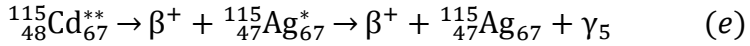
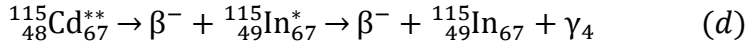
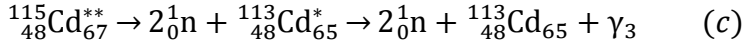
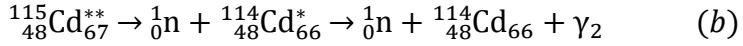
أو غير مرين من النوع  $(n, n)^*$ ؛ أي:



أو أن يكون تفاعل امتصاص أو أسر للنيوترون من قبل النواة، فينتج عن ذلك نواة مركبة مثارة  $({}^{115}_{48}\text{Cd}_{67}^{**})^*$ ، والتي تتخلص مباشرة من خلال عملية التفاعل من جزء من طاقة الإثارة على شكل إشعاع غاما بعمر نصف من رتبة  $10^{-12}\text{sec}$ ، الذي يسمى بإشعاع غاما الفوري، انظر الشكل (1.2)، ونعبر عن ذلك بالمعادلة الآتية:

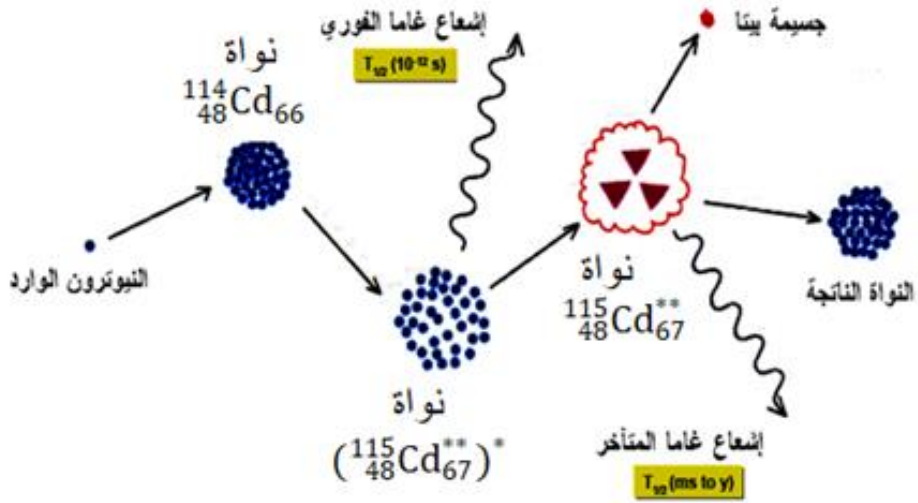


حيث إن النواة  ${}^{115}_{48}\text{Cd}_{67}^{**}$  الناتجة عن تفكك النواة المركبة على الأغلب لا تتخلص من كامل طاقة الإثارة؛ أي أنها ما تزال نشيطة إشعاعياً. تنتقل هذه النواة إلى حالة أكثر استقراراً بفصل أحد مكوناتها، فتتخلص من جزء ثانٍ من طاقة الإثارة، ثم ما تبقى من طاقة الإثارة تصدره على شكل إشعاع غاما مرافق كما هو مبين في المعادلات الآتية:



إن إشعاع غاما  $\gamma_i (i = 2, 3, \dots)$  المرافق هذا يكون له طاقة محددة مميزة للنواة المصدرة له. يسمى عادة هذا الإشعاع بإشعاع غاما المتأخر، لأنه ينتج بعد زمن طويل من صدور إشعاع غاما الفوري. إن عمر النصف لإشعاع غاما المتأخر يتراوح بين الملي ثانية وآلاف السنين، انظر الشكل (1).

ما يهنا من كافة تفاعلات النيوترونات الحرارية السابقة، الممكنة فقط تلك التي تساهم في تغيير بنية النوى الأصلية؛ وتحولها إلى نوى أخرى، أي تؤدي إلى تخریبها في قضبان التحكم.



**الشكل (1):** رسم تمثيلي لعملية تشكل النوارة المركبة  $(^{115}_{48}\text{Cd}^{**})^*$  التي تصدر إشعاع غاما الفوري. فينتج عن ذلك نوارة نشيطة إشعاعياً تصدر إشعاعاً مثل ألفا أو بيتا وغيرها يرافقها عادةً إشعاع غاما المتأخر، وتتحول النوارة أخيراً إلى نوارة مستقرة.

## 5. الدراسة التحليلية

سنفترض في دراستنا هذه أن النيوترونات تتفاعل مع المواد التي تصنع منها قضبان التحكم في المفاعلات النووية بشكل عشوائي، ولا يوجد تفضيل لاتجاه معين. وأن كثافة هذه المواد متجانسة، عندئذٍ، إن عدد النوى في واحدة الحجم يعطى بالعلاقة التالية:

$$n = \frac{\rho N_A \theta}{A} \quad (1)$$

حيث:  $\rho$ : الكثافة،  $N_A$ : عدد أفوغادرو،  $\theta$ : الوفرة، و  $A$ : العدد الكتلي.

نعرف مقطع التفاعل للامتصاص من أجل المواد النووية  $\sigma_a$ ، وهو مقطع التفاعل الذي يصف احتمال امتصاص النيوترونات من قبل الذرات.

بفرض أن تدفق النيوترونات التي ترد على قضيب التحكم في المفاعل النووي  $\Phi$  ثابتاً<sup>3</sup>، وهو عدد النيوترونات التي تمر عبر وحدة المساحة في وحدة الزمن.

إن تغير عدد النوى في واحدة الحجم بتغير الزمن يعطى بالعلاقة:

$$\frac{dn}{dt} = -\Phi\sigma_a n \quad (2)$$

إن هذه المعادلة تصف كيفية تناقص النوى بسبب التفاعل مع النيوترونات.

نحصل بمكاملة العلاقة (2) على:

$$\int_0^n \frac{dn}{n} = - \int_0^t \Phi\sigma_a dt \quad (3)$$

وبالتالي نجد:

$$n(t) = n_0 e^{-\Phi\sigma_a t} \quad (4)$$

إن تغيير عدد النوى بعد مرور زمن  $t$  يعطى بالعلاقة:

$$\Delta n = n_0 - n(t)$$

$$\Delta n = n_0 - n_0 e^{-\Phi\sigma_a t}$$

$$\Delta n = n_0 (1 - e^{-\Phi\sigma_a t}) \quad (5)$$

باستخدام التقريب:

$$1 - e^{-\Phi\sigma_a t} \approx \Phi\sigma_a t$$

نجد:

$$\Delta n = n_0 \Phi\sigma_a t \quad (6)$$

<sup>3</sup> تم أخذ تدفق النيوترونات الحرارية في دراستنا هذه.

نعرف سماكة الطبقة المتأكلة بسبب التفكك الإشعاعي بالشكل:

$$\Delta x = \frac{\Delta n}{n_0} \lambda_t = \Phi \sigma_a t \lambda_t \quad (7)$$

حيث  $\lambda_t$  المسار الحر الوسطي للعبور، ويعطى بالشكل:

$$\lambda_t = \frac{1}{n \sigma_t}$$

ولدينا:

$$\sigma_t = \sigma_a + \sigma_s$$

وبفرض أن المواد التي تصنع منها قضبان التحكم شديدة الامتصاص للنيوترونات، وبالتالي:

$$\sigma_a \gg \sigma_s$$

يمكن اعتبار أن:

$$\sigma_t \approx \sigma_a$$

وبالتالي يكون:

$$\lambda_t = \frac{1}{n \sigma_a}$$

بالتعويض في العلاقة (7) نجد:

$$\Delta x = \Phi \sigma_a t \frac{1}{n \sigma_a}$$
$$\Delta x = \frac{\Phi}{n} t \quad (8)$$

وهي علاقة سماكة الطبقة المتآكلة في قضبان التحكم في المفاعل النووي بإهمال تأثير التشتت.

## 6. الدراسة التطبيقية

سنقوم بتطبيق العلاقة (8) من أجل تدفق نيوتروني حراري قدره  $\Phi(0) = 1 \times 10^{18} \frac{\text{neut}}{\text{sec.m}^2}$  من أجل مجموعة من النظائر والعناصر التي توافق قيماً للمقاطع العرضية الموضحة في الجدول (1)، والتي تصنع منها عادة قضبان التحكم في المفاعلات النووية وبعضها تم اختيارها على أساس المقطع العرضي للأسر كبيراً والتي تتوفر لدينا بيانات عنها.

يوضح الجدول (1) قيم المقاطع العرضية الموافقة للنظائر والعناصر التي سيتم إجراء التطبيق عليها في الدراسة، بالإضافة إلى تركيزها المحسوب من العلاقة (1).

**الجدول (1):** قيم المقاطع العرضية الموافقة للنظائر والعناصر التي سيتم إجراء التطبيق عليها في الدراسة<sup>4</sup>.

العنصر أو النظير	$n \times 10^{37}$ (1/mm <sup>3</sup> )	$\sigma_c \times 10^{-22}$ (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_s \times 10^{-22}$ (mm <sup>2</sup> )
<b>B<sup>10</sup></b>	2.58	3840	0.385
<b>Cd</b>	4.59	2460	7.41
<b>Hf</b>	4.40	104	7.58
<b>Ag<sup>107</sup></b>	3.06	36.9	5.65
<b>V</b>	7.08	5100	5.00
<b>Ta<sup>181</sup></b>	5.46	21.2	6.18

<sup>4</sup> تم أخذ العناصر والنظائر التي تتوفر بيانات تجريبية عنها.

<sup>5</sup> إن المقطع العرضي للامتصاص هو نفسه المقطع العرضي للأسر بغياب وجود الانشطار هنا.

يوضح الجدول (2)، قيم سماكات الطبقة المتآكلة في المفاعل النووي الموافقة للنظائر والعناصر من أجل أزمنة تشغيل مختلفة.  
الجدول (2): قيم سماكات الطبقة المتآكلة في المفاعل النووي الموافقة للنظائر والعناصر من أجل أزمنة تشغيل مختلفة<sup>6</sup>.

$t(s)$	$\Delta x_{Ta}$ (mm)	$\Delta x_V$ (mm)	$\Delta x_{Ag}$ (mm)	$\Delta x_{Hf}$ (mm)	$\Delta x_{Cd}$ (mm)	$\Delta x_B$ (mm)
0	0	0	0	0	0	0
31536000	0.577	0.445	1.03	0.716	0.687	1.22
63072000	1.15	0.889	2.06	1.43	1.37	2.44
94608000	1.73	1.33	3.08	2.15	2.06	3.66
126144000	2.31	1.78	4.11	2.86	2.75	4.88
157680000	2.89	2.22	5.14	3.58	3.44	6.10
315360000	5.77	4.45	10.3	7.16	6.87	12.2

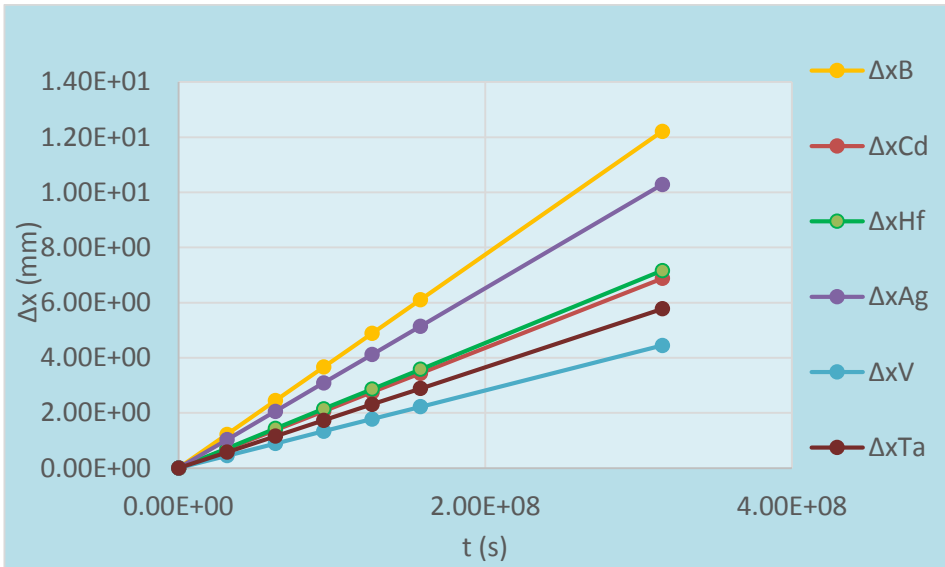
يوضح الشكل (2)، قيم سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  كتابع للزمن  $t$ . نلاحظ من الشكل (2) أن سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  من قضبان التحكم في المفاعل النووي تزداد مع زيادة زمن التشغيل، كما نلاحظ أن سماكة الطبقة المتآكلة من القضيب المصنوع من الفانديوم  $V$  تكون أقل، يليه نظير التاليم  $Ta^{181}$ ، الكاديوم  $Cd$ ، الهافنيوم  $Hf$ ، نظير الفضة  $Ag^{107}$ ، ومن ثم نظير البورون  $B^{10}$ . يرجع ذلك إلى أن تركيز الفانديوم يكون أكبر ما يمكن من بين المواد المدروسة، وتركيز نظير البورون  $B^{10}$  يكون الأصغر.

يوضح الجدول (3)، قيم سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  كتابع للتركيز  $n$  من أجل زمن قدره  $t = 31536000$  (s). كما يوضح الشكل (2)، قيم سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  كتابع للتركيز  $n$  من أجل زمن قدره  $t = 31536000$  (s).

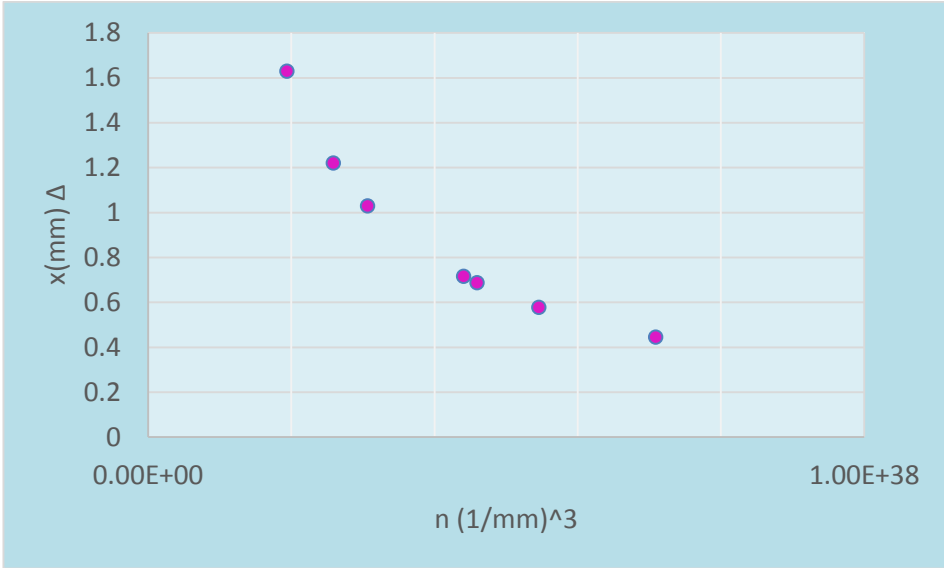
<sup>6</sup> تم أخذ الزمن حتى 10 سنوات وحسابه بالثواني.

الجدول (3): قيم سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  كتابع للتركيز  $n$  من أجل زمن قدره  $t = 3.1536000$  (s).

$\Delta x$ (mm)	$n \times 10^{37}$ (1/mm <sup>3</sup> )
1.220252	2.58
0.686991	4.59
0.716076	4.40
1.029446	3.06
0.445128	7.08
0.578033	5.46



الشكل (2): قيم سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  كتابع للزمن  $t$ .



**الشكل (3):** قيم سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  كتابع للتركيز  $n$  من أجل زمن قدره  $t = 31536000$  (s).

نلاحظ من الشكل (3) أن قيم سماكة الطبقة المتآكلة  $\Delta x$  تتناقص مع زيادة التركيز  $n$  وذلك عند تثبيت الزمن  $t = 31536000$  (s).

#### 7. المناقشة والمقارنة مع الدراسات السابقة

1. مقارنة مع تقرير الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA (1996) [1]

أشارت الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA إلى أن قضبان التحكم المصنوعة من الكاديوم والهافنيوم تُظهر مقاومة جيدة للتآكل الإشعاعي في ظروف تشغيل معينة، لكن التقرير لم يقدم قياسات كمية لسماكة الطبقة المتآكلة مع مرور الزمن التشغيل.

الإضافة الجديدة، تؤكد الدراسة الاتجاه نفسه من حيث استقرار الهافنيوم نسبياً، لكنها تضيف بُعداً رقمياً جديداً، حيث أظهر الفانديوم أقل معدل تآكل، وهو ما لم يذكر في التقرير السابق.

2. مقارنة مع دراسة اللجنة الدولية لسلامة المفاعلات ICRS (2000) [2]

ذكرت اللجنة الدولية لسلامة المفاعلات أن المواد ذات المقطع العرضي الكبير لامتناس النيوترونات (مثل البورون والكاميوم) تتآكل إشعاعياً بمعدل مرتفع نتيجة التحولات النووية. وهذا يتطابق مع نتائج الجدول (2)، حيث أظهر البورون أكبر سماكة متآكلة، بينما الكادميوم أقل نسبياً. وبالتالي، لغة الأرقام في هذه الدراسة تدعم نتائج ICRS وتقدم تقديراً كمياً لمعدل التآكل لم يكن متاحاً سابقاً.

3. مقارنة مع الدراسة الأوروبية ENEA (2010) [3]

خلصت الدراسة الأوروبية إلى أن الهافنيوم من أفضل المواد مقاومة للتآكل في البيئات النيوترونية عالية التدفق، بمعدل أقل من 0.5 mm/year في الظروف المعتادة. في المقابل، تُظهر نتائج الجدول (2) أن الهافنيوم يتآكل بمعدل 1.03 mm/year.

يرجع الاختلاف إلى أن هذه الدراسة استخدمت نموذجاً تحليلياً يعتمد على التركيز الذري والمقطع العرضي النووي، بينما ركزت دراسة ENEA على التأثيرات الحرارية. لذلك، نتائج دراستنا توسع دراسة ENEA، بإضافة التأثيرات النووية المباشرة على التآكل.

4. مقارنة مع دراسات NRC و Westinghouse (1988–2020) [6,9]

توصي هذه الدراسات باستبدال قضبان التحكم كل 5-10 سنوات بسبب التدهور الإشعاعي، لكنها لا تحدد سماكة التآكل المتوقعة. بينما نتائجننا في الجدول (2) تُظهر هذه السماكة بعد 5 سنوات، وهذا يعني أن الحد العملي لعمر القضيب يتوافق مع وصول سماكة التآكل إلى 5 – 6 mm، ما يدعم نموذجنا التحليلي كمؤشر لتحديد زمن الاستبدال الأمثل دون اختبارات مكلفة.

يوضح الجدول (4) أسعار المواد التي تم تطبيق علاقتنا عليها مقدره بالدولار الأمريكي لكل كيلو غرام.

**الجدول (4):** أسعار المواد التي تم تطبيق علاقتنا عليها مقدره بالدولار الأمريكي لكل كيلو غرام.

السعر بالدولار الأمريكي	المادة مقدره بالكيلو غرام
10-20	الفانديوم
450	التنتاليوم
800-1000	الفضة
5-10	البورون
6-10	الكادميوم
1000-2000	الهافنيوم

من الناحية الاقتصادية إذا ما نظرنا إلى أسعار المواد التي تم تطبيق دراستنا عليها، نجد أن الفانديوم هو الأفضل من حيث الكلفة والمقاومة للإشعاع وامتصاص النيوترونات.

## 8. الاستنتاجات

1. تم استنتاج علاقة تحليلية جديدة توصف سماكة الطبقة المتأكلة إشعاعياً في قضبان التحكم في المفاعل النووي.
2. إن الفانديوم V يعتبر الأفضل في صناعة قضبان التحكم في المفاعل النووي، وذلك بسبب صغر سماكة الطبقة المتأكلة إشعاعياً مقارنة بغيره وكلفته الاقتصادية المنخفضة نسبياً.
3. على الرغم من المقطع العرضي للأسر للبورون  $B^{10}$  كبير جداً إلا أنه يتآكل بشكل كبير إشعاعياً وذلك بسبب صغر تركيزه أي كثافته.

## 9. التوصيات

1. نوصي بصناعة حواف قضبان التحكم على شكل طبقات سهلة الفك والتركيب، ليتم استبدال الطبقة الأخيرة بشكل سنوي، دون الحاجة إلى استبدال قضيب التحكم بشكل كامل.
2. نوصي بصناعة قضبان التحكم في المفاعل النووي من سبائك تجمع بين المواد ذات المقطع العرضي الكبير للأسر والمواد ذات التركيز الكبير.
3. نوصي بإجراء دراسة تأخذ تأثير كل من العوامل درجة الحرارة والضغط والرطوبة على سماكة الطبقة المتآكلة في قضبان التحكم في المفاعل النووي.

## 10. Reference

- [1] International Atomic Energy Agency, Nuclear Reactor Safety, Vienna, 1996.
- [2] International Commission on Radiological Safety, Report on Nuclear Reactor Safety, Paris, 2000.
- [3] European Nuclear Energy Agency, Study on the Corrosion of Control Rods in Nuclear Reactors, Rome, 2010.
- [4] U.S. Atomic Energy Commission, The B Reactor, 1952.
- [5] International Atomic Energy Agency (IAEA), Design and Operation of Nuclear Power Plants, 1974.
- [6] U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), Safety Evaluation Report, 1988.
- [7] International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Safety and Technology, 2018.
- [8] (American Society of Mechanical Engineers (ASME, Nuclear Reactor Operation, 2019.
- [9] Westinghouse Electric Company, Nuclear Reactor Operation Manual, 2020.

## الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتيت الصوديوم

حلا سلمان\*، نهلة إبراهيم\*\*، علي داود\*\*\*

### ملخص البحث

هدفت الدراسة الحالية إلى اختبار التأثيرات الوقائية المحتملة للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود ضد السمية الكبدية والتلف النسيجي المستحدث بنترتيت الصوديوم في ذكور الفئران ، وتحديد التغيرات النسيجية المرافقة لذلك. أجريت الدراسة على 24 من ذكور الفئران البالغة ، وقسمت بالتساوي إلى 4 مجموعات ، تمت معاملتها يومياً لمدة 12 شهر ، على النحو التالي : المجموعة الأولى: (شاهدة)، المجموعة الثانية: جرعت بالمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود (200 ملغ/كغ من وزن الجسم) مرة واحدة يومياً ، كما جرعت المجموعة الثالثة : بنترتيت الصوديوم (80 ملغ/كغ) يومياً ، في حين جرعت المجموعة الرابعة: بشكل متزامن بكل من مستخلص التوت الأسود وبنترتيت الصوديوم بنفس الطريقة والجرعات السابقة ، وفي نهاية التجربة جمعت عينات من كبد الفئران للفحص النسيجي. أكدت نتائج الدراسة النسيجية لأكباد المجموعة المجرّعة بنترتيت الصوديوم ظهور تنخر خلوي شديد وتخرب في النوى ، وحدوث تنكس دهني و مائي، وأيضاً لوحظ اتساع واحتقان وعائي ، و ارتشاح التهابي شديد للعدلات واللمفاويات ، بينما أكدت نتائج الفحص النسيجي للمجموعة الرابعة ، الفعالية الإيجابية لنبات التوت على تلف كبد الفئران المستحدث فيها السمية الكبدية بنترتيت الصوديوم ، فقد لوحظ تحسن ملحوظ في أنسجة الكبد ، و استعادت جزءاً مهماً من عافيتها وياتت أقرب للبنية الطبيعية للكبد.

الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرعة بمادة نترت الصوديوم

كلمات مفتاحية: سمية كبدية ، نترت الصوديوم ، مستخلص التوت الأسود ، دراسة نسيجية-

الفئران.

(\* طالبة دراسات عليا (دكتوراه) -قسم علم الحياة الحيوانية - كلية العلوم -جامعة اللاذقية -اللاذقية- سورية.

(\*\* أستاذ مساعد- قسم علم الحياة الحيوانية- كلية العلوم-جامعة اللاذقية-اللاذقية-سورية .

(\*\*\* أستاذ مساعد - قسم التشريح المرضي - كلية الطب البشري- جامعة اللاذقية.

## Protective properties of the alcoholic extract of the *Morus nigra* plant on the liver of rats dosed with sodium nitrite

Hala Salman \*, Nahla Ebrahim\*\*, Ali Daoud \*\*\*

### Abstract

The present study aimed to test the potential protective effects of the alcoholic extract of *Morus nigra* plant against sodium nitrite-induced hepatotoxicity and tissue damage in male mice, and to identify the associated histological changes. The study was conducted on 24 adult male mice, divided equally into 4 groups, which were treated daily for 12 months, as follows: Group 1: (control), Group 2: dosed with *Morus nigra* alcoholic extract (200 mg/kg body weight) once daily, The third group was given sodium nitrite (80 mg/kg) daily, while the fourth group was given simultaneously *Morus nigra* extract and sodium nitrite in the same manner and doses as before. At the end of the experiment, samples were collected from the mice's liver for histological examination. The results of the histological study of the livers of the group dosed with sodium nitrite confirmed the appearance of severe cellular necrosis and nuclei destruction, the occurrence of fatty and watery degeneration, and also vascular dilation and congestion, and severe inflammatory infiltration of neutrophils and lymphocytes were observed, While the results of the histological examination of the fourth group confirmed the positive effectiveness of the *Morus nigra* plant on liver damage in mice induced by hepatotoxicity with sodium nitrite, a significant improvement was observed in the liver tissue, and it regained a significant part of its health and became closer to the natural structure of the liver.

**Keywords:** *Hepatotoxicity, sodium nitrite, blackberry extract, histological study, mice.*

\*) PhD student, animal department, faculty of science, Latakia university, Latakia, Syria

الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتيت الصوديوم

- \*\*\*) Associate professor, animal department, faculty of science, Latakia university, Latakia,  
\*\*\*\*) Associated Professor, Faculty of Medicin- lattakia Univerity ,  
lattakia ,Syria

### 1. مقدمة:

تعد النباتات مصدراً مهماً لصناعة الكثير من العقاقير الطبية ، و بديلاً فعالاً عن العلاج باستخدام الأدوية التقليدية المصنعة كيميائياً التي ظهر لها العديد من الأضرار الجانبية ، وتعود أهمية النباتات نظراً لتوفرها وعدم وجود تأثيرات جانبية لها ، إضافةً إلى إحتوائها على الكثير من المواد الكيميائية الصيدلانية ذات الفعالية البيولوجية، و الخصائص المضادة للأكسدة [1]، و التي تتميز بالتأثيرات الوقائية والعلاجية من الأمراض التي تصيب الجسم بما فيها الأمراض البكتيرية والفطرية والسرطانية، و السمية الكبدية التي تنتج من أسباب مختلفة، كالملوثات البيئية في الطبيعة، و العديد من السموم [2] ، و من أهمها المضافات الغذائية Food additives ذات الإستخدام المتزايد والواسع الإنتشار في الصناعات الغذائية ، و التي تستخدم بهدف تحسين النكهة، اللون، المظهر و القوام للكثير من الأطعمة، و من أهمها المواد الحافظة التي تستعمل لتنشيط نمو الأحياء الدقيقة كالفطريات والجراثيم ، والحفظ من التلف، إلا أن استخدامها المفرط سبب آثار جانبية خطيرة ، و إجهاد تأكسدي نتج عنه أذية نسيجية و تتخرات كبدية شديدة قد تصل إلى النوى [3]، و من أهم هذه المضافات نترت الصوديوم  $\text{NaNO}_2$  [4] ، إذ يستخدم في حفظ اللحوم والدواجن والأسماك و منع تلفها، والحفاظ على لونها ونكهتها [5] ، لكن على الرغم من ذلك، سبب استخدامه الواسع و بتركيز عالية من قبل البشر أضراراً شديدة [6] ، حيث يسبب السمية الكبدية [7]، كما يسبب تلف للخلايا و الأنسجة [8] انطلاقاً من ذلك، زاد الاهتمام في الأبحاث الحديثة بالعلاج الشعبي باستخدام المستخلصات النباتية، كما تمّ عزل مركباتها لدراسة تأثيراتها الوقائية والعلاجية، و من أهم هذه النباتات هو التوت الأسود *Morus nigra L.* ، الذي يتميز بغناه بمضادات الأكسدة التي لها دور أساسي في علاج العديد من الأمراض كتصلب الشرايين [9]، كما تتمتع بخصائص مضادة للسرطانات [10]، وقد أظهرت العديد من الدراسات الدور الهام لنبات التوت الأسود في خفض السمية الكبدية والإجهاد التأكسدي الذي يسببه عدد

## الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرعة بمادة نترتيرت الصوديوم

من المركبات منها فلوريد الصوديوم [11] ، و مركب Benzo(a) pyrene [12] و الرصاص [13]، وكذلك الوقاية من تلف خلايا الكبد التي يسببها ديكلوفيناك الصوديوم [14]، و Thioacetamide [15]، انطلاقاً مما سبق، ونظراً لقلة الدراسات التي تناولت تأثير ثمار التوت الأسود ضد السمية الكبدية بنترتيرت الصوديوم ، لذلك تضمنت دراستنا الحالية تقييم الأذية الكبدية المحدثة بنترتيرت الصوديوم، كما تم دراسة فعالية المستخلص الكحولي للتوت الأسود في الحد من السمية الكبدية الناتجة عن  $\text{NaNO}_2$  ، و بالتالي إمكانية استخدامه في المستحضرات الصيدلانية.

### 2- أهمية البحث وأهدافه:

تتبع أهمية البحث من التحري عن التأثيرات الضارة المحتملة النسيجية والبنوية في خلايا وأنسجة كبد الفئران البيضاء الناتجة عن التجريع بنترتيرت الصوديوم  $\text{NaNO}_2$ ، وكذلك تقصي تأثير مستخلص التوت الأسود ودوره الوقائي في حيوانات التجربة، يمكن لنتائج هذه الدراسة أن تمثل إضافة جديدة في التحري عن التأثير الوقائي للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود في الحد أو القليل من الآثار الجانبية الناتجة عن مادة نترتيرت الصوديوم.

أهداف البحث : تهدف الدراسة الحالية إلى الآتي:

- 1- دراسة التغيرات النسيجية المحدثة في كبد الفئران البيضاء نتيجة تجريعها بنترتيرت الصوديوم  $\text{NaNO}_2$  من خلال دراسة التغيرات في الشكل العام للنسيج الكبدي مع بنية الخلايا.
- 2- تقصي تأثير المستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على أنسجة كبد الفئران البيضاء .
- 3- اختبار الفعل الوقائي المحتمل الناتج عن تجريع المستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود في الحد من التسمم الكبدي المستحدث بنترتيرت الصوديوم  $\text{NaNO}_2$  عند الفئران البيضاء.

### 3- طرائق البحث ومواده:

3-1- حيوانات التجربة: أجريت الدراسة على أربع وعشرون من ذكور الفئران البيضاء Albino male Mice نوع Mus musculus سلالة Balb-c ، بعمر 3-4 أشهر ، ووزن 25-34 غ وسطياً ، تم الحصول عليها من مركز البحوث العلمية في محافظة دمشق . وضعت في أقفاص بلاستيكية خاصة ذات أرضية مفروشة بنشارة الخشب ، في مختبر قسم علم الحياة الحيوانية جامعة اللاذقية ، لمدة 10 - 6 أسابيع قبل بدء التجربة من أجل التكيف مع الظروف المناسبة وبدرجة حرارة الغرفة و قدم لها الغذاء والماء بشكل دوري .

3-2- تحضير المستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود: جمعت ثمار التوت الأسود من منطقة جبلة ، وغسلت بالماء المقطر ، تركت لتجف في الظل لمدة أسبوع ، ثم طحنت بواسطة مطحنة كهربائية ، نقع (70غ) من مسحوق التوت الأسود في 500مل من الكحول الإيثيلي 70% في درجة حرارة الغرفة لمدة 24 ساعة ، ثم خلطت بواسطة الخلاط المغناطيسي لمدة ساعة ، وحُضنت بدرجة حرارة المخبر لمدة 72 ساعة ، ثم تم ترشيح المستخلص باستخدام الشاش الطبي ، ثم رُشح المستخلص باستخدام ورق ترشيح Whatman #1 ، وتم التخلص من المذيب بالمبخار الدوار بدرجة حرارة 40 درجة مئوية ، ثم جفف بالفرن الكهربائي بدرجة حرارة 40 درجة مئوية للحصول على مستخلص جاف ، تم تخزين المستخلص في الدرجة (-4) م إلى حين الاستخدام [16] ، تمت هذه المراحل في مختبر قسم علم الحياة الحيوانية جامعة اللاذقية بالتعاون مع مختبر المعهد العالي للبحوث البحرية جامعة اللاذقية .

3-3- استحداث السمية الكبدية تجريبياً: استُحدثت السمية من خلال تجريع الفئران بنتريت الصوديوم (NaNO<sub>2</sub>) فموياً بجرعة 80 ملغ/كغ من وزن الجسم يومياً بواسطة أنبوب تغذية ، وذلك بعد إذابة 1غ من بودرة نترتيت الصوديوم في 10 مل من الماء المقطر [17] ، تم شراؤه بشكل بودرة انتاج شركة (E. Merck Darmstadt) ، بلد المنشأ (ألمانيا Germany) .

### 3-4- تصميم التجربة Study Design:

وُزِعَ 24 من الفئران عشوائياً في 4 مجموعات 6 فئران لكل مجموعة ، على النحو الآتي:

1-المجموعة الأولى: شاهدة سلبية جُرعت ماء مقطر وبجرعة ( 2 مل) يومياً لمدة 12 شهر .

2-المجموعة الثانية: جُرعت يومياً بالمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود بوساطة التغذية الأنبوية بجرعة قدرها 200 ملغ/كغ من وزن الجسم ولمدة 12 شهر .

3-المجموعة الثالثة : جُرعت بنترتير الصوديوم بالطريقة السابقة نفسها (تغذية أنبوية) بتركيز قدره 80 ملغ/كغ من وزن الجسم يومياً لمدة 12 شهر [18].

4- المجموعة الرابعة: جُرعت بمستخلص التوت لمدة أسبوعين يومياً قبل التجريع بنترتير الصوديوم ، ثم الإستمرار بالتجريع بالتزامن مع نترتير الصوديوم لمدة 12 شهر .

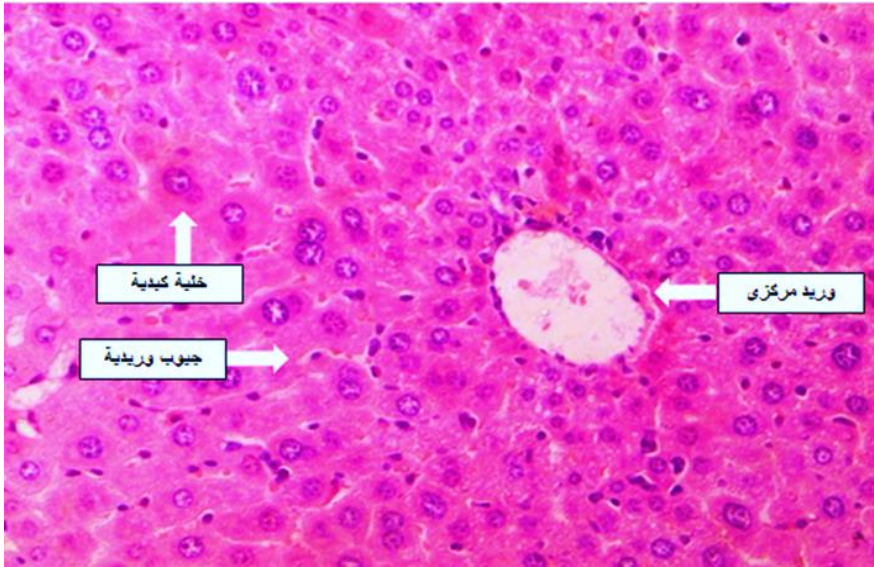
بعد انتهاء مدة التجربة تم تخدير جميع الحيوانات بالكلوروفورم، ثم تم تشريح الفئران واستئصال كبد كل حيوان على حده ، وحفظت بشكل مستقل في عبوات بلاستيكية سعة 50 مل وتحتوي على محلول الفورمالين بتركيز 10% لمدة 48 ساعة لحين إجراء الدراسة النسيجية.

3-5- الدراسة النسيجية: أجريت الدراسة النسيجية بالتعاون مع قسم التشريح المرضي في مشفى تشرين الجامعي، جُهزت عينات أكباد حيوانات التجربة لإجراء المقاطع النسيجية وذلك بإمرارها بمراحل التحضير الروتينية التي تتضمن المعالجة بالكحول التجاري ، ثم الكحول المطلق ومن ثم الكزايلين ، ثم صببت بقوالب البارافين. وأجريت المقاطع النسيجية باستخدام المقطاع النسيجي (Meditome A 550)، وبسماكة 5 ميكرون ، عُولجت بمحاليل الكحول والكزايلين تمهيداً لتلوينها بالهيماتوكسيلين- ايوزين بالإعتماد على طريقة [19] ، ثم درست المحضرات النسيجية مجهرياً باستخدام مجهر ضوئي مجهز بكاميرا رقمية.

### 4-النتائج والمناقشة :

### 1-بنية نسيج الكبد لحيوانات المجموعة التجريبية الأولى (الشاهدة):

أظهر الفحص النسيجي لكبد حيوانات المجموعة الشاهدة بنية فصيصية طبيعية، ووريد مركزي طبيعي مع خلايا كبدية ذات أحجام وأشكال منتظمة ، وتحتوي أنوية مركزية.



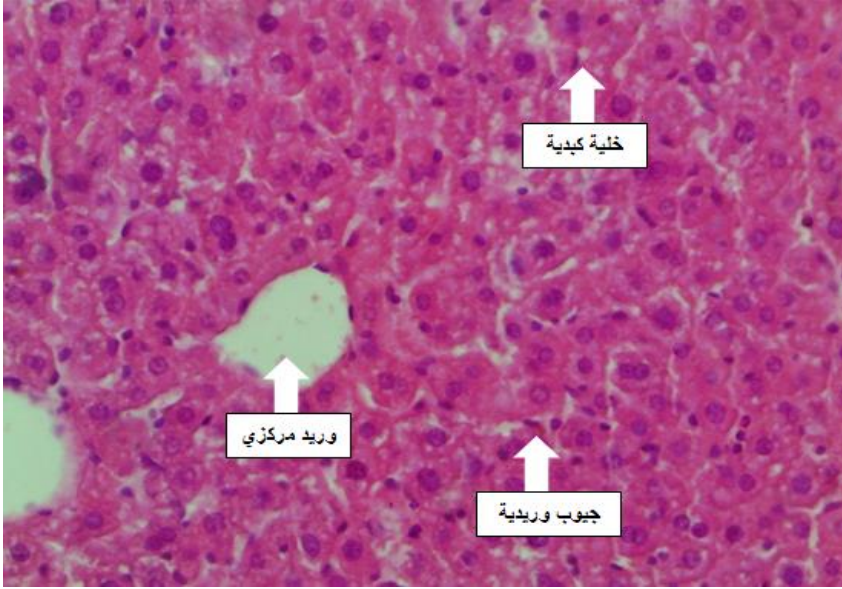
الشكل (1): مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الشاهدة (40 X).

### 2- تأثير التجريع بالمستخلص الكحولي لنبات التوت على نسيج الكبد :

لوحظ في أكباد حيوانات المجموعة التجريبية الثانية المجرعة بالمستخلص الكحولي لنبات التوت بجرعة (200 ملغ/كغ من وزن الجسم) مرة واحدة يومياً لمدة 12 شهر خلايا كبدية طبيعية بمظهرها وبنيتها و مماثلة للخلايا الكبدية لحيوانات المجموعة الشاهدة، حيث لوحظ المظهر العام للفصيصات الكبدية تبدو طبيعية، كما أن أشكال وأحجام الخلايا ودرجة تلون السيتوبلازما الخلوية

الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتيت الصوديوم

طبيعية ، وشكل الأنوية يبدو طبيعي، ولم تشاهد أية تغييرات خلوية ذات دلالة على ضرر نسيجي أو احتقان أو بؤر التهابية بفعل تجريع الحيوانات بمستخلص التوت.

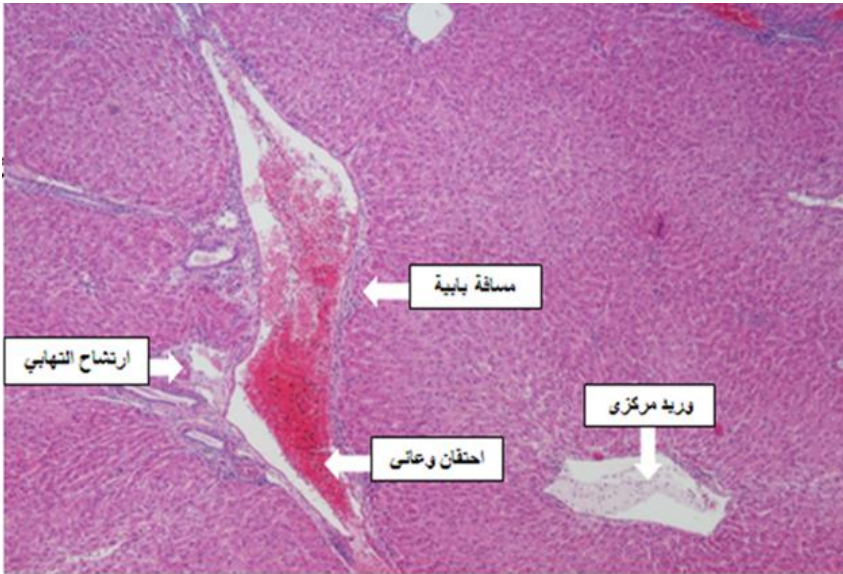


الشكل (2) : مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الثانية ( 40X ).

### 3-تأثير التجريع بنترتيت الصوديوم على نسيج الكبد :

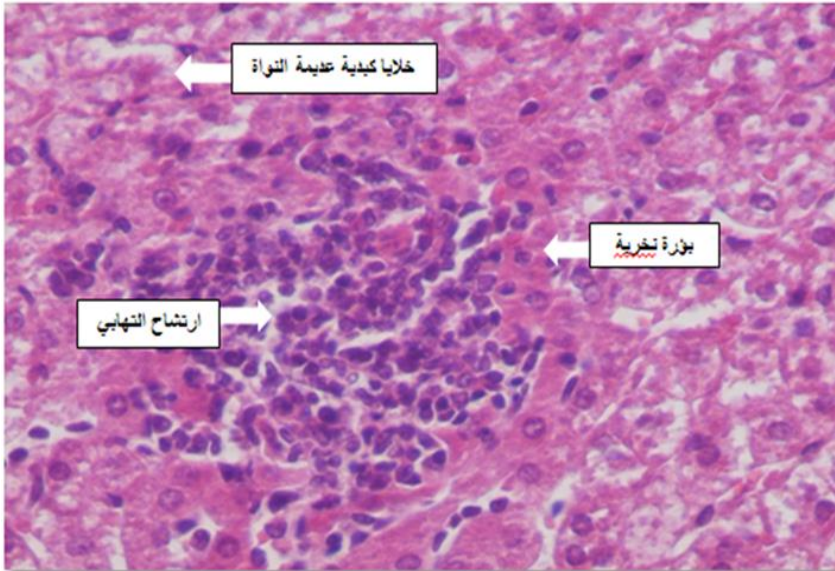
أظهرت نتائج الدراسة النسيجية لأكباد حيوانات المجموعة الثالثة المجرعة بنترتيت الصوديوم تخرب البنية الفصيضية للكبد ، كما ظهرت علامات واضحة لتخر Necrosis شديد في الخلايا الكبدية تمتد على مساحات واسعة لتشكل بؤر نخرية ، ولوحظ انتباج Cellular Swelling حاد ومتكرر في الخلايا الكبدية وزيادة في حجمها، وتمزق أغشيتها السيتوبلاسمية ، وضعف شديد في تلون السيتوبلازما ، وعدم وضوح حدود الخلايا الكبدية، إضافة إلى ضمور نوى العديد من الخلايا (نوى منقطة) ، وفقدان العديد من الخلايا الأخرى لأنويتها، كما تبين وجود تنكس دهني Fatty degeneration و تنكس مائي Hydropic Degeneration، وأيضًا لوحظ اتساع و احتقان

وعائي Vascular congestion في الأوردة المركزية (CV) والبابية للكبد ، وتكاثر لخلايا كوففر Neutrophils cells Kupffer ، وحدوث ارتشاح التهابي شديد لخلايا الدم البيض من عدلات Lymphocytes ولمفاويات إلى أماكن عديدة في نسيج الكبد المتضرر وبخاصة في المسافات البابية .

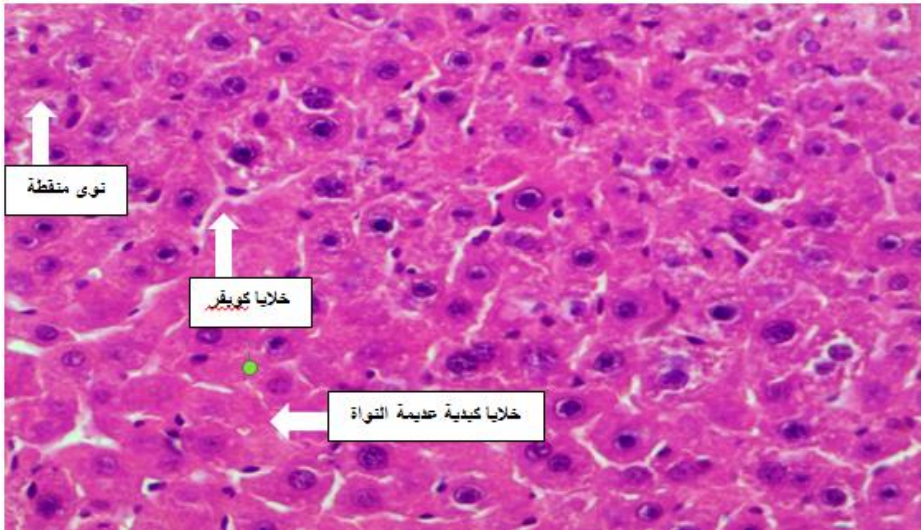


الشكل (3) : مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الثالثة . (x100)

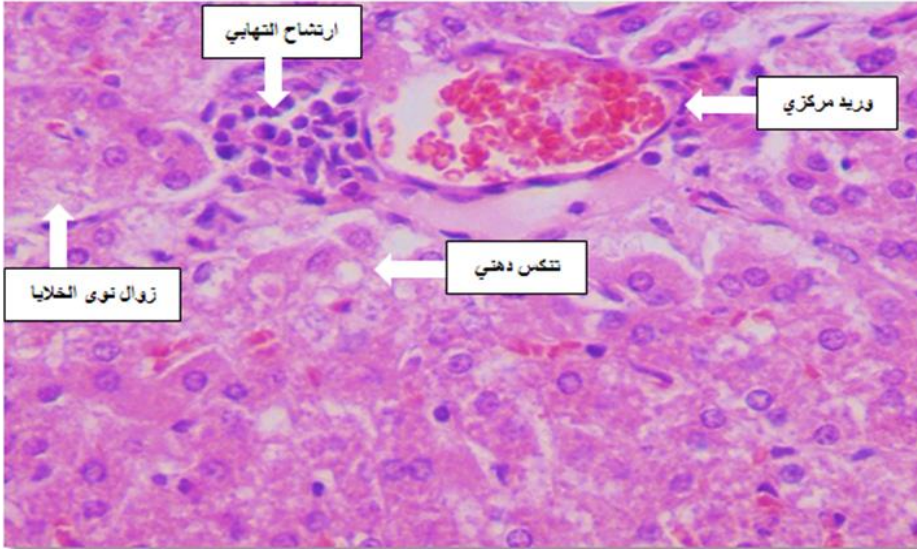
الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتيت الصوديوم



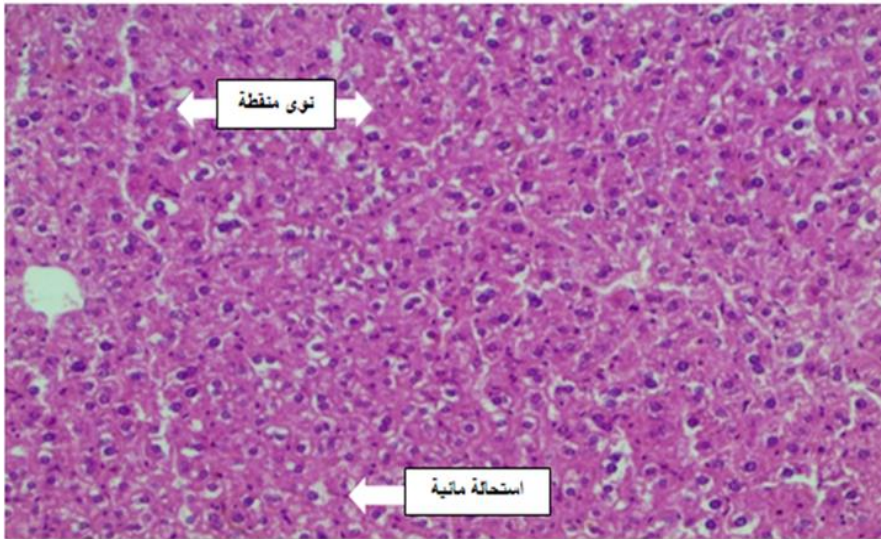
الشكل (4) : مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الثالثة. (40 x)



الشكل (5) : مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الثالثة . (40X)



شكل(6): مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الثالثة . ( 40x )

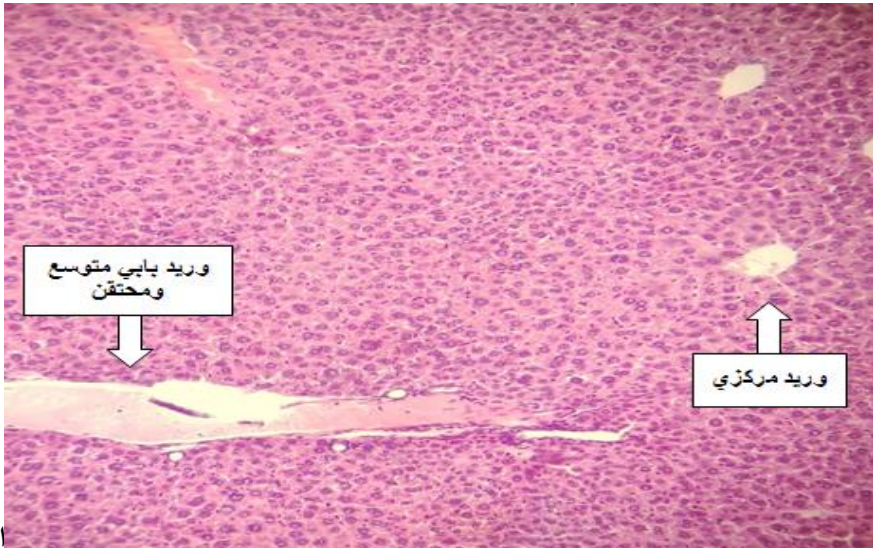


الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتيت الصوديوم

الشكل (7) :مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الثالثة (20x).

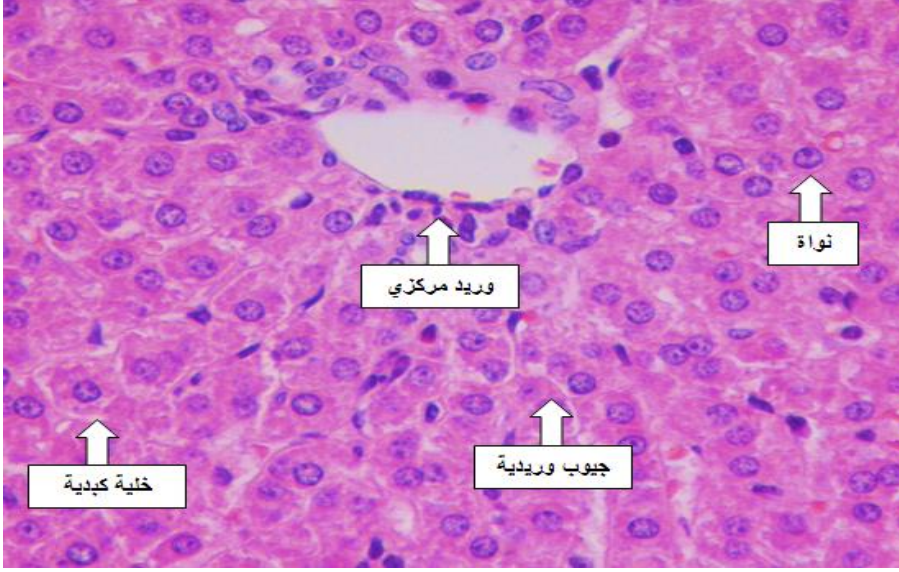
4-تأثير التجريع المتزامن بنترتيت الصوديوم مع المستخلص الكحولي لنبات التوت في نسيج الكبد:

أظهرت نتائج الدراسة النسيجية لحيوانات المجموعة الرابعة المجرعة بنترتيت الصوديوم يوماً بالتزامن مع المستخلص الكحولي للتوت الأسود تحسن ملحوظ في النسيج الكبدي فقد لوحظ التركيب الطبيعي لنسيج الكبد و الخلايا الكبدية قريبة من الطبيعي وذات أنوية مركزية طبيعية مع إعادة انتظام الحبال الكبدية حول الوريد المركزي ، كما لوحظ زوال لإنتباج الخلايا الكبدية ، ظهرت تغيرات نسيجية قليلة بالمقارنة مع المجموعة الثالثة المجرعة بنترتيت الصوديوم فقط ، تمثلت هذه التغيرات بظهور احتقان خفيف ، وتوسع في الوريد البابي.



الشكل

(8) : مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الرابعة. (10X)



الشكل (9): مقطع نسيجي مجهري في كبد حيوانات المجموعة الرابعة. (40x)

تتفق نتائج دراستنا مع Albasha وآخرون (2022) الذي أكد على حدوث تغيرات نسيجية مرضية في أنسجة كبد الأرنب تتجلى بتنخرات خلوية، وظهور تورم وفجوات دهنية، و اتساع واحتقان في الوريد المركزي، بالإضافة إلى ارتشاح لخلايا الدم البيضاء نتيجة التجريع بنترتيت الصوديوم [20]، كما تتفق مع Akhzari وآخرون (2019) فقد أوضح أن تجريع الجرذان فموياً بمادة نترتيت الصوديوم وبتركيز 80 ملغم/كغم من وزن الجسم أدى إلى الإجهاد التأكسدي في نسيج الكبد وإنتاج بيروكسيد الدهون الناجم عن نترتيت الصوديوم واختلال غشاء خلايا الكبد [21]، و تتفق نتائجنا مع دراسة El-Nabarawy وآخرون (2020) التي جُرعت فيها الجرذان البالغة فموياً بمادة نترتيت الصوديوم وبتراكيز تصاعديّة حيث كشفت عن تغيرات مورفولوجية غير طبيعية تمثلت بتنكس وتنخر في بعض خلايا الكبد تتناسب مع جرعات النترتيت المعطاة [7]، كذلك تتوافق مع

## الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتريت الصوديوم

نتائج أبحاث أخرى بينت أن نترتريت الصوديوم يحدث تغيرات نسيجية مرضية في أعضاء مختلفة من الجسم [22]، من جهة أخرى اتفقت نتائجنا مع نتائج الدراسات والأبحاث العلمية التي أوضحت دور عصير التوت الأسود في خفض السمية الكبدية والإجهاد التأكسدي لفلوريد الصوديوم [11]، بالإضافة إلى دراسة Hassan وآخرون (2017) الذي أكدّ على التأثير الوقائي لمستخلصات التوت ضد تلف الحمض النووي الناتج عن ديكلوفيناك الصوديوم [14]، كما تتفق مع دراسة Hammoud وآخرون (2018) الذي بين النشاط الكبير المضاد للأكسدة والمضاد للسرطان لأوراق وثمار التوت ، بالإضافة إلى تأثيرها الوقائي ضد سمية الرصاص [13]، ومع دراسة Mehram and Sayed Ahmed (2020) الذي أثبت الأثر الوقائي لأوراق التوت على اضطرابات كبد الفئران التي يسببها مركب البنزو-أ-بيرين [12].

وقد يعود التأثير السام لنترتريت الصوديوم على الخلايا الكبدية الذي تجلى بتخرّب البنية الفصيصة الكبدية ، و تنخر شديد بالخلايا الكبدية ، و ظهور بؤر نخرية لكونه يتفاعل مع الأمينات الموجودة في الوسط الحمضي للمعدة ، مما يولد النتروزأمين Nitrosamine ، الذي يتفاعل بدوره مع القواعد الأزوتية الداخلة بتركيب الـ DNA ، مما يؤدي إلى تغيرات في تركيب الجينات [20] ، كما ينتج العديد من الجذور الحرة (ROS) التي تحفز أكسدة الدهون Lipid peroxidation خاصة في غشاء الخلية مما يضعف غشاء الخلية ويؤدي إلى تفككه ، وبالتالي تنخر الخلايا الكبدية [21] ، كما أنها تهاجم مكونات الخلية الأساسية مثل الدهون والبروتينات والأحماض النووية مما يؤدي إلى إتلافها وبالتالي يسبب الموت الخلوي Apoptosis [23] ، و يمكن أن يُعزى ذلك إلى زيادة نفاذية الميتاكوندريا نتيجة لزيادة الإجهاد التأكسدي الذي يؤدي إلى إطلاق أنزيم Cytochrome-C المحفز للموت الخلوي من خلال غشاء الميتاكوندريا ، و بالتالي تفعيل أنزيم Caspase-3 الذي يقوم بتفكيك الخلية [24]، وقد يمتد النخر ليصل إلى نوى الخلايا مما يسبب ضمورها أو اختفائها، وبالتالي ينتج العديد من التغيرات النسيجية المرضية غير القابلة

للرجوع أو الإصلاح [25]، كما يعود الاحتقان الكبدي إلى ارتفاع الضغط داخل المنطقة البابية و في بعض المناطق في الكبد مثل الوريد المركزي نتيجة التأثير السام لنتريت الصوديوم عند تناوله بشكل مستمر ، مما يسبب ضعف التصريف الدموي نتيجة لإسداد وريدي كبدي ،وبالتالي توقف أو تعطيل للانسحاب الدموي خلال الخلايا الكبدية [26] ، وزيادة اتساع الوريد المركزي وتراكم خلايا الدم الحمراء المتحللة [27] ، كما لوحظ بنتائج دراستنا حدوث ارتشاح التهابي شديد لخلايا الدم البيض من عدلات Neutrophils ولمفاويات Lymphocytes إلى أماكن عديدة في نسيج الكبد المتضرر وبخاصة في المسافات البابية ، و التي تطلق كميات كبيرة من المواد المؤكسدة مثل فوق أكسيد الهيدروجين  $H_2O_2$  الذي قد يسبب تلف للأنسجة والعديد من الخلايا الكبدية [28]، أو يمكن تفسير وجود خلايا التهابية مرتشحة إلى وجود تغيرات تنكسية في نسيج الكبد أدت إلى إفرازه عوامل الجذب الكيميائية و ارتشاح خلايا الدم البيضاء إلى الأنسجة المتضررة ، لمعالجة الالتهاب و للدفاع عن الجسم [29]، كما لوحظ تكاثر بخلايا كوبفر في الجيبانيات للمساهمة في الدفاع عن المنطقة المتضررة [30]، ومن المرجح أن يكون سبب إصابة العديد من الخلايا الكبدية بالتتكس المائي Hydropic degeneration الذي يتجلى بتضخم الخلية الكبدية و تكون الفجوات في سيتوبلازما الخلايا الكبدية و ترسب كميات من الماء داخلها مما يسبب ضعف شديد في تلون السيتوبلازما، إلى حدوث تلف للخلايا الكبدية وغشاء الخلية وهذا نتيجة للتأثير السام لنتريت الصوديوم ، فالإجهاد التأكسدي الناتج عن تجمع الجذور الحرة في الكبد يسبب تحطم الخلايا الكبدية [31]، كما يعود التتكس الدهني في العديد من الخلايا الكبدية الذي يتجلى بتجمع للقطيرات الدهنية في الخلايا الكبدية وانزياح النوى إلى محيط الخلية إلى التراكم غير الطبيعي للدهون الثلاثية في خلايا الكبد [32]، وذلك يحدث عندما يتجاوز كمية الأحماض الدهنية الكبدية القدرة على التخلص منها فيتم تخزينها على شكل دهون ثلاثية Triglycerides في الخلايا الكبدية، و

## الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتيت الصوديوم

إزاحة نوى الخلايا إلى الجوانب [33]، ويمكن تفسير هذا التغيير الخلوي على أساس تناقص مستوى مركب ATP نتيجة التغيرات العشائية في الميتوكوندريا، فتتأثر عملية تصنيع البروتين المعتمدة على الطاقة، وبالتالي تقل الإستفاده من الدهون في عملية تكوين البروتينات الدهنية Lipoproteins والتي قد تتوقف، فتتراكم الدهون بهيئة قطيرات داخل سيتوبلازما الخلايا [34]،

من جانب آخر، يمكن أن تعود فعالية التوت الأسود في التخفيف من سمية نترتيت الصوديوم لما يحتويه التوت من مواد فعالة لها تأثير مضاد للأكسدة تعمل على التخلص من الجذور الحرة من خلال منح الكترول، و تنشيط مضادات الأكسدة الأنزيمية الموجودة في الجسم والتي بدورها تعمل على تثبيط الاجهاد التأكسدي وبيروكسيد الدهون، وإصلاح التلف الحاصل في الكبد و الإصابة الناتجة التي أحدثها نترتيت الصوديوم، منها الكاتشينييات الكاسحة للجذور الحرة [16]، و الريسفيراترول والروتين rutin والكريسيتين quercetin [35] كما تحتوي على الفلافونويدات والأنتوسيانين [36] والكاروتينات ذات الخصائص المضادة للأكسدة و المضادة للسرطان [16] والتي تبطئ من نمو الخلايا السرطانية [18] .

### 5-الاستنتاجات والتوصيات: نستنتج من دراستنا ما يلي:

-يؤدي التجريع بنترتيت الصوديوم إلى ظهور علامات تنخر خلوي واضحة تصل إلى النوى، تنكس دهني ومائي، انتباج خلوي، احتقان وعائي، و ارتشاح التهابي شديد، كما يؤدي المستخلص الكحولي للتوت الأسود دور وقائي هام لأنسجة الكبد من السمية الخلوية والتأثيرات الضارة المحدثة بنترتيت الصوديوم.

-ونوصي بالتقليل من استهلاك المواد الغذائية الحاوية على نترتيت الصوديوم، واستخدام التوت كمكمل غذائي في الطعام، و التعرف على المركبات الفعالة لنبات التوت وعزلها من أجل

استخدامها كمادة فعالة ضد اضطرابات الكبد، وإجراء المزيد من الأبحاث العلمية لدراسة تأثيرها على أجهزة الإنسان واستخدامها في العلاج الطبي.

6- المراجع references :

[1]. Salmerón-Manzano E, Garrido-Cardenas JA, Manzano-Agugliaro F. (2020) -Worldwide Research Trends on Medicinal Plants. Int J Environ Res Public Health. 12;17(10):3376.

[2]. De, A. K., and De, M. (2019)- Functional and Therapeutic Applications of Some Important Spices. In The Role of Functional Food Security in Global Health (pp. 499–510).

[3]. Al-Shinnawy, M. S. (2009)- Physiological effect of a food additive on some haematological and biochemical parameters of male albino rats. Egypt. Acad. J. Biol. Sci., A, Entomol., 2(1): 143-151.

[4]. Helal, E., Zahkok, S., Soliman, G., Al-Kassas, M., and Abdel Wahed, H. (2008)- Biochemical studies on the effect of sodium nitrite and/or glutathione treatment on male rats. J. Hosp. Med., 30(1): 25-38.

[5].Adewalea. O. O, Samuelb. E. S, Manuboluc. M, Pathakotid. K.(2019)- Curcumin protects sodium nitrite-induced hepatotoxicity in Wistar rats. Toxicology Reports.( 6 ).1006–1011.

[6]. Arnold, J. T., Lloyd, A. B., Bailey, S. J., Fujimoto, T., Matsutake, R., Takayanagi, M., and Fujii, N. (2020)- The nitric oxide dependence of cutaneous microvascular function to independent and combined hypoxic cold exposure. J. Appl. Physiol., 129(4): 947-956.

- [7]. El-Nabarawy, N. , Gouda, A. , Khattab, M, Rashed, L. (2020)- Effects of nitrite graded doses on hepatotoxicity and nephrotoxicity, histopathological alterations, and activation of apoptosis in adult rats. Environ. Sci. Pollut. Res. Int., 27(12): 14019-14032.
- [8]. Uslu, G. A., Hamit, U. S. L. U., and Adali, Y. (2019)- Hepatoprotective and nephroprotective effects of Trigonella foenum-graecum L. (Fenugreek) seed extract against sodium nitrite toxicity in rats. Biomed. Res. Thera., 6(5): 3142-3150.
- [9]. Chan EWC, Lye, PY, Wong SK. (2016)- Phytochemistry, pharmacology, and clinical trials of Morus alba. Chinese Journal of Natural Medicines; 14(1):0017-0030 .
- [10]. Hasimoto NM, Genovese MI, Lajola FM. (2008) - Absorption and metabolism of cyaniding-3-glucoside and cyaniding-3-rutinoside extracted from wild mulberry (Morus nigra L.) in rats. Natr Res.; 28(3):198-207.
- [11]. Hassan .H.A, Yousef. M.I.(2009)- Mitigating effects of antioxidant properties of black berry juice on sodium fluoride induced hepatotoxicity and oxidative stress in rats. Food and Chemical Toxicology 47 .2332–2337.
- [12]. Mehram.E.B and Sayed Ahmed.S.A.(2020)- Benzo(a)pyrene induced liver disorders in rats: possible protective effects of mulberry (Morus alba L.) leaves. Journal of Research in the Fields of Specific Education.6(28): 2735-3346.
- [13]. Hammoud.G.M , Ramis.E.S , ElSawy.KH.M.(2018)-In vitro and In vivo Studies on Mulberry Extracts: Evaluation of Chemical and Anticancer Activities and Attenuation of Lead Toxicity. Asian Journal of Research in Biochemistry.2(3): 1-14.

- [14]. Hassan, S.A, Sabry, D.A. , Hussein, M.A. (2017)- Protective Effect of Cranberry Extracts against Oxidative Stress and DNA Damage Induced by Diclofenac Sodium in Kidney of Male Albino Rate. Chinese Medicine , 8, 113-131.
- [15]. Abdel Rahman, H. Abdel Haq, N. Zaki, N.( 2020) - Protective effects of berries on the liver of rats infected with thioacetamide. Food Technology Research Institute. 101-112.( In Arabic).
- [16]. Arabshahi-Delouee S, Urooj A. (2007)-Antioxidant properties of various solvent extracts of mulberry (Morus indica L.) leaves. Food Chem;102:1233–1240
- [17]. Abdel-Reheim, E., Abdel-Hafeez, H., Mahmoud, B., and Abd-Allah, E. (2014)-Effect of food additives (monosodium glutamate and sodium nitrite) on some biochemical parameters in albino rats. International Journal of Bioassays, 3(08), 3260–3273.
- [18]. Michael C. Kohn. (2002)- Laboratory of Computational Biology and Risk Analysis, National Institute of Environmental Sciences. Vol. 30 (6) :676–683.
- [19]. Maity,T; Ahmad, A; Pahari, N; Subarna, G.(2012)- Hepatoprotective Activity of Mikania scandens (L.) willd. against diclofenac sodium induced liver toxicity in rats. asian j pharm clin res , Vol 5(2), 185-189.
- [20].Albasha.M, Azabelsayed.A, alsah.A. (2022)- The Potential Protective Effects of Olive Leaves Extract on Sodium Nitrite Induced Hepatorenal Toxicity in Male Rabbits .International Multilingual Journal of Science and Technology (IMJST) .ISSN: 2528-9810.Vol. 7 Issue 8.

[21]. Akhzari, M., Shafiee, S. M., Rashno, S., and Akmal, M. (2019)- Berberine attenuated oxidative stress induced by sodium nitrite in rat liver. Jundishapur J. Nat. Pharmaceut. Prod., 14(1): 1-8.

[22]. Ansari F, Ali S, Arif H, Mahmood R. (2017)- Acute oral dose of sodium nitrite induces redox imbalance, DNA damage, metabolic and histological changes in rat intestine. PLoS ONE 12(4): 0175196.

[23]. Obeid, A. K., Alsalame, H. A. A. A., and Abdulshahed, R. H. (2021)-The role of Moringa oleifera seed extract in amelioration of kidney injury induced by sodium nitrite in male rats. Anna. The Romanian Soc. Cell Bio., 25(2): 2392-2402.

[24]. Eissa, M. M., Ahmed, M. M., Abd Eldaim, M. A., Mousa, A. A., Elkirdasy, A. F., Mohamed, M. A., and Orabi, S. H. (2020)-Chlorella vulgaris ameliorates sodium nitrite-induced hepatotoxicity in rats. Environ. Sci. Pollut. Res., 28(8): 9731-9741.

[25]. Soliman, M. M., Aldhahrani, A., and Metwally, M. M. (2021)-Hepatoprotective effect of Thymus vulgaris extract on sodium nitrite-induced changes in oxidative stress, antioxidant and inflammatory marker expression. Sci. Rep., 11(1): 1-13.

[26]. Hama, A. A., Al-Masoudi, W. A., and Houat, A. J. R. (2020)- Histopathological study of amoxicillin drug derivative on rats treated with sodium nitrite. The 5th Int. Sci. Confer. Med. Health.

[27]. Eweka, A. O., and Om“Iniabohs, F. A. E. (2008)-Histological studies of the effects of monosodium glutamate on the liver of adult wistar rats. The Internet J. Gastroenterol., 6; available.

[28]. Sarsour, A. and Hassuneh, N. E. (2001)-The effect of sodium nitrite on some parameters of the immune system. Food Chem. Toxicol., 39(2): 119-24.

- [29]. Mir, S. H., Abdul-Baqui, Bhagat, R. C., Darzi, M. M., and Abdul-Wahid, S. (2008)-Biochemical and histomorphological study of streptozotocin-induced diabetes mellitus in rabbits. Pakistan J. Nutr., 7(2): 359-364.
- [30]. Majumdar, A. S., Saraf, M. N., Andrades, N. R., and Kamble, R. Y. (2008)-Preliminary studies on the antioxidant activity of Tribulus terrestris. and Eclipta alba. Phcog. Mag., 4(13): 102-107.
- [31]. Cheville, N. F. (2009)- Ultrastructural pathology: the comparative cellular basis of disease. John Wiley & Sons.
- [32]. Abed-Al-Azeez, L., Ali, A, Haba, M, (2015)-Study the protective effect of radish (Raphanus sativus) seeds extract against harmful effects of sodium nitrite on some physiological and histological parameters in male rabbits. Iraqi J. Biotechnol., 14(2): 59-78.
- [33].Babin, P. J., and Gibbons, G. F. (2009)-The evolution of plasma cholesterol: direct utility or a “spandrel” of hepatic lipid metabolism. Progress in lipid research, 48(2): 73-91.
- [34]. Cheville, N. F. , Rimler, R. A. (1989)- A protein toxin from Pasteurella multocida type D cause acute and chronic hepatic toxicity in rat. Vet. Pathol., 26: 148-157.
- [35]. Sethi, G. Rath, P. Chauhan, A. Ranjan, A. Choudhary, R. Ramniwas, S. Sak, K. Aggarwal, D. Rani, I. Tuli, H.S.( 2023)- Apoptotic Mechanisms of Quercetin in Liver Cancer: Recent Trends and Advancements. Pharmaceutics, 15, 712.
- [36]. Mohammadi, N., Farrell, M., O’Sullivan, L., Langan, A., Franchin, M., Azevedo, L., & Granato, D. (2024)- Effectiveness of anthocyanin-

الخصائص الوقائية للمستخلص الكحولي لنبات التوت الأسود على كبد الفئران المجرّعة بمادة نترتيت الصوديوم

containing foods and nutraceuticals in mitigating oxidative stress, inflammation, and cardiovascular health-related biomarkers: a systematic review of Parameters. Applied Sciences, 14(2), 821.

## Study of Thermodynamic and Kinetic of the Ionization Reaction of 4-Amino-3-hydroxynaphthalene-1-sulfonic Acid in Different Organic Solvents Using Electrical Conductivity

اشراف: أ.د. صالح الرحيل

طالبة الماجستير: الاء قمحية

### Abstract

This research investigated the electrochemical and kinetic behavior of 4-Amino-3-hydroxy naphthalene-1-sulfonic acid (AHNS) in methanol. Results demonstrated that methanol serves as the optimal solvent due to its high polarity and ability to form hydrogen bonds, which enhances the acid ionization process. The reaction followed first-order kinetics, with both the acid concentration and reaction rate decreasing over time. Temperature increase raised the rate constant from  $0.0036 \text{ min}^{-1}$  to  $0.0054 \text{ min}^{-1}$ , with an activation energy of  $14.29 \text{ kJ/mol}$ . The low activation energy value indicates that the reaction does not require a high energy barrier to occur. The results revealed that the dissociation process is non-spontaneous ( $\Delta G^\circ > 0$ ) and endothermic ( $\Delta H^\circ > 0$ ), while electrical conductivity showed a direct correlation with both concentration and time.

**Keywords:** Chemical Kinetics - Electrical Conductivity - Organic Solvents - Activation Energy - Acid Ionization.

## دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تأين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية

### ملخص البحث

تم في هذا البحث دراسة السلوك الكهروكيميائي والحركي لحمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك (AHNS) في الميثانول. أظهرت النتائج أن الميثانول يمثل المذيب الأمثل، ويعزى ذلك إلى قطبيته العالية وقدرته على تكوين روابط هيدروجينية، مما يعزز عملية تأين الحمض. اتبع التفاعل حركية المرتبة الأولى، حيث تناقص تركيز الحمض وسرعة التفاعل مع ازدياد الزمن. كما أدى مقدار ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة ثابت السرعة من  $0.0036\text{min}^{-1}$  إلى  $0.0054\text{min}^{-1}$ ، وبلغت طاقة التنشيط 14.29 كيلوجول/مول، حيث تشير قيمتها المنخفضة إلى أن التفاعل لا يحتاج إلى حاجز طاقة مرتفع للحدوث. بينت النتائج أن عملية التفكك غير تلقائية ( $\Delta G^\circ > 0$ ) وماصة للحرارة ( $\Delta H^\circ > 0$ )، مع ارتباط الناقلية الكهربائية بشكل طردي مع كل من التركيز والزمن.

**كلمات مفتاحية:** الحركية الكيميائية – الناقلية الكهربائية – المذيبات العضوية – طاقة التنشيط – تأين الحمض.

---

## 1- مقدمة:

تُعد دراسة الخواص الكهروكيميائية والحركية للمواد العضوية في المذيبات غير المائية من المجالات البحثية المهمة، نظراً لتطبيقاتها الواسعة في الصناعات الكيميائية والدوائية [1]. يعتمد سلوك الإلكتروليتات في المحاليل العضوية على عدة عوامل أهمها طبيعة المذيب وخصائصه الفيزيائية والكيميائية، يعتمد سلوك الأيونات في هذه المحاليل بشكل رئيسي على طبيعة المذيب، حيث تُحدد خصائص فيزيوكيميائية مثل ثابت العزل الكهربائي واللزوجة درجة تأين المذابات وسرعة انتقال الأيونات، مما ينعكس مباشرة على الناقلية الكهربائية الكلية للمحلول [2].

يُعتبر حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك (AHNS) مركباً عضوياً مهماً لاحتوائه على مجموعات وظيفية متعددة (سلفونيك، هيدروكسيل، أمين) تمنحه خصائص كيميائية مميزة. ترتبط هذه المجموعات مع جزيئات المذيب عبر روابط هيدروجينية، مما يؤثر على درجة تأين الحمض وسلوكه الكهروكيميائي [3].

قام الباحث محسن إيرنداوست عام 2018 بقياس كميات ضئيلة من النتيريت في عينات المياه باستخدام مركب 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك،

تعتمد قياسات الناقلية الكهربائية على قدرة المحاليل على نقل التيار الكهربائي عبر حركة الأيونات الحرة. تتناسب الناقلية طردياً مع تركيز الأيونات وسرعتها، وتتأثر سلباً بلزوجة الوسط. يمكن من خلال تتبع التغير في الناقلية الكهربائية مع الزمن استنتاج رتبة التفاعل وثوابت السرعة، كما يُمكن من خلال دراسة اعتماد الناقلية على درجة الحرارة حساب طاقة التنشيط للعملية [4].

تُصنف التفاعلات الكيميائية في المحاليل وفقاً لمرتبته، والتي تصف اعتماد سرعة التفاعل على تراكيز المواد المتفاعلة. تتميز تفاعلات المرتبة الأولى، الشائعة في عمليات التحلل والتفكك مثل بعض تفاعلات التأين، بأن زمن نصف التفاعل فيها ثابت ولا يعتمد على التركيز الابتدائي، كما أن ثابت سرعتها مستقل عن التركيز الابتدائي. يمكن تحديد رتبة التفاعل تجريبياً من خلال تتبع تغير تركيز أحد النواتج أو المواد المتفاعلة مع الزمن، أو عن طريق متابعة خاصية فيزيائية مرتبطة بالتركيز، مثل الناقلية الكهربائية في التفاعلات التي يتغير فيها عدد الأيونات [5,6].

## 2- أهمية و هدف البحث:

تكمن أهمية البحث في تقديم فهم أعمق لآليات تأين الأحماض العضوية في المذيبات غير المائية، مما يسهم في تطوير تطبيقات عملية في المجالات الكهروكيميائية والصناعية. توفر الدراسة بيانات مرجعية دقيقة حول السلوك الحركي والترموديناميكي لمركبات السلفونيك النفثالينية، التي تُعد مكونات أساسية في الصناعات الصيدلانية والكيميائية. كما يُسهم التحليل الشامل لتفاعل التأين باستخدام قياسات الناقلية الكهربائية في تطوير طرق تحليلية جديدة لدراسة التفاعلات في الأوساط العضوية، مما يفتح آفاقاً لتطبيقات مبتكرة في مجالات المواد المتقدمة والتحفيز الكيميائي.

يهدف هذا البحث إلى:

1. تحديد الناقلية الكهربائية لمحاليل حمض AHNS باستخدام مذيبات عضوية (الميثانول، الإيثانول، الأسيتون، الدروبانول-2) ومقارنة كفاءة المذيبات العضوية في تأين الحمض.
2. تحديد الخصائص الترموديناميكية ( $\Delta G$ ,  $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ) لتفاعل تأين حمض AHNS باستخدام أفضل مذيب (الميثانول).
3. دراسة الحركية الكيميائية للتفاعل وتحديد مرتبة التفاعل وطاقة التنشيط لتفاعل تأين حمض AHNS باستخدام مذيب الميثانول.

## 3- القسم التجريبي:

### 3-1- الأجهزة المستخدمة:

- سخانة مزودة بمحرك مغناطيسي للتحكم بدرجة الحرارة انتاج شركة Lap Tech الكورية .
- جهاز قياس الناقلية الكهربائية CONSORT صنع بلجيكا .
- أرلينة سعة 100mL ، بيشر سعة 50 mL ، دورق حجمي سعة 5 mL
- ميزان حرارة

### 3-2- المواد الكيميائية المستخدمة :

✓ 4 - أمينو -3- هيدروكسي النفتالين-1- سلفونيك (AHNS) ذات النقاوة 99%

من إنتاج شركة BATCH

✓ مذيبات: ميثانول، إيثانول، أسيتون، برنانول-2 ذات نقاوة 99.9% من إنتاج

شركة .PHAGA INDUSTRIES

### 3-3- تحضير محاليل (AHNS) باستخدام مذيبات مختلفة القطبية:

لدراسة تأثير قطبية المذيب، تم تحضير سلسلة من محاليل 4 - أمينو -3- هيدروكسي النفتالين-1- سلفونيك (AHNS) في عدة مذيبات. حُضِرَت جميع المحاليل بنفس الحجم (5mL) وبتركيز مختلفة ومتماثلة بالنسبة لجميع المذيبات المستخدمة وفق الجدول (1).

الجدول (1): كميات وراكيز مركب (AHNS) المستخدمة في تحضير المحاليل

ضمن مذيبات مختلفة.

Solvent used	quantity (g)(( AHNS)	[AHNS] (mol/L)
MeOH	0.118	0.1
	0.142	0.12
	0.165	0.14
	0.189	0.16
	0.213	0.18
	0.236	0.2
EtOH	0.118	0.1
	0.142	0.12
	0.165	0.14
	0.189	0.16
	0.213	0.18
	0.236	0.2
Me-CO-Me	0.118	0.1
	0.142	0.12
	0.165	0.14
	0.189	0.16
	0.213	0.18

دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تاين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية

	0.236	0.2
CH <sub>3</sub> -CHOH- CH <sub>3</sub>	0.118	0.1
	0.142	0.12
	0.165	0.14
	0.189	0.16
	0.213	0.18
	0.236	0.2

#### 4-3- طريقة قياس الناقلية الكهربائية للمحاليل (SNHA) المحضرة

تم قياس الناقلية الكهربائية للمحاليل المحضرة لمركب (AHNS) ضمن ظروف ثابتة من درجة الحرارة (14°C) والزمن (30min) باستخدام جهاز قياس الناقلية الكهربائية. لتحديد الشروط المثلى التي تحقق أعلى ناقلية كهربائية، تم قياس الناقلية لجميع محاليل المركبات المحضرة من أجل فقط التركيز 0.2M (0.236g/5mL). حيث تم دراسة تأثير متغيرين:

1. تأثير الزمن: قيست الناقلية الكهربائية عند ثبات درجة الحرارة وتغير زمن التحضير، كما هو موضح في الجدول (2).
2. تأثير درجة الحرارة: قيست الناقلية الكهربائية عند ثبات زمن التحضير وتغير درجة الحرارة، كما هو موضح في الجدول (3).

الجدول (2): العينات المحضرة لمحاليل لمركب (AHNS) لقياس الناقلية عند أزمنة مختلفة

ودرجة حرارة وتركيز ثابتين

Solvent used	t (min)
MeOH	30
	60
	90
	120
	150
EtOH	30
	60
	90
	120
	150
Me-CO-Me	30
	60
	90
	120
	150
CH <sub>3</sub> -CHOH-CH <sub>3</sub>	30
	60
	90
	120
	150

الجدول (3): العينات المحضرة لمحاليل لمركب (AHNS) لقياس الناقلية عند درجات حرارة مختلفة وزمن وتركيز ثابتين

Solvent used	درجة الحرارة (K)
MeOH	287.15
	293.15
	298.15
	303.15
	308.15
EtOH	287.15
	293.15
	298.15
	303.15
	308.15
Me-CO-Me	287.15
	293.15
	298.15
	303.15
	308.15
CH <sub>3</sub> -CHOH-CH <sub>3</sub>	287.15
	293.15
	298.15
	303.15
	308.15
	287.15

#### 4- النتائج والمناقشة:

1-4- دراسة الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) العضوية المحضرة بتراكيز مختلفة:

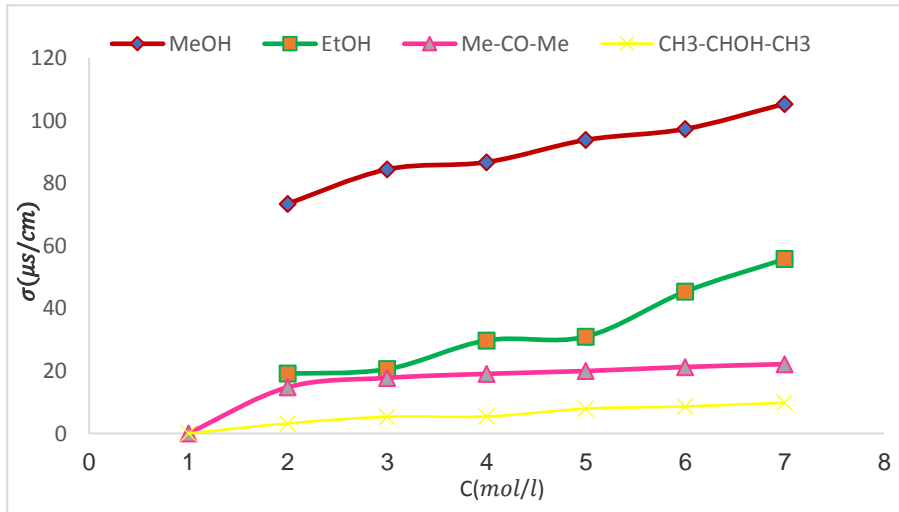
تم قياس الناقلية الكهربائية لمحاليل SNHA العضوية المحضرة بتراكيز مولية مختلفة، حيث أجريت جميع القياسات تحت ظروف ثابتة من الحجم (5mL) والزمن (5min) ودرجة الحرارة (14°C). شملت الدراسة تقييم أداء أربعة مذيبات عضوية هي الميثانول

والإيثانول والأسيتون والبروبانول-2. وقد سُجلت قيم الناقلية الكهربائية المقاسة لكل عينة

الناقلية الكهربائية ( $\mu\text{S/cm}$ )				التركيز (mol/L)
ميثانول	إيثانول	أسيتون	2بروبانول-	
73.4	19.1	14.7	3.2	<b>0.1</b>
84.4	20.5	17.7	5.3	<b>0.12</b>
86.7	29.7	19	5.4	<b>0.14</b>
93.8	30.9	19.9	7.9	<b>0.16</b>
97.3	45.3	21.2	8.6	<b>0.18</b>
105.3	55.7	22.1	9.8	<b>0.2</b>

مع التركيز المولي الموافق لها، ودونت النتائج في الجدول (4).

الجدول (4): قيم لناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) بتركيز مختلفة مع ثبات الزمن والحرارة ويرسم العلاقة ما بين تغيرات الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) بدلالة تغيرات التركيز وفق المخطط البياني (1) التالي:



المخطط البياني (1): تغيرات الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) العضوية بدلالة تغير التركيز

أظهرت دراسة الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) في مذيبات مختلفة (الميثانول، الإيثانول، الأسيتون، البروبانول-2) عند تراكيز مختلفة مع ثبات الزمن ودرجة الحرارة وفق الجدول (1) والمنحني البياني (1)، وجود علاقة طردية بين زيادة التركيز المولي والناقلية الكهربائية، حيث تؤدي زيادة تركيز المركب (AHNS) إلى ارتفاع عدد حاملات الشحنة في المحلول، مما يعزز قدرته على التوصيل الكهربائي[7].

يُعزى الاختلاف في الناقلية بين المذيبات إلى عاملين رئيسيين:

- 1) القدرة على التأين: تسهل المذيبات البروتونية (كالميثانول والإيثانول) تأين المركب عبر تكوين روابط هيدروجينية، مما يزيد من تركيز الأيونات الحرة [8].
- 2) لزوجة الوسط: تعيق المذيبات عالية اللزوجة (كالبروبانول-2) حركة الأيونات حتى مع حدوث التأين [9]. بينما يُظهر الأسيتون - رغم قطبيته - ناقلية منخفضة لكونه مذيباً غير بروتوني يحد من عملية التأين [10].

**4-2- دراسة تغير الناقلية الكهربائية لمحاليل العضوية لـ (AHNS) عند أزمنة مختلفة وثبات كل من التركيز ودرجة الحرارة:**

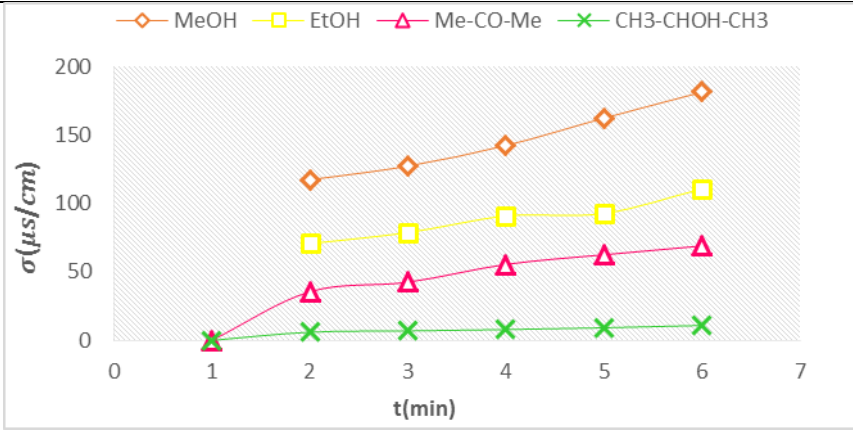
تم دراسة التغير الزمني للناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) المحضرة عند ثبات كل من التركيز (0.2mol/L)، ودرجة الحرارة (14°C) ودونت النتائج في الجدول (5) التالي:

**الجدول (5): قيم تغير الناقلية الكهربائية لمحاليل لمركب (AHNS) عند أزمنة مختلفة ودرجة**

**حرارة وتركيز ثابتين**

(μS/cm) الناقلية الكهربائية				(min) الزمن
ميثانول	إيثانول	أسيتون	2بروبانول	
117.3	70.7	35.5	6	<b>30</b>
127.3	78.7	42.5	6.9	<b>60</b>
142.3	90.8	55.5	7.9	<b>90</b>
162.3	92.7	62.5	9.2	<b>120</b>
181.3	110.7	69	10.9	<b>150</b>

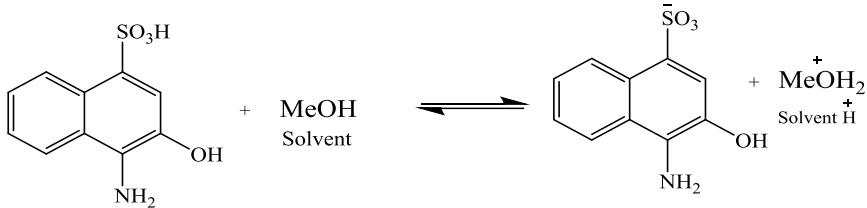
برسم العلاقة بين تغيرات الناقلية الكهربائية بدلالة تغير الزمن وفق المخطط (2) التالي:



المخطط البياني (2): تغيرات الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) بدلالة تغير الزمن

أظهرت نتائج دراسة الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) في مذيبات مختلفة (الميثانول، الإيثانول، الأسيتون، البروبانول-2) عند أزمنة مختلفة وثبات كل من التركيز ودرجة الحرارة وفق (الجدول (5) والمنحني البياني (2))، ما يلي:

- تزداد قدرة المذيب على إذابة وتفكيك AHNS بزيادة قطبيته وقدرته على تكوين روابط هيدروجينية (كونه مذيباً بروتونياً)
- تزداد الناقلية الكهربائية مع مرور الزمن، رغم ثبات درجة الحرارة والتركيز، حيث تعزى هذه الزيادة إلى حدوث تفاعل كيميائي بطيء في المحلول:



هذا التفاعل يؤدي إلى زيادة تدريجية في تركيز الأيونات الحاملة للشحنة، وهي المسؤولة مباشرة عن زيادة التوصيل الكهربائي.

الناقلية الكهربائية لمحلول ما تعتمد بشكل مباشر على وجود وتركيز الأيونات الحرة فيه. فكلما زاد عدد الأيونات في وحدة الحجم، زادت قدرة المحلول على نقل التيار الكهربائي. بما أن

دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تاين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية

المركب (AHNS) يحمل مجموعة سلفونيك حمضية  $\text{SO}_3\text{H}$  - ومجموعة هيدروكسيل وأمين، فإنه يدخل في تفاعل بطيء مع المذيب، مما يولد أيونات جديدة بشكل مستمر مع تقدم الوقت [11].

3-4- دراسة الناقلية الكهربائية للمحاليل العضوية لـ (AHNS) عند درجات حرارة مختلفة وثابت كل من التركيز والزمن:

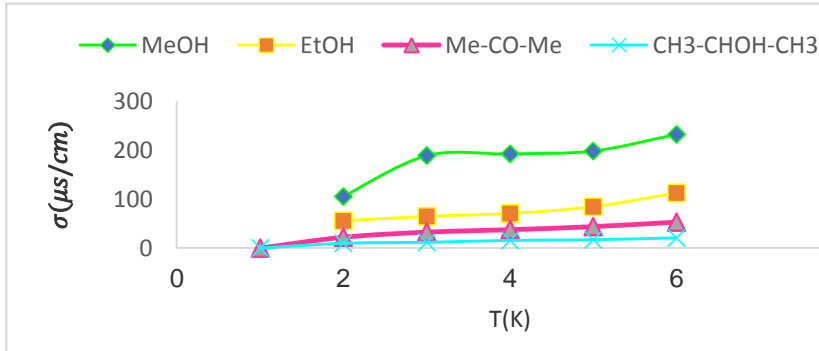
سُجّلت الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) العضوية المحضرة عند درجات حرارة مختلفة وثبات كل من التركيز (0.2mol/L)، والزمن (30min)، ودونت النتائج في الجدول (6)

الناقلية الكهربائية ( $\mu\text{s}/\text{Cm}$ )				الحرارة (K)
بروبانول 2	أسيتون	إيثانول	ميثانول	
9.8	22.1	55.7	105.3	287.15
11.9	32.5	64.8	188.8	293.15
15.7	37.6	70.7	192.3	298.15
17.1	43.8	84.6	198.3	303.15
21	53.1	112.7	232.3	308.15

التالي:

الجدول (6): قيم تغير الناقلية الكهربائية لمحاليل لمركب (AHNS) عند درجات حرارة مختلفة وزمن وتركيز ثابتين

ويرسم العلاقة ما بين تغيرات الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) بدلالة تغير درجة الحرارة وفق المخطط البياني (3) التالي:



**المخطط البياني (3):** تغيرات الناقلية الكهربائية لمحاليل (AHNS) بدلالة تغير درجة الحرارة أظهرت دراسة الناقلية الكهربائية لمحاليل في مذيبات مختلفة (الميثانول، الإيثانول، الأسيتون، البروبانول-2) عند درجات حرارة مختلفة مع ثبات التركيز و الزمن وفق الجدول (6) والمنحني البياني (3))، ما يلي:

1. الميثانول هو أفضل مذيب لمركب AHNS بسبب قطبيته العالية وقدرته البروتونية على تكوين روابط هيدروجينية، مما يعزز الذوبان والتأين .
2. تؤكد النتائج الطبيعية الأيونية لمركب AHNS ، حيث تتفكك مجموعة السلفونيك (-SO<sub>3</sub>H) في المحاليل القطبية منتجة أيونات تزيد الناقلية الكهربائية .
3. زيادة درجة الحرارة تزيد الناقلية الكهربائية بشكل ملحوظ بسبب انخفاض لزوجة المذيب وزيادة الطاقة الحركية والانتشار للأيونات [12] .

#### 4-4- دراسة الناقلية الكهربائية لمحلول AHNS في الميثانول ترموديناميكياً:

بما أن محلول AHNS في الميثانول أعطى قيم للناقلية الكهربائية أفضل من محاليله في المذيبات الأخرى ( الإيثانول، الأسيتون، البروبانول-2)، لذا تم دراسة الناقلية لهذا المحلول ترموديناميكياً وفق الخطوات التالية:

- 1- قياس الناقلية الكهربائية لمحلول AHNS في الميثانول وفق تراكيز ثابتة ودرجات حرارة مختلفة، حيث قيست باستخدام جهاز الناقلية الكهربائية ودونت النتائج بالجدول (7).

الجدول (7): قيم الناقلية الكهربائية لمحلول AHNS في الميثانول وفق تراكيز ثابتة ودرجات

حرارة مختلفة

الميثانول ( $\mu\text{s/cm}$ )	T(K)	C (mol/L)
73.4	287.15	<b>0.1</b>
115.5	293.15	
125.5	298.15	
140.1	303.15	
160.5	308.15	
84.4	287.15	<b>0.12</b>
129.9	293.15	
140.1	298.15	
150	303.15	
170.6	308.15	
86.7	287.15	<b>0.14</b>
145.2	293.15	
160	298.15	
165	303.15	
188.5	308.15	
93.8	287.15	<b>0.16</b>
160	293.15	
176.1	298.15	
178	303.15	
195.1	308.15	
97.3	287.15	<b>0.12</b>
175.8	293.15	
188.8	298.15	
191	303.15	
210.3	308.15	
105.3	287.15	<b>0.2</b>
188.8	293.15	
192.3	298.15	
198.3	303.15	

سلسلة العلوم الأساسية أ.د. صالح الرحيل	الاء قمحية	مجلة جامعة حمص المجلد 47 العدد 22 عام 2025
232.3	308.15	

2- تحديد الناقلية المولية  $\lambda$ :

تم حساب الناقلية المولية ( $\lambda$ ) لمحلول AHNS لكل تركيز عند كل درجة حرارة باستخدام العلاقة الأساسية:

$$\lambda = \frac{\sigma}{C}$$

حيث:

$\lambda$ : الناقلية المولية ووحدها ( $\mu\text{S}/\text{cm}^2 \cdot \text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ ).

$\sigma$ : الناقلية النوعية ووحدها ( $\mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$ ).

$C$ : التركيز المولي ووحدها ( $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ).

3- تحديد الناقلية المولية عند التخفيف اللانهائي ( $\lambda^\circ$ ) ودرجة التفكك ( $\alpha$ ):

لتحديد الناقلية المولية عند التخفيف اللانهائي ( $\lambda^\circ$ ) لمحلول AHNS بالميتانول، تم الاعتماد

على قانون كروش للمحاليل المخففة ( $\alpha = 1$ ) [13,14]:

$$\lambda = \lambda^\circ - \kappa \sqrt{C}$$

حيث ( $\kappa$ ) ثابت تجريبي.

بناءً على هذا القانون، فإن الرسم البياني للعلاقة بين  $\lambda$  و  $\sqrt{C}$  يعطي خطاً مستقيماً. تم تمديد هذا الخط إلى حين تقاطعه مع محور الناقلية (عندما  $\sqrt{C} = 0$ ) للحصول على قيمة  $\lambda^\circ$

بشكل مباشر (انظر المخطط البياني (4)).

مما سبق تم حساب درجة التفكك ( $\alpha$ ) وفق العلاقة التالية:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\lambda^\circ}$$

4- حساب ثابت التفكك ( $K_a$ ):

باعتبار الحمض (AHNS) حمضاً ضعيفاً في وسط الميثانول، تم تحديد ثابت تفككه الحمضي ( $K_a$ ) استناداً إلى قياسات الناقلية المولية. يعتمد هذا التحديد على قانون أوستفالد للتخفيف، الذي يُشتق من مبدأ فعل الكتلة للتوازن الكيميائي. يُعد استخدام الميثانول كمذيب مهماً نظراً لتأثير خواصه المذيبة (كثابت العزل الكهربائي) على سلوك الحمض.

لحساب ثابت التفكك ( $K_a$ )، تم استخدام الصيغة التالية لقانون أوستفالد للتخفيف:

$$K_a = \frac{\alpha^2 \cdot C}{1 - \alpha}$$

حيث:

$K_a$ : ثابت تفكك الحمض (AHNS).

$\alpha$ : درجة التفكك.

$C$ : التركيز المولي الأولي الحمض (AHNS).

وأخيراً دونت النتائج بالجدول (8) التالي:

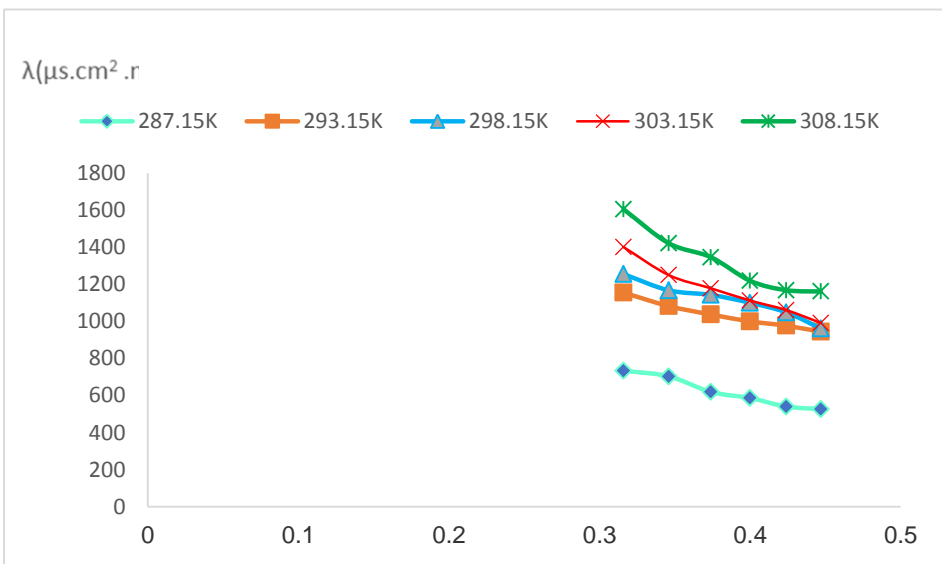
الجدول (8): قيم الناقلية المولية وثابت التفكك و درجة التشرذ لمحلول الحمض (AHNS)

في الميثانول وفق تراكيز ثابتة ودرجات حرارة مختلفة

$\ln K_a$	$K_a$	$\alpha$	$\log \lambda^{\circ}$	$\lambda^{\circ}$ ( $\mu\text{s}/\text{cm}^2 \cdot \text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ )	$\lambda$ ( $\mu\text{s}/\text{cm}^2 \cdot \text{mol} \cdot \text{l}^{-1}$ )	C (mol/l)	$\sqrt{C}$	T(K)
- 2.563	0.077	0.575	3.105	1276.1	734	0.1	0.31 6	287.1 5
- 2.513	0.081	0.551			703.3	0.12	0.34 6	
- 2.764	0.063	0.485			619.28	0.14	0.37 4	
- 2.780	0.062	0.459			586.25	0.16	0.4	
- 2.900	0.055	0.423			540.55	0.18	0.42 4	
- 2.864	0.057	0.412			526.5	0.2	0.44 7	
- 1.766	0.171	0.708	3.211	1629.1	1155	0.1	0.31 6	293.1 5
- 1.851	0.157	0.664			1082.5	0.12	0.34 6	
- 1.864	0.155	0.636			1037.14	0.14	0.37 4	
- 1.864	0.155	0.613			1000	0.16	0.4	
- 1.826	0.161	0.599			976.66	0.18	0.42 4	
- 1.838	0.159	0.579			944	0.2	0.44 7	
- 2.040	0.130	0.663	3.277	1892.9	1255	0.1	0.31 6	298.1 5
- 2.137	0.118	0.616			1167.5	0.12	0.34 6	
- 2.055	0.128	0.603			1142.85	0.14	0.37 4	
- 2.055	0.128	0.581			1100.62	0.16	0.4	
- 2.095	0.123	0.554			1048.88	0.18	0.42 4	
- 2.263	0.104	0.507			961.5	0.2	0.44 7	

دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تاين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات  
عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية

- 2.364	0.094	0.609	3.361	2299	1401	0.1	0.31 6	<b>303.1 5</b>
- 2.563	0.077	0.543			1250	0.12	0.34 6	
- 2.590	0.075	0.512			1178.57	0.14	0.37 4	
- 2.631	0.072	0.483			1112.5	0.16	0.4	
- 2.659	0.070	0.461			1061.11	0.18	0.42 4	
- 2.733	0.065	0.431			991.5	0.2	0.44 7	
- 2.375	0.093	0.607	3.421	2640.5	1605	0.1	0.31 6	<b>308.1 5</b>
- 2.590	0.075	0.538			1421.66	0.12	0.34 6	
- 2.617	0.073	0.509			1346.42	0.14	0.37 4	
- 2.764	0.063	0.461			1219.37	0.16	0.4	
- 2.764	0.063	0.442			1168.33	0.18	0.42 4	
- 2.688	0.068	0.439			1161.5	0.2	0.44 7	



المخطط البياني (4): العلاقة بين  $\sqrt{C}$  و الناقلية المولية ( $\lambda$ ) لمحلول الحمض (AHNS) في الميثانول

5- ربط ثابت التفكك ( $K_a$ ) بدرجة الحرارة ( $T$ ) والثوابت الترموديناميكية ( $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta G$ ):  
العلاقة الأساسية التي تربط ثابت التفكك ( $K_a$ ) بدرجة الحرارة ( $T$ ) والثوابت الترموديناميكية ( $\Delta H$ ,  $\Delta S$ ,  $\Delta G$ ).

$$\Delta G = -RT \ln K_a$$

حيث:

$\Delta G$ : طاقة جيبس الحرة.

$R$ : ثابت الغازات ( $2.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ).

$T$ : درجة الحرارة المطلقة.

$K_a$ : ثابت التفكك.

ثم حساب طاقة جيبس الحرة من العلاقة:

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

ودمج العلاقتين السابقتين نحصل على علاقة فانت هوف:

دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تاين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية

$$\ln K_a = -\Delta H/RT + \Delta S/R$$

بالرسم البياني للعلاقة  $\ln K_a$  و  $1/T$  يعطي خطأ مستقيماً لمحاليل الحمض (AHNS) في عند تراكيز مختلفة (المخطط البياني (5)). تم تمديد هذا الخط إلى حين تقاطعه مع محور ثابت التفكك يعطي  $(\Delta S/R)$ ، ومن الميل تم الحصول على  $(-\Delta H/R)$  ( انظر الجدول (9)).

الجدول (9): قيم الثوابت الترموديناميكية ( $\Delta H, \Delta S, \Delta G$ ) لمحلول الحمض (AHNS) في

الميثانول عند تراكيز ودرجات حرارة مختلفة [14]

إيثانول $\Delta G$ (KJ/mol)	إيثانول $\Delta S$ (J/mol)	إيثانول $\Delta H$ (KJ/mol)	T(K)	C (mol/l)
8.818	24-	1.927	287.15	<b>0.1</b>
8.962			293.15	
9.082			298.15	
9.202			303.15	
9.322			308.15	
24.726	-48	10.943	287.15	<b>0.12</b>
25.014			293.15	
25.254			298.15	
25.494			303.15	
25.734			308.15	
14.290	-34	4.527	287.15	<b>0.14</b>
14.494			293.15	
14.664			298.15	
14.834			303.15	
15.004			308.15	
22.308	-48	8.525	287.15	<b>0.16</b>
22.596			293.15	
22.836			298.15	
23.076			303.15	
23.316			308.15	
17.911			287.15	
18.157			293.15	

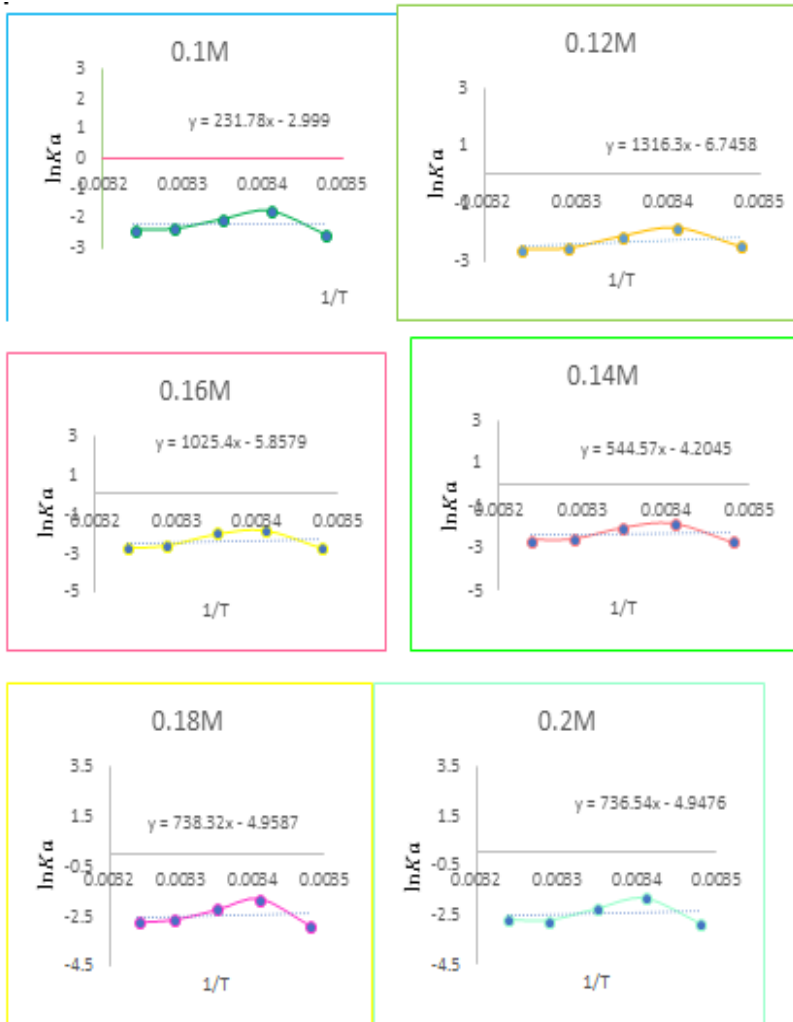
سلسلة العلوم الأساسية  
أ.د. صالح الرحيل

الاء قمحية

مجلة جامعة حمص  
المجلد 47 العدد 22 عام 2025

18.362	-41	6.138	298.15	<b>0.18</b>
18.567			303.15	
18.772			308.15	
17.896	-41	6.123	287.15	<b>0.2</b>
18.142			293.15	
18.347			298.15	
18.552			303.15	
18.757			308.15	

دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تاين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية



المخطط البياني (5): العلاقة بين  $1/T$  لمحاليل الحمض (AHNS) في الميثانول عند تراكيز مختلفة

مما سبق لوحظ أن القيم الموجبة لطاقة جيبس الحرة ( $\Delta G^\circ > 0$ ) وفق التراكيز ودرجات الحرارة المدروسة تشير إلى أن عملية تفكك حمض (AHNS) في الميثانول هي عملية غير تلقائية. كما تدل القيم الموجبة للتغير في الإنثالبية ( $\Delta H^\circ > 0$ ) على أن العملية ماصة للحرارة.

تعزى عدم التلقائية إلى الطبيعة غير المائية للميثانول، الذي يتميز بثابت عازل منخفض مقارنة بالماء، مما يجعله وسطاً غير فعال في استقرار الأيونات الناتجة عن التفكك (أيون الهيدروجين والأنيون المقابل). في هذه الحالة، تكون المساهمة الطاقية ( $\Delta H^\circ > 0$ ) أكبر من مساهمة زيادة الإنتروبية ( $T\Delta S^\circ$ )، مما يحافظ على قيمة  $\Delta G^\circ$  موجبة [14,15].

6- حساب طاقة التنشيط :

تم حساب طاقة التنشيط ( $E_a$ ) لحركة أيونات الحمض باستخدام نظرية أرينيوس، حيث تعبر العلاقة بين الناقلية المولية المكافئة ودرجة الحرارة عن اعتماد حركة الأيونات على الطاقة الحرارية، ويمكن تمثيلها بالصيغة الأسية التالية [16]:

$$= A e^{\frac{-\Delta E_a}{RT}} = \log \lambda^\circ = \log A - (\Delta E_a / 2.303RT) \lambda^\circ$$

حيث :

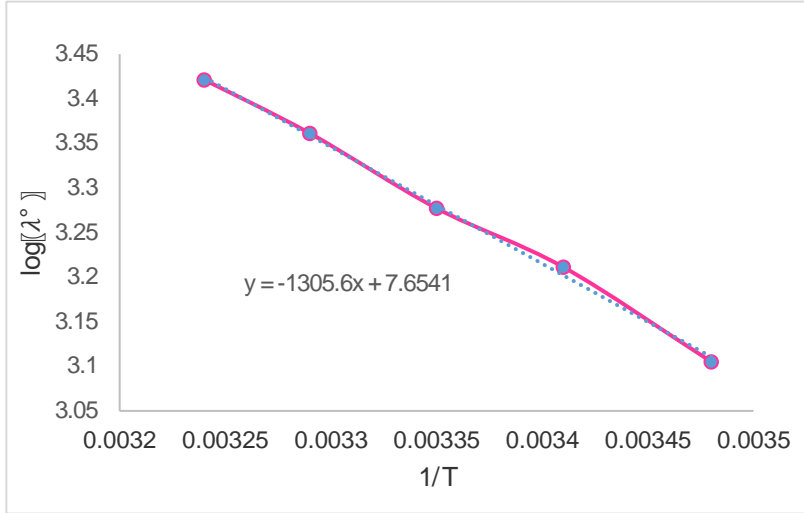
A: عامل التردد

$\lambda^\circ$ : الناقلية المولية المكافئة وواحدتها ( $\mu s/cm^2 \cdot mol \cdot l^{-1}$ ).

$E_a$ : طاقة التنشيط وواحدتها ( $KJ/mol, K^{-1}$ ).

بالرسم البياني للعلاقة بين  $\log \lambda^\circ$  و  $1/T$  وفق المخطط البياني (5) يعطي خطأ مستقيماً لمحلول حمض (AHNS) في الميثانول. تم تمديد هذا الخط إلى حين تقاطعه مع محور

يعطي  $(\log A)$ ، ومن الميل تم الحصول على  $(-\Delta E_a/2.303R)$ .



المخطط البياني (5): العلاقة بين  $\log \lambda^2$  و  $1/T$  لمحلول حمض (AHNS) في الميثانول عند تراكيز مختلفة

$$\Delta E_a = -1305.6 \times 2.303 \times 8.314 = 24.998 \text{ KJ/mol. } K^{-1}$$

تُشير قيمة طاقة التنشيط المرتفعة (24.998 كيلوجول/مول) إلى صعوبة حركة أيونات الحمض ضمن وسط الميثانول. يُعزى ذلك إلى حجم جزيئات المذيب الكبيرة التي تعيق حركة الأيونات مقارنةً بالمذيبات المائية، وضعف قدرته على استقرار الشحنات الأيونية، مما يزيد من الحاجز الطاقي اللازم لانتقال الأيونات [17].

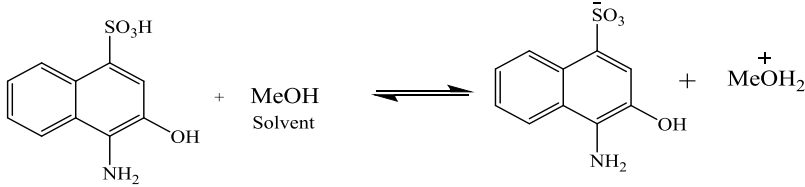
#### 5-4- دراسة الناقلية الكهربائية لمحلول حمض AHNS في الميثانول حركياً:

تم قياس الناقلية الكهربائية لمحلول حمض AHNS في الميثانول بتركيز ثابت (0.2M) عند أزمنة مختلفة (0, 30, 60, 90, 120, 150)، باستخدام جهاز الناقلية الكهربائية، حيث بدء قياس الناقلية الكهربائية عند الزمن صفر ( $t = 0$ ) ودونت النتائج بالجدول (10).

الجدول (10): قيم الناقلية الكهربائية (0.2M) لمحلول حمض AHNS في الميثانول عند أزمنة مختلفة

$\sigma (\mu\text{s}/\text{cm})$	t (min)
105.3	0
117.3	30
127.3	60
142.3	90
162.3	120
181.3	150

حيث تم ثبات الناقلية الكهربائية بعد 24 ساعة  $\sigma_{\infty} = 285 \mu\text{s}/\text{cm}$



لوحظ من خلال الجدول (10) السابق زيادة منتظمة في الناقلية الكهربائية لمحلول حمض AHNS في الميثانول مع مرور الزمن. هذه الزيادة ناتجة عن حدوث عملية تحول كيميائي مستمرة تنتج أنواعاً أيونية إضافية

. يُعزى هذا السلوك إلى تفاعل الحمض مع المذيب، حيث تؤدي الزيادة في تركيز الأيونات

الحررة إلى ازدياد الناقلية الكهربائية حتى بلوغ حالة الاستقرار بعد 24 ساعة [17].

تُعد عملية تأين حمض AHNS في الميثانول تفاعلاً من المرتبة الأولى، حيث يتميز بعدم اعتماد سرعة تفكك الجزيء على التركيز. يظهر هذا من خلال ثابت سرعة التفكك الذي لا يتأثر بتركيز الحمض.

حيث يعمل الميثانول كمذيب دون المشاركة كمتغير في معادلة السرعة، وتبقى سرعة التفاعل مستقلة عن تركيزه عند وجوده بكميات فائضة. تعتمد الزيادة في الناقلية الكهربائية ( $d\sigma/dt$ )

بشكل مباشر على تركيز جزيئات الحمض غير المتأينة المتبقية في المحلول، مما يتوافق مع العلاقة:

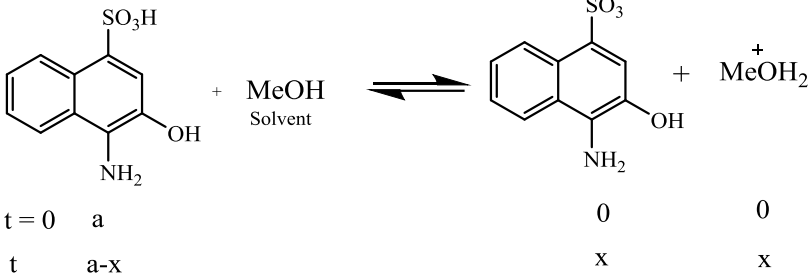
$$V = d\sigma/dt = k [AHNS]$$

حيث تمثل  $k$  ثابت سرعة التفكك من المرتبة الأولى الذي لا يتعلق بالتركيز طوال سير التفاعل. يتوافق هذا السلوك مع النموذج الحركي للتفاعلات من المرتبة الأولى [17,18].  $\sigma_0$  : الناقلية عند الزمن صفر (قبل بدء التفاعل)

$\sigma_t$ : الناقلية عند الزمن  $t$ .

$\sigma_\infty$ : الناقلية عند اكتمال التفاعل (عند اللانهاية).

$k$ : ثابت السرعة من المرتبة الأولى.



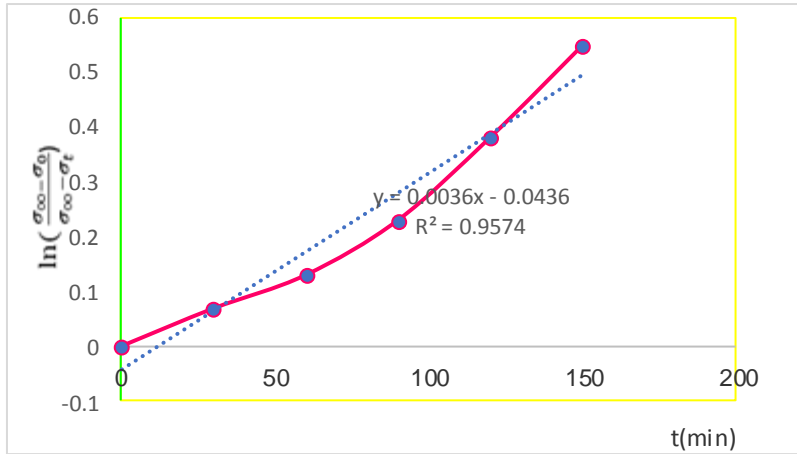
نظراً لأن التغير في الناقلية  $(\sigma_t - \sigma_0)$  يتناسب مع تركيز الناتج  $(x)$ ، و  $(\sigma_\infty - \sigma_t)$  يتناسب مع تركيز المتفاعل المتبقي  $(a - x)$ ، فإن معادلة السرعة من المرتبة الأولى (انظر الجدول (11) من أجل  $T_1=287.15K$  و الجدول (12) من أجل  $T_2=308.15K$ ) تأخذ الشكل:

$$\ln( (\sigma_\infty - \sigma_0) / (\sigma_\infty - \sigma_t) ) = k t$$

$$\ln\left(\frac{\sigma_\infty - \sigma_0}{\sigma_\infty - \sigma_t}\right) = k t$$

الجدول (11): المعلومات الحركية لتأين حمض AHNS في الميثانول باستخدام قياسات الناقلية الكهربائية عند درجة الحرارة (T<sub>1</sub>=287.15K)

$\ln\left(\frac{\sigma_{\infty}-\sigma_0}{\sigma_{\infty}-\sigma_t}\right)$	$\sigma_{\infty}-\sigma_t$	$\sigma_{\infty}-\sigma_0$	$\sigma_0$	$\sigma_{\infty}$	$\sigma_t$ ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	t (min)
0	179.7	179.7	105.3	285	105.3	0
0.069	167.7				117.3	30
0.130	157.7				127.3	60
0.230	142.7				142.3	90
0.381	122.7				162.3	120
0.549	103.7				181.3	150

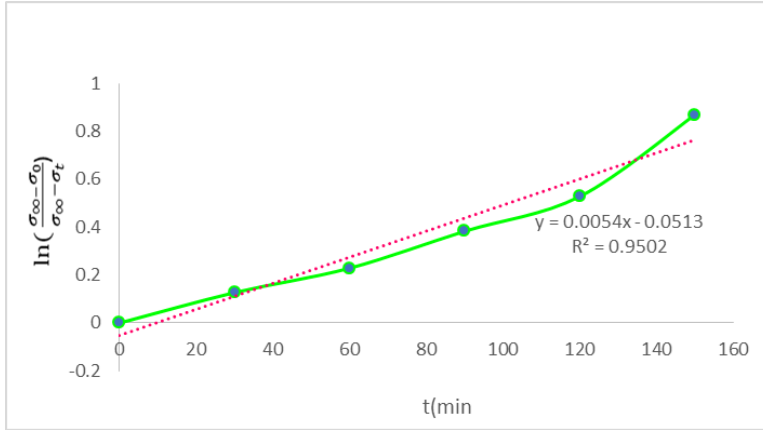


المخطط البياني (6): العلاقة بين  $\ln\left(\frac{\sigma_{\infty}-\sigma_0}{\sigma_{\infty}-\sigma_t}\right)$  و الزمن (t) عند (T<sub>1</sub>=287.15K)

دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تأين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية

الجدول (12): المعلومات الحركية لتأين حمض AHNS في الميثانول باستخدام قياسات الناقلية الكهربائية عند درجة الحرارة (T<sub>2</sub>=308.15K)

$\ln\left(\frac{\sigma_{\infty}-\sigma_0}{\sigma_{\infty}-\sigma_t}\right)$	$\sigma_{\infty}-\sigma_t$	$\sigma_{\infty}-\sigma_0$	$\sigma_0$	$\sigma_{\infty}$	$\sigma_t$	t (min)
0	0	143.2	232.3	375.5	232.3	0
0.127	126				249.5	30
0.229	113.8				261.7	60
0.383	97.6				277.9	90
0.528	84.4				291.1	120
0.869	60				315.5	150



المخطط البياني (6): العلاقة بين  $\ln\left(\frac{\sigma_{\infty}-\sigma_0}{\sigma_{\infty}-\sigma_t}\right)$  و الزمن (t) عند (T<sub>2</sub>=308.15K)

عند (T<sub>1</sub>=287.15K)  $m_1 = k_1 = 0.0036 \text{min}^{-1}$

عند (T<sub>2</sub>=308.15K)  $m_2 = k_2 = 0.0054 \text{min}^{-1}$

تم التحقق من ثابت السرعة بحساب زمن نصف التفاعل t<sub>1/2</sub> باستخدام العلاقة الخاصة بالمرتبة الأولى:

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{0.0036} = 192.5 \text{min}, \quad T_1 = 287.15\text{K}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{k} = \frac{0.693}{0.0036} = 128.3 \text{min}, \quad T_2 = 308.15\text{K}$$

حساب سرعة التفاعل:

بما أن التفاعل من المرتبة الأولى، يتم حساب سرعة التفاعل عند أي زمن  $t$  عند درجة الحرارة  $(T_1 = 287.15\text{K})$  (انظر الجدول (13)) وعند درجة الحرارة  $(T_2 = 308.15\text{K})$  (انظر الجدول (14)) بالعلاقة:

$$\vartheta = k \cdot [A]_t = k \cdot [AHNS]_t$$

حيث:

$[A]_t$ : و تركيز المادة المتفاعلة (حمض AHNS) عند الزمن  $t$ ، ويُحسب من العلاقة:

$$[AHNS]_t = [AHNS]_0 \cdot e^{-kt}$$

$[AHNS]_0$ : التركيز الابتدائي عند الزمن  $t=0$ ، و ثابت السرعة  $k_1 = 0.0036 \text{min}^{-1}$  و  $k_2 = 0.0054 \text{min}^{-1}$

الجدول (13): قيم تركيز المادة المتفاعلة وسرعة التفاعل عند درجة حرارة 287.15K وتركيز

ابتدائي 0.2M

$\vartheta_t (\text{mol. l}^{-1}. \text{min}^{-1}.)$	$\vartheta_0 (\text{mol. l}^{-1}. \text{min}^{-1}.)$	$[A]_t (\text{mol. l}^{-1}.)$	$[A]_0 (\text{mol. l}^{-1}.)$	$t (\text{min})$
0.00072	0.00072	0.2	0.2	0
0.00064		0.179		30
0.00057		0.161		60
0.00051		0.144		90
0.00046		0.129		120
0.00041		0.116		150

الجدول (14): قيم تركيز المادة المتفاعلة وسرعة التفاعل عند درجة حرارة 308.15K وتركيز

ابتدائي 0.2M

$\vartheta_t (\text{mol. l}^{-1}. \text{min}^{-1}.)$	$\vartheta_0 (\text{mol. l}^{-1}. \text{min}^{-1}.)$	$[A]_t (\text{mol. l}^{-1}.)$	$[A]_0 (\text{mol. l}^{-1}.)$	$T$
0.00108		0.2		0
0.000918		0.170		30
0.000778		0.144		60

دراسة ترموديناميكية وحركية لتفاعل تأين حمض 4-أمينو-3-هيدروكسي نفتالين-1-سلفونيك في مذيبات عضوية مختلفة باستخدام الناقلية الكهربائية

0.000664	0.00108	0.123	0.2	90
0.000562		0.104		120
0.000475		0.088		150

**ملاحظة:** سرعة التفاعل الابتدائية:

$$\vartheta_{01}=k_1 \cdot [A]_0=(0.01) \cdot (0.2)=0.00072 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

$$\vartheta_{02}=k_2 \cdot [A]_0=(0.011) \cdot (0.2)=0.00108 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$$

مما سبق وجد أن تفاعل تفكك حمض AHNS في الميثانول يتبع حركية المرتبة الأولى، حيث يتناقص تركيز الحمض وسرعة التفاعل باستمرار مع ازدياد الزمن. يؤدي ارتفاع درجة الحرارة إلى زيادة ملحوظة في ثابت السرعة، مما يُظهر اعتماداً واضحاً لسرعة التفاعل على درجة الحرارة.

**حساب طاقة التنشيط (Ea):**

بمقارنة ثابتي السرعة عند درجتي الحرارة T<sub>1</sub> و T<sub>2</sub> وباستخدام معادلة أرينوس:

$$\ln\left(\frac{k_2}{k_1}\right) = \frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

$$\ln\left(\frac{0.0054}{0.0036}\right) = \frac{Ea}{8.314} \left(\frac{1}{287.15} - \frac{1}{308.15}\right) = 14221.500 \text{ J/mol}$$

$$= 14.221 \text{ KJ/mol}$$

مما سبق وجد أن تفاعل تأين حمض AHNS في الميثانول يعتمد على درجة الحرارة وفقاً لحركية تفاعل المرتبة الأولى عند كلا درجتي الحرارة. تشير قيمة طاقة التنشيط المنخفضة نسبياً إلى أن التفاعل لا يحتاج إلى حاجز طاقة مرتفع للحدوث [19].

### 5- الاستنتاجات والتوصيات:

1. وجد أن الميثانول هو أنسب مذيب لمركب AHNS بسبب قطبيته العالية وقدرته البروتونية على تكوين روابط هيدروجينية، مما يعزز الذوبان والتأين.

2. يتبع تفاعل تفكك حمض AHNS في الميثانول حركية التفاعلات من المرتبة الأولى، حيث يتناقص تركيز الحمض وسرعة التفاعل باستمرار مع تقدم الزمن.
3. تزداد الناقلية الكهربائية وثابت سرعة التفاعل مع ارتفاع درجة الحرارة، حيث يؤدي ارتفاع الحرارة من 287.15 K إلى 308.15K إلى زيادة ثابت السرعة من  $0.0036\text{min}^{-1}$  إلى  $0.0054\text{min}^{-1}$ .
4. إن عملية التفكك غير تلقائية ( $\Delta G^\circ > 0$ ) وماصة للحرارة ( $\Delta H^\circ > 0$ ) ، مع قيمة طاقة تنشيط تبلغ  $14.29\text{kJ/mol}$  .
5. تتناسب الناقلية الكهربائية طردياً مع تركيز المحلول وتزداد مع مرور الزمن بسبب تكون أيونات إضافية ناتجة عن تفاعل التفكك.

### التوصيات:

1. استخدام محلول حمض AHNS - ميثانول في التطبيقات الكهروكيميائية بسبب خواصه التوصيلية الجيدة واستقراره الزمني.
2. العمل عند درجات حرارة مرتفعة حوالي (308K) لتعزيز كفاءة التفكك.
3. إجراء دراسات حيوية لتقييم فعالية AHNS في التطبيقات الصيدلانية بسبب وجود مجموعات الأمين والهيدروكسيل في بنيته .

## 6References – المراجع:

- [1]. Marcus Y. Internal pressure of liquids and solutions. *Chemical Reviews*. 2013 Aug 14;113(8):6536-51.
- [2]. Gao L, Chen Z, Yang H, Wan X, Wang M. Hydrodynamic pressure law of ground-rested circular RC tank under bi-directional horizontal seismic action. *Plos one*. 2022 Mar 22;17(3):e0265528.
- [3]. Geto A, Brett CM. Electrochemical synthesis, characterisation and comparative study of new conducting polymers from amino-substituted naphthalene sulfonic acids. *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2016 Nov;20(11):2969-79.
- [4]. Bard AJ, Faulkner LR. *Electrochemical methods*, 2001,- Bard Faulkner.
- [5]. Atkins PW, De Paula J. *Kurzlehrbuch Physikalische Chemie: für natur-und ingenieurwissenschaftliche Studiengänge*. John Wiley & Sons; 2019 Nov 11.
- [6]. Zhao, C., Burrell, G., Torriero, A. A. J., Separovic, F., & Bond, A. M. (2008). Electrochemistry of Room Temperature Protic Ionic Liquids. *The Journal of Physical Chemistry B*, 112(23), 6923–6936.
- [7]. Atkins P, De Paula J, Friedman R. *Physical chemistry: quanta, matter, and change*. Oxford University Press; 2014.
- [8]. Nasser HN, Hamoudeh DH. Manufacturing electrical conductive cell and studying the optimum conditions of its work and analytical applications. *Latakia University Journal-Basic Sciences Series*. 2020 Mar 9;42(1).
- [9]. Kanakubo M, Harris KR, Tsuchihashi N, Ibuki K, Ueno M. Effect of pressure on transport properties of the ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate. *The Journal of Physical Chemistry B*. 2007 Mar 1;111(8):2062-9.
- [10]. Chen X, Li Z, Zhao H, Li J, Li W, Han C, Zhang Y, Lu L, Li J, Qiu X. Dominant solvent-separated ion pairs in electrolytes enable superhigh conductivity for fast-charging and low-temperature lithium ion batteries. *ACS nano*. 2024 Mar 11;18(11):8350-9.

- [11]. Yin W, Ruckenstein E. Soluble polyaniline co-doped with dodecyl benzene sulfonic acid and hydrochloric acid. In *Solution and Surface Polymerization 2019* Apr 1 (pp. 275-286). CRC Press.
- [12]. Yuan H, Yang J, Wang M, Li H, Li Y, Li T, Ren B. Solubility measurement and data correlation of 2-ethoxy-1-naphthoic acid in twelve pure solvents at temperatures from 278.15 to 323.15 K. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2025 Jan 1;200:107365.
- [13]. Atkins P. Shriver and Atkins' inorganic chemistry. Oxford University Press, USA; 2010.
- [14]. Kratochvil B, Yeager HL. Conductance of electrolytes in organic solvents. In *Nonaqueous chemistry 2006* Apr 20 (pp. 1-58). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [15]. Smith RM, Martell AE. Critical stability constants: second supplement. New York: Plenum Press; 1989.
- [16]. Hammad WA, El-Hammamy NH, Morshidy MH, Alkamis K, Darweesh MA. Electrical conductivity and thermodynamic studies on Sodium Dimethyldithiocarbamate in non aqueous solvents Dimethylformamide (DMF), at different temperatures. *Scientific reports*. 2022 Sep 17;12(1):15634.
- [17]. Bard AJ, Faulkner LR, White HS. *Electrochemical methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons; 2022 May 3..
- [18]. Espenson JH. *Chemical kinetics and reaction mechanisms*. New York: McGraw-Hill; 1995 Jan.
- [19]. Atkins PW, De Paula J, Keeler J. *Atkins' physical chemistry*. Oxford university press; 2023.
- [20]. Shariati-Rad, M., Irandoust, M., & Niazi, F. (2015). Quantitation of trace amounts of nitrite in water samples using 4-amino-3-hydroxynaphthalene-1-sulfonic acid and central composite design.

## الحل العددي لنظام من المعادلات التكاملية-التفاضلية الكسرية الخطية باستخدام طريقة المربعات الصغرى وكثيرات حدود Mamadu-Njoseh المزاحة

د. سليمان محمد محمود \*، د. سمير إحسان \*\*، محمد هيثم إسماعيل \*\*\*

### □ ملخص □

نقدم في هذا العمل الحل العددي لمنظومة من المعادلات التكاملية-التفاضلية الكسرية الخطية وفق مفهوم مشتق كابوتو الكسري. تعتمد الطريقة العددية على استخدام طريقة المربعات الصغرى مع كثيرات حدود Mamadu-Njoseh المزاحة، حيث يتم تحويل المسألة إلى منظومة من المعادلات الجبرية الخطية. تم اختبار الطريقة العددية المقترحة من خلال حل ثلاث مسائل، حيث تشير المقارنات العددية مع الطرائق الأخرى إلى كفاءة ودقة الطريقة المقترحة. تم استخدام برنامج Mathematica للحصول على النتائج العددية والرسوم البيانية المرتبطة بالحل العددي والأخطاء الناتجة.

**الكلمات المفتاحية:** نظام من المعادلات التكاملية-التفاضلية الكسرية الخطية، مشتق كابوتو الكسري، طريقة المربعات الصغرى، كثيرات حدود Mamadu-Njoseh المزاحة.

\*أستاذ - قسم الرياضيات - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

E-mail: [Suliman.mahmoud@tishreen.edu.sy](mailto:Suliman.mahmoud@tishreen.edu.sy)

\*\* أستاذ مساعد - قسم الرياضيات - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

\*\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الرياضيات - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

E-mail: [mohammed.ismaiel@tishreen.edu.sy](mailto:mohammed.ismaiel@tishreen.edu.sy)

## Numerical Solution of System of linear Fractional Integro-Differential Equations by Least Squares Method and the Shifted Mamadu-Njoseh Polynomials

Dr. Suliman M Mahmoud\*, Dr. Sameer H Ehssan \*\*, Mohammed H Ismaiel\*\*\*

### □ Abstract □

In this paper, we present a numerical solution for a system of linear fractional integro-differential equations (FIDEs). The fractional derivative is considered in the Caputo sense. The numerical method is based on the use of the least squares method with the aid of shifted Mamadu-Njoseh polynomials, where the problem is converted into a system of linear algebraic equations. The proposed numerical method was tested by solving three problems, where numerical comparisons with other methods indicate the efficiency and accuracy of the proposed method. Mathematica programming was used to process the numerical results, the graphs corresponding to the numerical solution, and the resulting errors.

**Keywords:** System of linear fractional integro-differential equations, Caputo fractional derivative, Least Squares Method, shifted Mamadu-Njoseh polynomials.

---

\*Professor, Department of Mathematics, Faculty of Science, Lattakia University, Latakia, Syria.  
E-mail: [Suliman.mahmoud@tishreen.edu.sy](mailto:Suliman.mahmoud@tishreen.edu.sy) .

\*\* Associate Professor, Department of Mathematics, Faculty of Science, Lattakia University, Latakia, Syria.

\*\*\*postgraduate student (Master), Department of Mathematics, Faculty of Science, Lattakia University, Latakia, Syria. E-mail: [mohammed.ismaiel@tishreen.edu.sy](mailto:mohammed.ismaiel@tishreen.edu.sy) .

## 1. Introduction

Fractional calculus (FC) is an extension of classical calculus with a history spanning over 300 years. It generalizes traditional calculus by introducing integration and differentiation of non-integer (fractional) order [1]. Fractional calculus has been used to model many natural phenomena across various fields, including natural sciences and engineering. Notable applications include earthquake modeling [2], control theory [3], electrical networks, fluid flow, diffusion, electromagnetic theory, probability, statistics, potential theory, and optics [4]. Fractional integro-differential equations have garnered substantial attention from mathematicians and physicists due to their effectiveness in modeling complex dynamical systems arising in engineering and scientific disciplines such as physics, chemistry, economics, electrochemistry, electromagnetism [5], convection and radiation problems, fluid dynamics, combined conduction, chemical kinetics, and biological models [6].

In recent years, numerous papers have focused on the development of numerical and analytical techniques for fractional integro-differential equations. For instance, Saeed and Sdeq [7] have used homotopy perturbation method to solve system of linear Fredholm fractional integro-differential equations. Saleh et.al [8] have used Adomian decomposition method to solve system of linear Fredholm fractional integro-differential equations. Deif and Grace [9] have developed a new technique based on iterative refinement to approximate the analytical solution of system of linear Fredholm fractional integro-differential equations. Zedan et.al [10] have applied Chebyshev spectral method to solve a system of fractional integro-differential equations and Abel's integral equations. Barazandeh [11] has used Müntz-Legendre wavelets and their operational matrix to solve a system of fractional integro-differential equations. Bargamadi et.al [12] have employed the second Chebyshev wavelets method and its operational matrix to solve system of fractional integro-differential equations with weakly singular kernels. Masoud et.al [13] have used tau method based on monic Laguerre polynomials to solve systems of fractional integro-differential equations. Rahrovi et.al [14] have used Jacobi wavelets and its operational matrix to solve nonlinear fractional population growth model. Henka et.al [15] have applied Hermite wavelets collocation method to solve fractional Fredholm integro-differential equations.

In this paper, we present a numerical solution of a system of linear fractional integro-differential equation of the form:

$$D^\alpha u_r(x) + \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) u_k(x) = f_r(x) + \int_0^1 K_r(x, t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} u_k(t) \right) dt \quad (1)$$

$$; r = 1, 2, \dots, l, 0 \leq x, t \leq 1, \alpha > 0,$$

with the initial conditions

$$u_r^i(0) = u_{ri}, r = 1, 2, \dots, l, i = 0, 1, \dots, [\alpha] - 1, \quad (2)$$

where  $D^\alpha u_r(x)$  denotes the  $\alpha$ -th fractional derivative of  $u_r(x)$ ,  $p_{rk}(x)$  and  $f_r(x)$  are known continuous functions,  $K_r: [0,1] \times [0,1] \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $r = 1, 2, \dots, l$  are known continuous functions. Here,  $x$  and  $t$  are real variables in interval  $[0,1]$ ,  $\mu_{rk}$  are real constants, and  $u_r(x)$  is the unknown functions to be determined.

## 2. Importance and Objectives of the Research:

This study focuses on obtaining a numerical solution for a system of linear fractional integro-differential equations using the least squares method and shifted Mamadu-Njoseph Polynomials, Additionally, we assess the accuracy and efficiency of the proposed method. Such equations play a fundamental role in modeling a wide range of phenomena in science and engineering.

## 3. Methodology:

This research falls within the discipline of applied mathematics, specifically in the field of fractional integro-differential equations and numerical analysis. The mathematical techniques employed are based on approximation theory, linear algebraic systems, and computational software such as Mathematica 12.

## 4. Basic definitions of fractional calculus:

In this section, we present some basic definitions and properties of fractional calculus which are used further in this paper.

### Definition 4.1 (see [16]). Riemann–Liouville fractional integral

The Riemann–Liouville fractional integral operator of order  $\alpha$  for a function  $u$  is given by:

$$J^\alpha u(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \int_0^x (x-s)^{\alpha-1} u(s) ds, \quad \alpha >$$

$$0 \quad (3)$$

where  $J^0 u(x) = u(x)$ ,  $m-1 < \alpha \leq m$ ,  $m \in \mathbb{N}^*$ , and  $\Gamma(\cdot)$  is the Gamma function.

### Definition 4.2 (see [17]). Caputo's fractional derivative

The Caputo fractional derivative operator of order  $\alpha$  for a function  $u$  is given by:

$$D^\alpha u(x) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^x (x-s)^{m-\alpha-1} u^{(m)}(s) ds \quad (4)$$

where  $m-1 < \alpha \leq m$ ,  $m \in \mathbb{N}^*$ ,  $x > 0$ .

Hence, we have the following properties [16]:

- $J^\alpha x^\beta = \frac{\Gamma(\beta+1)}{\Gamma(\alpha+\beta+1)} x^{\alpha+\beta}$ ,  $\beta > -1$ .
- $J^\alpha D^\alpha u(x) = u(x) - \sum_{k=0}^{|\alpha|-1} u^{(k)}(0^+) \frac{x^k}{k!}$ ;  $x > 0$ .
- $D^\alpha J^\alpha u(x) = u(x)$ .
- $D^\alpha C = 0$ ,  $C$  is constant.

$$\bullet \quad D^\alpha x^\beta = \begin{cases} 0 & ; \beta \in \mathbb{N}_0, \beta < [\alpha]. \\ \frac{\Gamma(\beta+1)}{\Gamma(\beta+1-\alpha)} x^{\beta-\alpha} & ; \beta \in \mathbb{N}_0, \beta \geq [\alpha]. \end{cases}$$

### 5. Basic properties of modified Mamadu-Njoseh Polynomials

The Mamadu-Njoseh polynomials of degree  $n$  are defined on the closed interval  $[-1,1]$  by: [18]

$$\varphi_n(x) = \sum_{i=0}^n C_i^{(n)} x^i \tag{5}$$

where  $\varphi_j(x), j = 0,1,2,3 \dots$ , are orthogonal polynomials on the interval  $[-1,1]$  with respect to the weight function  $w(x) = x^2 + 1$ .

Mamadu-Njoseh polynomials are shifted on the closed interval  $[0,1]$  as follows:

$\varphi_j^*(x) = \varphi_j(2x - 1), j = 0,1,2,3 \dots$ , where  $\varphi_j^*(x), (j = 0,1,2,3 \dots)$  are called the shifted Mamadu-Njoseh polynomials. The polynomials from degree one up to seven are given as follows:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_0^*(x) &= 1, \\ \varphi_1^*(x) &= 2x - 1, \\ \varphi_2^*(x) &= \frac{1}{3}(1 - 20x + 20x^2), \\ \varphi_3^*(x) &= \frac{1}{5}(-5 + 66x - 168x^2 + 112x^3), \\ \varphi_4^*(x) &= \frac{1}{9}(9 - 196x + 910x^2 - 1428x^3 + 238x^4), \\ \varphi_5^*(x) &= \frac{1}{17}(-17 + 550x - 3990x^2 + 10800x^3 - 12210x^4 + 4884x^5), \\ \varphi_6^*(x) &= \frac{1}{133}(333 - 5976x + 62010x^2 - 252780x^3 + 478170x^4 - 422136x^5 + 140712x^6) \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

we creat The functions  $\bar{u}_{n,r}(x), (r = 1,2, \dots, l)$  by shifted Mamadu-Njoseh polynomials, as follows:

$$\bar{u}_{n,r}(x) = \sum_{i=0}^n a_i^r \varphi_i^*(x) = A_r^T \Psi(x), r = 1,2, \dots, l, \tag{7}$$

where

$$A_r^T = [a_0^r, a_1^r, \dots, a_n^r] \quad ; \quad a_i^r \in \mathbb{R} \quad ; \quad i = 0,1, \dots, n, r = 1,2, \dots, l.$$

$$\Psi(x) = [\varphi_0^*(x), \varphi_1^*(x), \dots, \varphi_n^*(x)]^T.$$

### 6. Mathematical Formulation of Proposed Method

In this section, the least squares method (LSM) with aid of shifted Mamadu-Njoseh polynomials are applied to find the numerical solution of system (1)-(2). Consider Eq. (1) operating with  $J^\alpha$  on both sides as follows:

$$J^\alpha D^\alpha u_r(x) + J^\alpha \left[ \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) u_k(x) \right] = J^\alpha f_r(x) + J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x, t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} u_k(t) \right) dt \right] \tag{8}$$

;  $r = 1,2, \dots, l$ .

We get

$$u_r(x) - \sum_{S=0}^{m-1} u_r^S(0) \frac{x^S}{S!} + J^\alpha \left[ \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) u_k(x) \right] \\ = J^\alpha f_r(x) + J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x,t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} u_k(t) \right) dt \right], r = 1, 2, \dots, l. \quad (9)$$

The function  $\bar{u}_r(x)$  can be created as a linear construct of shifted Mamadu-Njoseh polynomials, as follows:

$$\bar{u}_{n,r}(x) = \sum_{i=0}^n a_i^r \varphi_i^*(x), r = 1, 2, \dots, l. \quad (10)$$

Let  $\bar{u}_{n,r}(x)$  denote approximate solution of exact solution  $u_r(x)$ , Substituting (10) into (9), we obtain:

$$\sum_{i=0}^n a_i^r \varphi_i^*(x) - \sum_{S=0}^{m-1} u_r^S(0) \frac{x^S}{S!} + J^\alpha \left[ \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(x) \right) \right] \\ = J^\alpha f_r(x) + J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x,t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(t) \right) \right) dt \right], r = 1, 2, \dots, l. \quad (11)$$

Hence,  $R_r(x, a_0^r, a_1^r, \dots, a_n^r)$  denotes the residual equation of system (1)-(2) is given by:

$$R_r(x, a_0^r, a_1^r, \dots, a_n^r) = \sum_{i=0}^n a_i^r \varphi_i^*(x) - \sum_{S=0}^{m-1} u_r^S(0) \frac{x^S}{S!} \\ + J^\alpha \left[ \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(x) \right) \right] - J^\alpha f_r(x) \\ - J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x,t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(t) \right) \right) dt \right], r = 1, 2, \dots, l. \quad (12)$$

Letting:

$$S_r(a_0^r, a_1^r, \dots, a_n^r) = \int_0^1 [R_r(x, a_0^r, a_1^r, \dots, a_n^r)]^2 w(x) dx, r = 1, 2, \dots, l \quad (13)$$

where  $w(x)$  is the positive weight function defined on the interval  $[0,1]$ . Here, we take  $w(x) = 1$  for simplicity. Thus:

$$\begin{aligned}
 S_r(a_0^r, a_1^r, \dots, a_n^r) &= \\
 &= \int_0^1 \left( \sum_{i=0}^n a_i^r \varphi_i^*(x) \right. \\
 &\quad \left. - \sum_{s=0}^{m-1} u^s(0) \frac{x^s}{s!} + J^\alpha \left[ \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(x) \right) \right] - J^\alpha f_r(x) \right. \\
 &\quad \left. - J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x, t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(t) \right) \right) dt \right] \right)^2 dx. \tag{14}
 \end{aligned}$$

In order to minimize the functions (14), we obtained the coefficients of  $a_i^r (i = 0, 1, \dots, n)$  as follows:

$$\frac{\partial S_r}{\partial a_j^r} = 0 \quad ; \quad j = 0, 1, \dots, n, \quad r = 1, 2, \dots, l \tag{15}$$

then, we have:

$$\begin{aligned}
 &\int_0^1 \left( \sum_{i=0}^n a_i^r \varphi_i^*(x) - \sum_{s=0}^{m-1} u^s(0) \frac{x^s}{s!} + J^\alpha \left[ \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(x) \right) \right] - J^\alpha f_r(x) \right. \\
 &\quad \left. - J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x, t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} \left( \sum_{i=0}^n a_i^k \varphi_i^*(t) \right) \right) dt \right] \right) dx \\
 &\quad \times \int_0^1 \left( \varphi_j^*(x) + J^\alpha [p_{rr}(x) \varphi_j^*(x)] - J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x, t) \mu_{rr} \varphi_j^*(t) dt \right] \right) dx = 0 \tag{16}
 \end{aligned}$$

for all  $r = 1, 2, \dots, l$ , we can obtain a system of  $(n + 1)$  linear equations with  $l(n + 1)$  unknown coefficients  $a_i^k (i = 0, 1, \dots, n, k = 1, 2, \dots, l)$ . This system can be formed by using matrices form as follows:

$$H^r \beta^r = G^r, \quad r = 1, 2, \dots, l \tag{17}$$

where  $H^r$  is square matrix of order  $(n + 1)$ ,  $\beta^r$  and  $G^r$  are column vectors of order  $(n + 1)$ . For all  $0 \leq i, j \leq n$ , we have

$$\begin{cases} H^r_{ji} = \int_0^1 \aleph_i^r(x) \xi_j^r(x) dx, \\ \beta^r = (1, 1, \dots, 1)^T, \\ G^r_j = \int_0^1 \left[ J^\alpha f_r(x) + \sum_{s=0}^{m-1} u^s(0) \frac{x^s}{s!} \right] \xi_j^r(x) dx, \end{cases} \tag{18}$$

where

$$\aleph_i^r(x) = a_i^r \varphi_i^*(x) + J^\alpha \left[ \sum_{k=1}^l p_{rk}(x) a_i^k \varphi_i^*(x) \right] - J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x, t) \left( \sum_{k=1}^l \mu_{rk} a_i^k \varphi_i^*(t) \right) dt \right].$$

$$\xi_j^r(x) = \varphi_j^*(x) + J^\alpha [p_{rr}(x) \varphi_j^*(x)] - J^\alpha \left[ \int_0^1 K_r(x, t) \mu_{rr} \varphi_j^*(t) dt \right].$$

By solving the above linear system (17) we obtain the values of the unknown coefficients  $a_i^r (i = 0, 1, \dots, n, r = 1, 2, \dots, l)$ . Thus, we get the approximate solution of problem (1)-(2).

## 7. Error Estimate

**Theorem 7.1.** Let  $u(x) = [u_1(x), u_2(x), \dots, u_l(x)]^T \in R^l$  and  $\bar{u}(x) = [\bar{u}_1(x), \bar{u}_2(x), \dots, \bar{u}_l(x)]^T \in R^l$  be the exact and approximate solution vectors of the system (1)-(2), respectively. For each  $r = 1, 2, \dots, l$ , suppose that  $u_r(x) \in C^{n+1}([0, 1])$  and  $\bar{u}_{n,r}(x) = A_r^T \Psi(x)$  are linear combination of shifted Mamadu-Njoseh polynomials. Then, for  $x \in [0, 1]$ ,

$$\|u(x) - \bar{u}_n(x)\|_2 \leq \frac{\delta}{2^{2n+1} (n+1)!}, \quad (19)$$

where  $\delta = \sum_{r=1}^l \delta_r$ ;  $\delta_r$  is a constant such that  $\delta_r = \text{Max}_{x \in [0, 1]} |u_r^{(n+1)}(x)|$ ,  $r = 1, 2, \dots, l$ .

**Proof.** For each  $r = 1, 2, \dots, l$ , let  $p_{n,r}(x)$  denote the interpolating polynomial of  $u_r(x)$  at the nodes  $\{x_s, u_r(x_s)\}_{s=0}^n$ , where  $x_s (s = 0, 1, \dots, n)$  are the roots of the shifted Chebyshev polynomial of degree  $n+1$  on the interval  $[0, 1]$ . Then, according to the interpolation error, we obtain:

$$u_r(x) - p_{n,r}(x) = \frac{u_r^{(n+1)}(\gamma)}{(n+1)!} \prod_{s=0}^n (x - x_s); \quad \gamma \in [0, 1], \quad r = 1, 2, \dots, l.$$

The estimates for Chebyshev interpolation nodes are that [19]:

$$|u_r(x) - p_{n,r}(x)| \leq \frac{\delta_r}{2^{2n+1} (n+1)!}; \quad \forall x \in [0, 1], \quad r = 1, 2, \dots, l. \quad (20)$$

Since  $\bar{u}_{n,r}(x)$  is the unique best approximation of  $u_r(x)$ , then we find that:

$$\begin{aligned} \|u_r(x) - \bar{u}_{n,r}(x)\|_2^2 &\leq \|u_r(x) - p_{n,r}(x)\|_2^2 \\ &= \int_0^1 |u_r(x) - p_{n,r}(x)|^2 dx = \int_0^1 \left( \frac{\delta_r}{2^{2n+1} (n+1)!} \right)^2 dx = \left( \frac{\delta_r}{2^{2n+1} (n+1)!} \right)^2, \end{aligned}$$

then,

$$\|u_r(x) - \bar{u}_{n,r}(x)\|_2 \leq \frac{\delta_r}{2^{2n+1} (n+1)!}, \quad r = 1, 2, \dots, l.$$

Therefore, the total truncation error is:

$$\|u(x) - \bar{u}_n(x)\|_2 = \sum_{r=1}^l \|u_r(x) - \bar{u}_{n,r}(x)\|_2 \leq \sum_{r=1}^l \frac{\delta_r}{2^{2n+1} (n+1)!} \leq \frac{\delta}{2^{2n+1} (n+1)!}; \quad \delta = \sum_{r=1}^l \delta_r.$$

Thus, the proof of this theorem is completed.

## 8. Numerical Examples

In this section, we test the effectiveness of the proposed method by solving three examples. The numerical results and graphs corresponding to the numerical solution and the resulting errors were processed by using the Wolfram Mathematica software.

we denote absolute error as:

$$\text{absolute error} = |u_r(x) - \bar{u}_{n,r}(x)| ; 0 \leq x \leq 1, r = 1, 2, \dots, l,$$

where  $u_r(x)$  is the exact solution and  $\bar{u}_{n,r}(x)$  is the approximate solution.

**Example 8.1.** [8]: Consider the following system of fractional integro-differential equation:

$$\begin{cases} D^{\frac{2}{3}} u_1(x) = \frac{3}{2} \frac{x^{\frac{1}{3}} \sqrt{3} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}{\pi} - \frac{1}{6} x + \int_0^1 2 x t (u_1(x) + u_2(x)) dt, \\ D^{\frac{2}{3}} u_2(x) = \frac{9}{4} \frac{x^{\frac{4}{3}} \sqrt{3} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right)}{\pi} + \frac{5}{6} x^3 + \int_0^1 x^3 (u_1(x) - u_2(x)) dt, \end{cases} \quad (21)$$

,  $0 \leq x, t \leq 1$ , with the initial conditions  $u_1(0) = -1, u_2(0) = 0$ , the exact solutions are

$$u_1(x) = x - 1, \quad u_2(x) = x^2.$$

**Solution:** Applying the proposed method for  $(n = 3)$ , we get the values of the coefficients as:

$$\begin{cases} a_0^1 = -0.50000000000000033, a_1^1 = 0.49999999999999933, \\ a_2^1 = -4.267438841479167 \times 10^{-15}, a_3^1 = -4.957308590590608 \times 10^{-15}. \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} a_0^2 = 0.449999999999999896, a_1^2 = 0.50000000000000001, \\ a_2^2 = 0.14999999999999987, a_3^2 = 6.348710869160229 \times 10^{-16}. \end{cases} \quad (23)$$

These values are then substituted into equation (10), after simplifying we obtain the approximate solution as:

$$\begin{aligned} \bar{u}_{3,1}(x) = & -0.9999999999999991 + 0.9999999999999617 x + 1.3811597636731667 \times 10^{-13} x^2 \\ & - 1.1104371242922963 \times 10^{-13} x^3. \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \bar{u}_{3,2}(x) = & -2.22738494315422 \times 10^{-15} + 1.7430501486614958 \times 10^{-14} x \\ & + 0.9999999999999698 x^2 + 1.422111234691891 \times 10^{-14} x^3. \end{aligned} \quad (25)$$

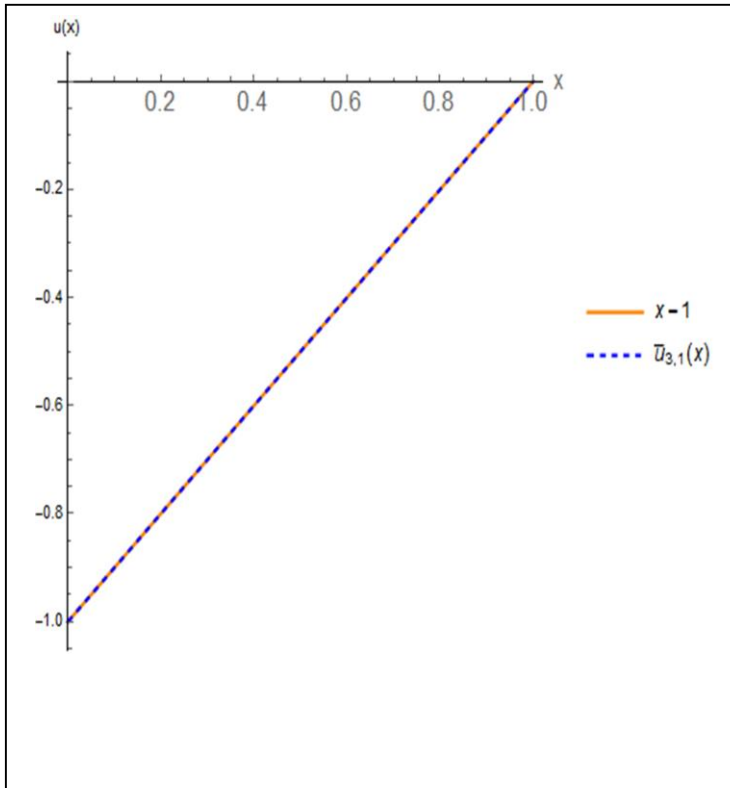
**Table 1.** Comparisons of the approximate solution with the exact solution and also displays the absolute errors for Example 8.1.

			<b>(n = 3) Present Method</b>			
<i>x</i>	<b>Exact Solution</b> $u_1(x)$	<b>Exact Solution</b> $u_2(x)$	<b>Approximate Solution</b> $\bar{u}_{3,1}(x)$	<b>Absolute Error</b> $\bar{u}_{3,1}(x)$	<b>Approximate Solution</b> $\bar{u}_{3,2}(x)$	<b>Absolute Error</b> $\bar{u}_{3,2}(x)$
0.1	-0.9	0.01	-0.90000000000000017	1.77636 E-15	0.00999999999999918	8.18789 E-16

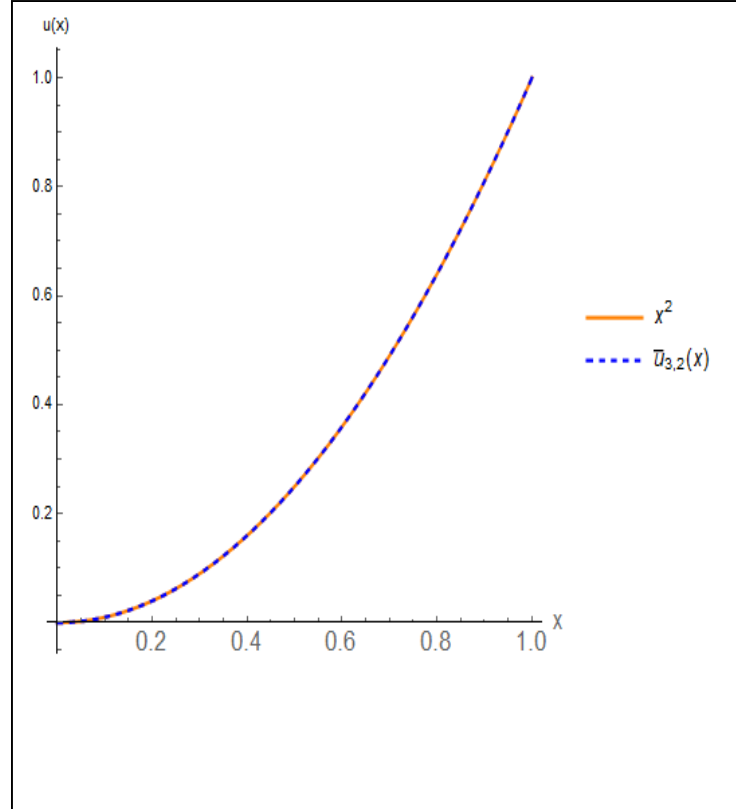
0.2	-0.8	0.04	-0.80000000000000022	2.22045 E-15	0.04000000000000002	1.94289 E-16
0.3	-0.7	0.09	-0.70000000000000012	1.11022 E-15	0.090000000000000064	6.38378 E-16
0.4	-0.6	0.16	-0.59999999999999994	5.55112 E-16	0.160000000000000092	8.88178 E-16
0.5	-0.5	0.25	-0.49999999999999976	2.44249 E-15	0.25000000000000007	7.21645 E-16
0.6	-0.4	0.36	-0.399999999999999636	3.66374 E-15	0.36000000000000003	3.33067 E-16
0.7	-0.3	0.49	-0.299999999999999644	3.55271 E-15	0.49000000000000005	1.11022 E-16
0.8	-0.2	0.64	-0.199999999999999818	1.77636 E-15	0.63999999999999999	2.22045 E-16
0.9	-0.1	0.81	-0.10000000000000027	2.66454 E-15	0.80999999999999996	4.44089 E-16
1.0	0	1.0	-0.000000000000001038	1.04361 E-14	0.99999999999999992	7.77156 E-16

Table .2. describes the absolute errors obtained in [8].

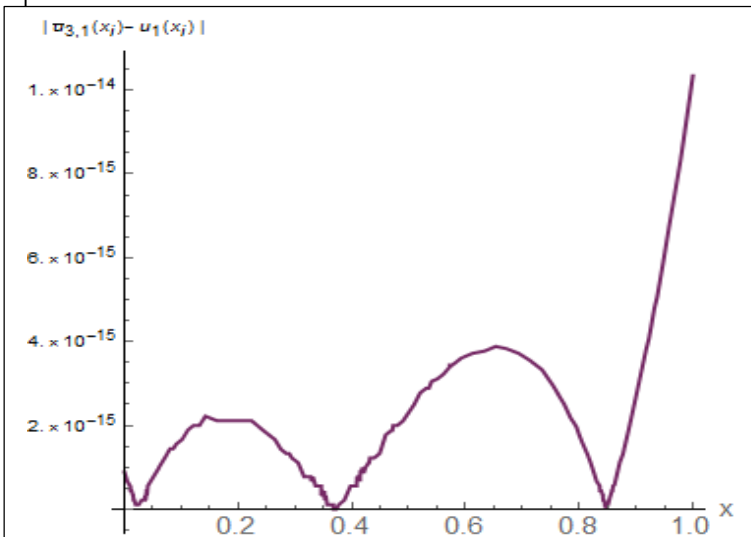
<i>Absolute Errors of Adomian decomposition method [8]</i>		
<i>(n = 3)</i>		
<i>x</i>	<i>Absolute Error</i> $\bar{u}_{3,1}(x)$	<i>Absolute Error</i> $\bar{u}_{3,2}(x)$
0.1	7.77629 E-5	7.8584 E-8
0.2	2.468819 E-4	9.9796 E-7
0.3	4.852601 E-4	4.41348 E-6
0.4	7.838011 E-4	1.26733 E-5
0.5	1.1369007 E-3	2.87228 E-5
0.6	1.5406049 E-3	5.60477 E-5
0.7	1.9919080 E-3	9.86345 E-5
0.8	2.4884133 E-3	1.609408 E-4
0.9	3.0281453 E-3	2.478708 E-4
1.0	3.609435 E-3	3.647564 E-4



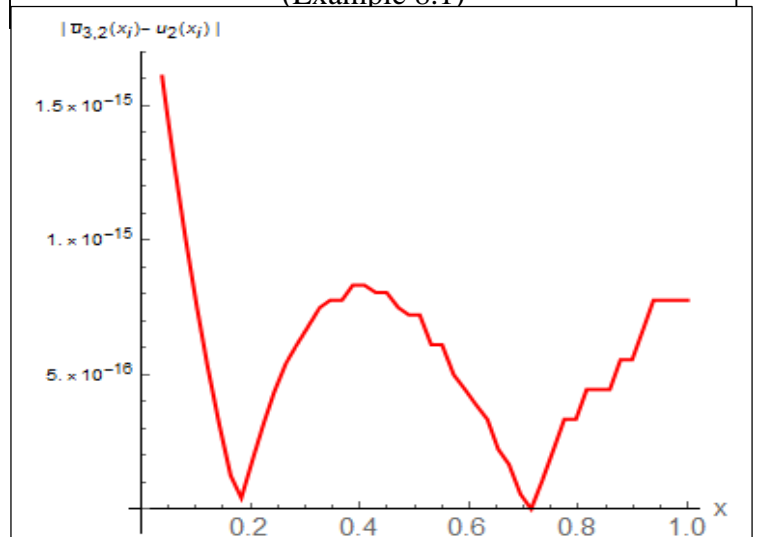
**Figure 1:** A comparisons between the exact and approximate solution of  $u_1(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.1)



**Figure 2:** A comparisons between the exact and approximate solution of  $u_2(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.1)



**Figure 3:** The absolute errors of the numerical solution of  $\bar{u}_{3,1}(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.1)



**Figure 4:** The absolute errors of the numerical solution of  $\bar{u}_{3,2}(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.1)

**Example 8.2.** [7]: Consider the following system of fractional integro-differential equation:

$$\begin{cases} D^{\frac{1}{2}} u_1(x) = \frac{2\sqrt{x}}{\sqrt{\pi}} - \frac{5}{6} + \int_0^1 (u_1(t) + u_2(t)) dt, \\ D^{\frac{3}{2}} u_2(x) = \frac{4\sqrt{x}}{\sqrt{\pi}} - \frac{x}{6} + \int_0^1 x(u_1(t) - u_2(t)) dt, \end{cases} \quad (26)$$

,  $0 \leq x, t \leq 1$ , with the initial conditions  $u_1(0) = 0, u_2(0) = 0$ , the exact solutions are  $u_1(x) = x, u_2(x) = x^2$ .

**Solution:** Applying the proposed method for  $(n = 3)$ , we get the values of the coefficients as:

$$\begin{cases} a_0^1 = 0.50000000000000019, a_1^1 = 0.50000000000000002, \\ a_2^1 = 3.446428177401212 \times 10^{-17}, a_3^1 = -1.081683337748663 \times 10^{-18}. \end{cases} \quad (27)$$

$$\begin{cases} a_0^2 = 0.449999999999999685, a_1^2 = 0.50000000000000002, \\ a_2^2 = 0.149999999999999583, a_3^2 = 2.092690934642706 \times 10^{-15}. \end{cases} \quad (28)$$

These values are then substituted into equation (10), after simplifying we obtain the approximate solution as:

$$\bar{u}_{3,1}(x) = 1.677904314200154 \times 10^{-15} + 1.00000000000000002 x + 2.661064386417692 \times 10^{-16} x^2 - 2.4229706765570074 \times 10^{-17} x^3. \quad (29)$$

$$\bar{u}_{3,2}(x) = -6.862566070964249 \times 10^{-15} + 5.595524044110789 \times 10^{-14} x + 0.99999999999999019 x^2 + 4.687627693599663 \times 10^{-14} x^3. \quad (30)$$

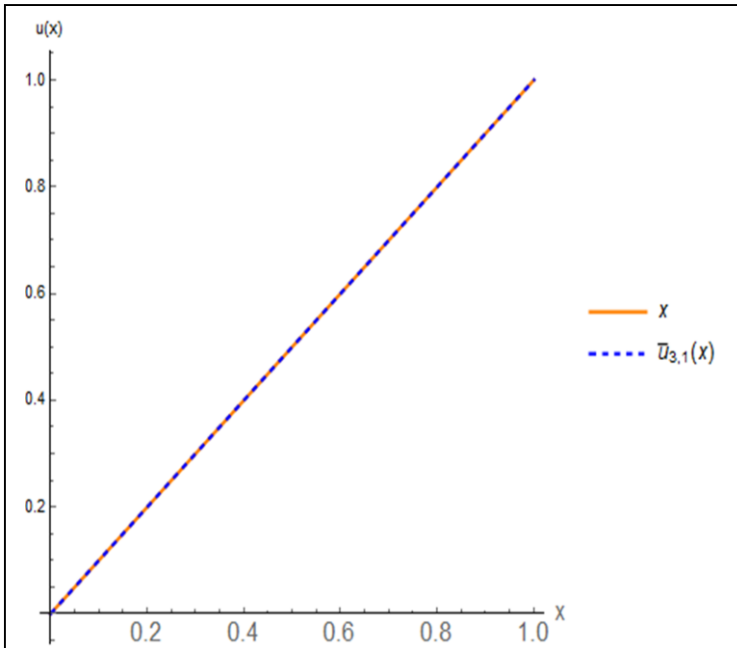
**Table 3.** Comparisons of the approximate solution with the exact solution and also displays the absolute errors for Example 8.2.

			$(n = 3)$ Present Method			
$x$	Exact Solution $u_1(x)$	Exact Solution $u_2(x)$	Approximate Solution $\bar{u}_{3,1}(x)$	Absolute Error $\bar{u}_{3,1}(x)$	Approximate Solution $\bar{u}_{3,2}(x)$	Absolute Error $\bar{u}_{3,2}(x)$
0.1	0.1	0.01	0.100000000000000168	1.67921 E-15	0.009999999999997788	2.21351 E-15
0.2	0.2	0.04	0.200000000000000176	1.7486 E-15	0.04000000000000083	8.18789 E-16
0.3	0.3	0.09	0.300000000000000177	1.77636 E-15	0.09000000000000233	2.33147 E-15
0.4	0.4	0.16	0.40000000000000018	1.77636 E-15	0.16000000000000283	2.80331 E-15
0.5	0.5	0.25	0.50000000000000019	1.88738 E-15	0.25000000000000244	2.44249 E-15

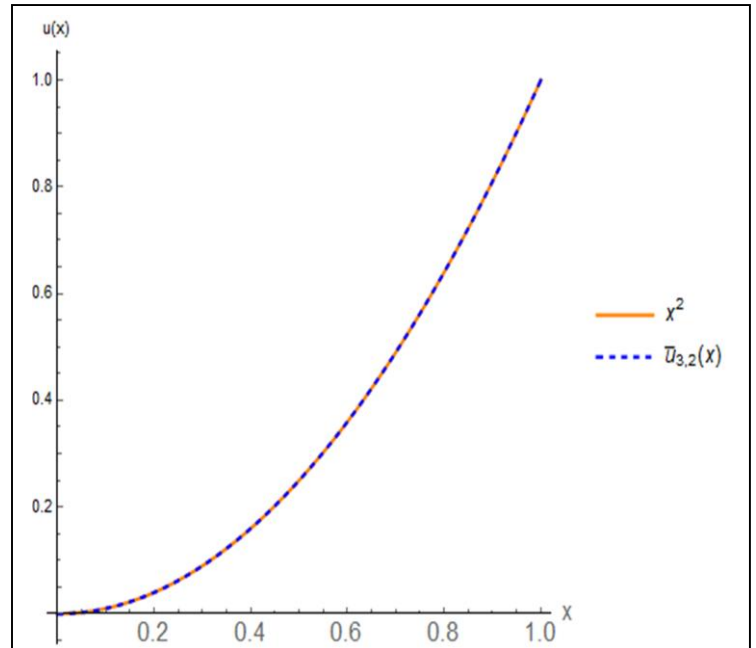
0.6	0.6	0.36	0.60000000000000019	1.88738 E-15	0.36000000000000014	1.38778 E-15
0.7	0.7	0.49	0.70000000000000002	1.9984 E-15	0.49000000000000002	2.77556 E-16
0.8	0.8	0.64	0.80000000000000002	1.9984 E-15	0.63999999999999992	8.88178 E-16
0.9	0.9	0.81	0.90000000000000021	2.10942 E-15	0.80999999999999983	1.77636 E-15
1.0	1.0	1.0	1.00000000000000022	2.22045 E-15	0.99999999999999978	2.22045 E-15

**Table .4.** describes the absolute errors obtained in [7].

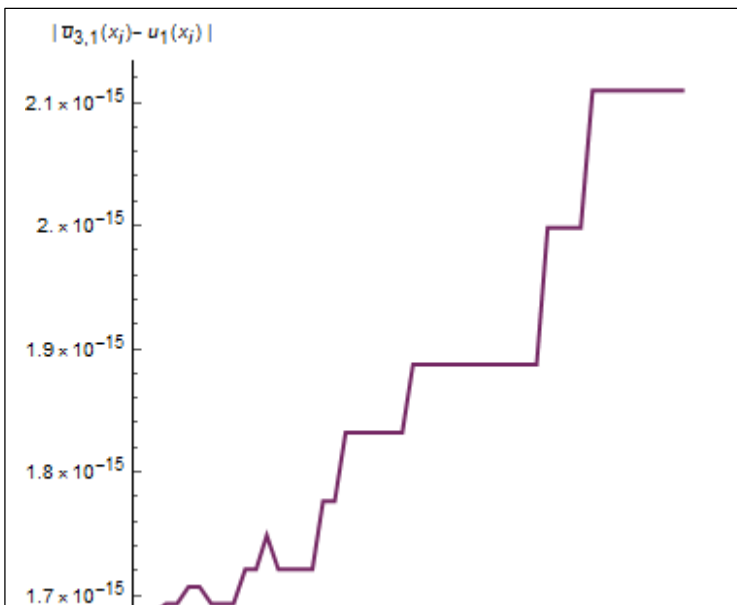
<b>Absolute errors of homotopy perturbation method [7]</b>				
	<b>(n = 2)</b>		<b>(n = 6)</b>	
<b>x</b>	<b>Absolute Error</b> $\bar{u}_{2,1}(x)$	<b>Absolute Error</b> $\bar{u}_{2,2}(x)$	<b>Absolute Error</b> $\bar{u}_{6,1}(x)$	<b>Absolute Error</b> $\bar{u}_{6,2}(x)$
0.2	1.703 E-1	2.319 E-6	1.4219 E-7	1.0926 E-6
0.4	3.818 E-1	1.300 E-3	4.0217 E-7	6.1805 E-6
0.6	4.677 E-1	3.610 E-2	7.4485 E-7	1.700 E-3
0.8	5.400 E-1	7.420 E-2	1.1375 E-6	3.460 E-2
1.0	6.037 E-1	1.2920 E-1	1.5897 E-6	6.080 E-2



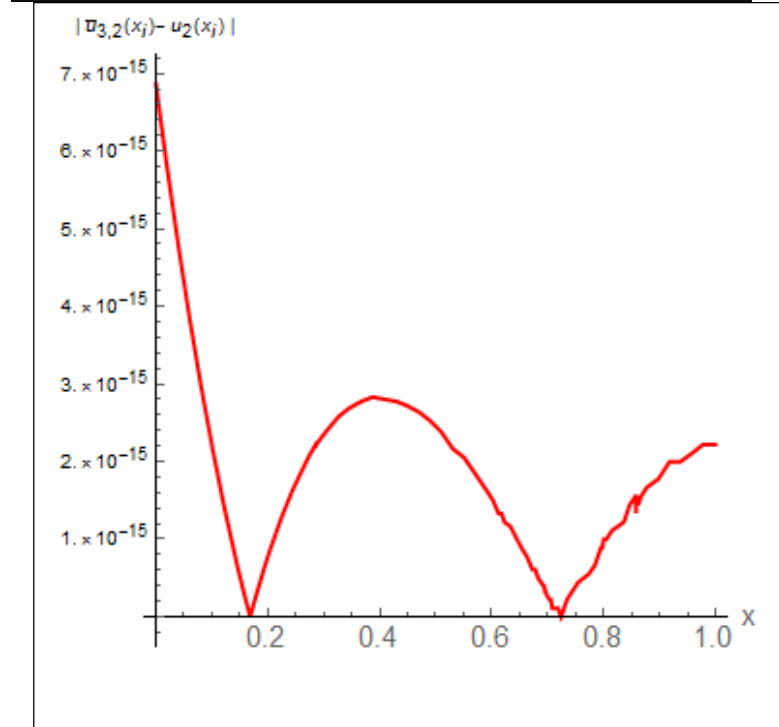
**Figure 5:** A comparisons between the exact and approximate solution of  $u_1(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.2)



**Figure 6:** A comparisons between the exact and approximate solution of  $u_2(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.2)



**Figure 7:** The absolute errors of the numerical solution of  $\bar{u}_{3,1}(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.2)



**Figure 8:** The absolute errors of the numerical solution of  $\bar{u}_{3,2}(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.2)

$$\begin{cases} D^{0.5} u_1(x) = \frac{2\sqrt{x}}{\sqrt{\pi}} - \frac{x}{2} + \int_0^1 x u_2(x) dt, \\ D^{0.5} u_2(x) = \frac{2\sqrt{x}}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{3} + \int_0^1 t u_1(x) dt, \end{cases} \quad (31)$$

,  $0 \leq x, t \leq 1$ , with the initial conditions  $u_1(0) = 0$ ,  $u_2(0) = 0$ , the exact solutions are  $u_1(x) = x$ ,  $u_2(x) = x$ .

**Solution:** Applying the proposed method for  $(n = 3)$ , we get the values of the coefficients as:

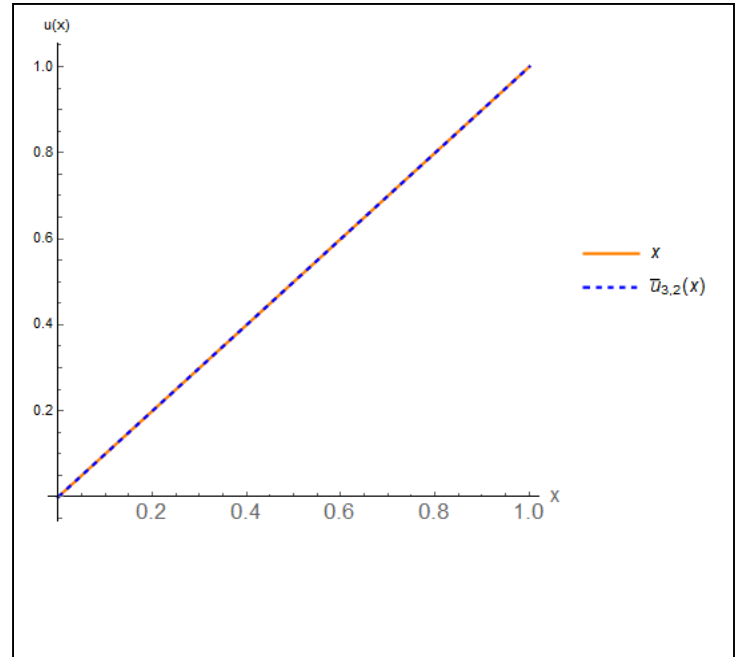
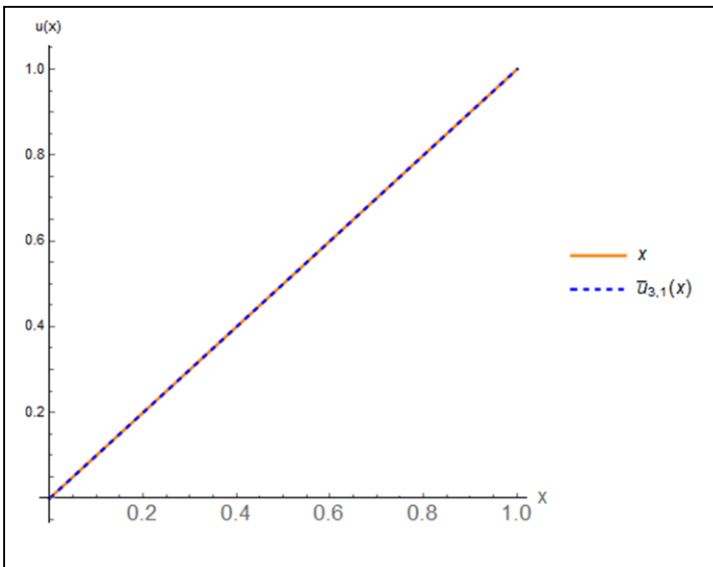
$$\begin{cases} a_0^1 = 0.50000000000000007, a_1^1 = 0.5, \\ a_2^1 = 6.726501124136422 \times 10^{-16}, a_3^1 = -1.555809373523603 \times 10^{-17}. \end{cases} \quad (32)$$

$$\begin{cases} a_0^2 = 0.50000000000000002, a_1^2 = 0.49999999999999994, \\ a_2^2 = 3.002831050605498 \times 10^{-16}, a_3^2 = 8.26058798084202 \times 10^{-18}. \end{cases} \quad (33)$$

These values are then substituted into equation (10), after simplifying we obtain the approximate solution as:

$$\bar{u}_{3,1}(x) = 9.059086126482105 \times 10^{-16} + 0.9999999999999953 x + 5.007086032261545 \times 10^{-15} x^2 - 3.485012996692871 \times 10^{-16} x^3. \quad (34)$$

$$u_{3,2}(x) = 3.693895365289637 \times 10^{-16} + 0.9999999999999998 x + 1.72433161091404 \times 10^{-15} x^2 + 1.850371707708612 \times 10^{-16} x^3. \quad (35)$$



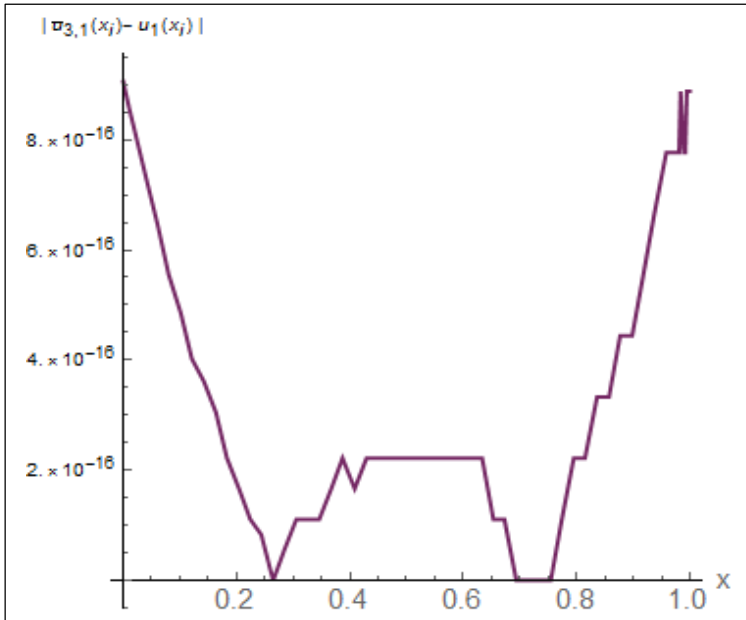
**Figure 9:** A comparisons between the exact and approximate solution of  $u_1(x)$  for  $(n = 3)$  (Example 8.3).

**Table 5.** Comparisons of the approximate solution with the exact solution and also displays the absolute errors for Example 8.3.

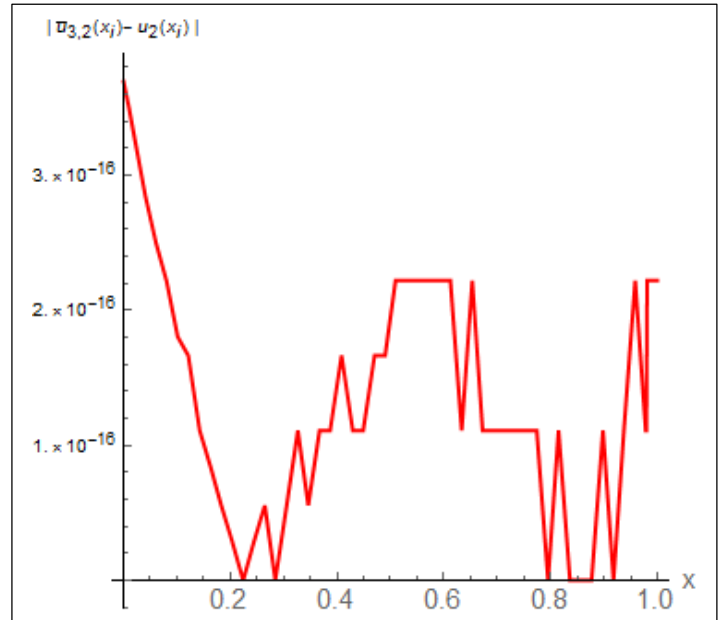
			<i>(n = 3) Present Method</i>			
<i>x</i>	<i>Exact solution</i> $u_1(x)$	<i>Exact solution</i> $u_2(x)$	<i>Approximate solution</i> $\bar{u}_{3,1}(x)$	<i>Absolute error</i> $\bar{u}_{3,1}(x)$	<i>Approximate solution</i> $\bar{u}_{3,2}(x)$	<i>Absolute error</i> $\bar{u}_{3,2}(x)$
0.1	0.1	0.1	0.100000000000000046	4.57967 E-16	0.100000000000000017	1.66533 E-16
0.2	0.2	0.2	0.200000000000000018	1.66533 E-16	0.200000000000000007	5.55112 E-17
0.3	0.3	0.3	0.29999999999999993	5.55112 E-17	0.29999999999999993	5.55112 E-17
0.4	0.4	0.4	0.39999999999999986	1.66533 E-16	0.39999999999999986	1.66533 E-16
0.5	0.5	0.5	0.49999999999999998	2.22045 E-16	0.49999999999999983	1.66533 E-16
0.6	0.6	0.6	0.59999999999999998	2.22045 E-16	0.59999999999999999	1.11022 E-16
0.7	0.7	0.7	0.7	0	0.69999999999999998	1.11022 E-16
0.8	0.8	0.8	0.80000000000000003	2.22045 E-16	0.8	0
0.9	0.9	0.9	0.90000000000000005	4.44089 E-16	0.9	0
1.0	1.0	1.0	1.00000000000000009	8.88178 E-16	1.00000000000000002	2.22045 E-16

**Table .6.** describes the absolute errors obtained in [7].

<i>Absolute errors of homotopy perturbation method [7]</i>				
	<i>(n = 2)</i>		<i>(n = 6)</i>	
<i>x</i>	<i>Absolute Error</i> $\bar{u}_{2,1}(x)$	<i>Absolute Error</i> $\bar{u}_{2,2}(x)$	<i>Absolute Error</i> $\bar{u}_{6,1}(x)$	<i>Absolute Error</i> $\bar{u}_{6,2}(x)$
0.2	5.4392 E-6	2.700 E-3	1.4219 E-7	7.1093 E-7
0.4	1.500 E-3	3.870 E-2	4.0217 E-7	1.0054 E-6
0.6	2.800 E-3	4.690 E-2	7.4485 E-7	1.2314 E-6
0.8	4.360 E-2	5.480 E-2	1.1375 E-6	1.4219 E-6
1.0	6.080 E-2	6.080 E-2	1.5897 E-6	1.5897 E-6



**Figure 11:** The absolute errors of the numerical solution of  $\bar{u}_{3,1}(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.3)



**Figure 12:** The absolute errors of the numerical solution of  $\bar{u}_{3,2}(x)$  for  $(n = 3)$ . (Example 8.3)

## 9. Conclusion

In this paper, we presented a numerical method to solve system of linear fractional integro-differential equations. The numerical results showed the accuracy and effectiveness of the method compared with other methods such as homotopy perturbation method [7], Adomian decomposition method [8]. The graphs showed the convergence of the numerical solution to the analytical solution along the solution interval. We have computed the numerical results using the Mathematica 12 programming.

## References:

- [1] LAZAREVIĆ, M.P, RAPAIĆ, M.R, ŠEKARA, T.B, MLADENOV, V 2014-Introduction to fractional calculus with brief historical background. Advanced topics on applications of fractional calculus on control problems, system stability and modeling, 3-16.
- [2] EL-MISIERY, A. E. M and AHMED, E 2006-On a fractional model for earthquakes. *Applied mathematics and computation*, 178(2), 207-211.
- [3] BOHANNAN, G. W 2008-Analog fractional order controller in temperature and motor control applications. *Journal of Vibration and Control*, 14(9-10), 1487-1498.
- [4] AHMED, S. S and MOHAMMEDFAEQ, S. J 2021-Bessel collocation method for solving Fredholm–Volterra integro-fractional differential equations of multi-high order in the caputo sense. *Symmetry*, 13(12), 1-27.

- [5] HAMOUD, A. A and GHADLE, K. P 2018-Modified Laplace decomposition method for fractional Volterra-Fredholm integro-differential equations. Journal of Mathematical Modeling, 6(1), 91-104.
- [6] KAZEM, M. F and AL-FAYADH, A 2022-Solving Fredholm integro-differential equation of fractional order by using Sawi homotopy perturbation method. In Journal of Physics: Conference Series, 2322(1), 1-11.
- [7] SAEED, R. K and SDEQ, H. M 2010-Solving a system of linear fredholm fractional integro-differential equations using homotopy perturbation method. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 4(4), 633-638.
- [8] SALEH, M. H, MOHAMED, D. S, AHMED, M. H, MARJAN, M. K 2015-System of linear fractional integro-differential equations by using Adomian decomposition method. International Journal of Computer Applications, 121(24), 9-19.
- [9] Deif, S. A and Grace, S.R 2016-Iterative refinement for a system of linear integro-differential equations of fractional type. Journal of Computational and Applied Mathematics, 294, 138-150.
- [10] ZEDAN, H. A, TANTAWY, S. S and SAYED, Y. M 2017-New Solutions for System of Fractional Integro- Differential Equations and Abel's Integral Equations by Chebyshev Spectral Method. Mathematical Problems in Engineering, 2017(1), 1-13.
- [11] BARAZANDEH, Y 2021-Approximate solution for a system of fractional integro-differential equations by Müntz Legendre wavelets. Iranian Journal of Numerical Analysis and Optimization, 11(1), 55-72.
- [12] BARGAMADI, E, TORKZADEH, L, NOURI, K, JAJARMI, A 2021-Solving a system of fractional-order Volterra-Fredholm integro-differential equations with weakly singular kernels via the second Chebyshev wavelets method. Fractal and Fractional, 5(3), 1-14.
- [13] MASOUD, M 2022-Numerical solution of systems of fractional order integro-differential equations with a Tau method based on monic Laguerre polynomials. Journal of Mathematical Analysis and Modeling, 3(3), 1-13.
- [14] RAHROVI, Y, MAHMOUDI, Y, SALIMI SHAMLOO, A, JAHANGIRI RAD, M 2023-Jacobi wavelets method for numerical solution of fractional population growth model. Computational Methods for Differential Equations, 11(2), 387-398.
- [15] HENKA, Y, LEMITA, S and AISSAOUI, M. Z 2023-Hermite wavelets collocation method for solving a Fredholm integro-differential equation with fractional Caputo-Fabrizio derivative. Proyecciones (Antofagasta), 42(4), 917-930.
- [16] MAHMOUD, S. M, EHSSAN, S. H and ISMAIEL, M. H 2025- Numerical solution of some fractional integro-differential equations using Bernstein and Laguerre approximations. Lattakia University Journal for Research and Scientific Studies. 4(3).
- [17] MAHMOUD, S. M, EHSSAN, S. H and DAHER, H. N 2020-Numerical Solutions of Fractional Differential Equations and Fractional Volterra Integro-Differential Equations by Spline Functions. 42(15), 57-75.
- [18] NJOSEH, I. N and EBIMENE, J. M 2016-Numerical solutions of fifth order boundary value problems using Mamadu-Njoseh polynomials. Science World Journal, 11(4), 21-24.

[19] BRISEBARRE, N and JOLDEŞ, M 2010-Chebyshev interpolation polynomial-based tools for rigorous computing. In Proceedings of the 2010 International Symposium on Symbolic and Algebraic Computation, 147-154.