

Calculation of the Logarithmic Half-life of the Alpha Decay of Radioisotopes Used in Nuclear Medicine Using a Developed Semi-empirical Formula

Dr. Haisam Jbeli *

Eyas Rahal**

(Received 7 / 12 / 2022. Accepted 27 / 4 /2023)

□ ABSTRACT □

The half-life is a unique property of radioactive isotopes used in a variety of applications including those of nuclear medicine. Researchers have proposed several empirical and semi-empirical models to obtain the alpha decay half-life of radionuclides. In this research, a formula was developed (A semi-empirical model), and fitted and applied to isotopes that decay according to alpha decay, in order to obtain their half-life. The results were in agreement with the experimental half-life data for radioisotopes of heavy alpha particles (HN) and super heavy isotopes (SHN), and the developed formula showed good agreement for light radioisotopes. The calculated standard deviation was /0.826/ for the radioisotopes used in nuclear medicine.

Keywords: half-life, alpha decay, radioactive isotopes, nuclear medicine, least squares method, standard deviation.

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria. jbelihaisam@gmail.com

** Postgraduate Student (Master), Department of Physics, Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria. eyasrahal@gmail.com

حساب عمر النصف اللوغاريتمي لتفكك ألفا للنظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي باستخدام صيغة شبه تجريبية مطورة

د . هيثم جبيلي *

إياس رحال **

تاريخ الإيداع 7 / 12 / 2022. قُبِلَ للنشر في 27 / 4 / 2023

□ ملخص □

يعتبر عمر النصف خاصة فريدة من نوعها للنظائر المشعة المستخدمة في مجموعة متنوعة من التطبيقات ومنها تطبيقات الطب النووي. اقترح باحثون العديد من العلاقات التجريبية وشبه التجريبية للحصول على عمر نصف تفكك ألفا للنظائر النووية المشعة. تم في هذا البحث، تطوير صيغة شبه تجريبية (Developed semi-empirical model) وملاءمتها وتطبيقها على نظائر تفكك وفق تفكك ألفا، من أجل الحصول على عمر النصف لها. كانت النتائج متوافقة مع معطيات عمر النصف التجريبية، للنظائر المشعة لجسيمات ألفا الثقيلة (HN) والنظائر فوق الثقيلة (SHN)، وأبدت الصيغة المطورة توافق جيد للنظائر المشعة الخفيفة. وكان الانحراف المعياري المحسوب /0.826/ بما يخص النظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي.

الكلمات المفتاحية : عمر النصف، تفكك ألفا، نظائر مشعة، طب نووي، طريقة المربعات الصغرى، الانحراف المعياري.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

* أستاذ- قسم الفيزياء- كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية jbelihaisam@gmail.com

**طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم الفيزياء- كلية العلوم- جامعة تشرين - اللاذقية- سورية eyasrahal@gmail.com

مقدمة:

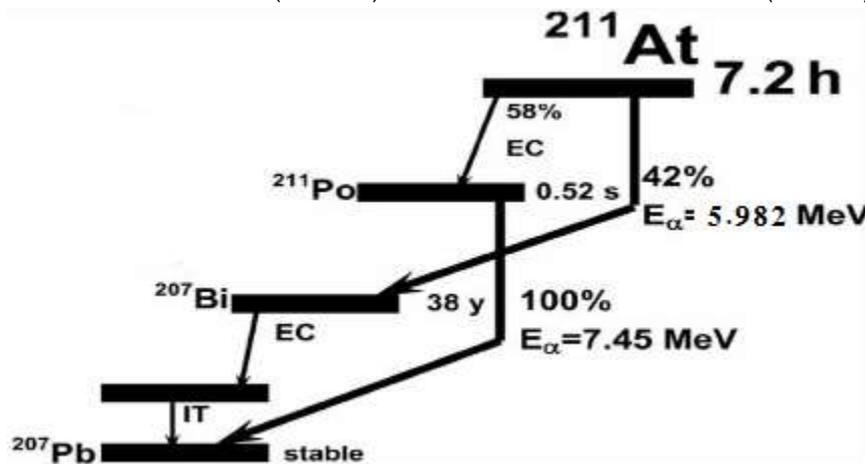
تطورت في العقود الماضية العديد من التطبيقات العلاجية للطب النووي والتي تستخدم النظائر المشعة، أهمها العلاج بالنظائر المشعة المستهدفة (Targeted radionuclide therapy- TRT). حيث يستخدم العلاج بالنظائر المشعة المستهدفة (TRT) النظائر المشعة التي تتبع منها جسيمات نووية تقتل الخلايا الحية وقد تم تأسيسها كخيار علاجي للسرطان [1، 2]. أدى التقدم في المجالات العلمية إلى زيادة الاهتمام بأحد التقنيات والتي تدعى العلاج بجسيمات ألفا المستهدفة (targeted alpha therapy- TAT)، ويعزى التطور السابق، لأن جسيمات ألفا تمتلك عمق اختراق (مدى) قصير للخلايا الحية ونقل طاقة خطي عالي (linear energy transfer LET) [3، 4]، مما يجعلها مناسبة لتثبيط وقتل خلايا محددة- ضمن ورم ما- بدون التأثير على بقية الأنسجة الحية المحيطة بالورم [4]. وعلى الرغم من وجود العديد من النظائر المشعة لجسيمات ألفا إلا أنه يمكن استغلال القليل منها فقط لأغراض علاجية [5، 6]، مما يجعل دراسة العوامل التي تعيق استخدام هذه التقنية وانتشارها ضرورية.

ان أحد العوامل المهمة في هذه التقنية هو عمر النصف للنظير المشع المستخدم [6]، ويرتبط عمر النصف ارتباطاً وثيقاً بكافة مراحل هذه التقنية، حيث يجب أن يكون عمر النصف مناسباً لضمان وصول النظير المشع من أماكن الإنتاج (مسرات- مفاعلات نووية) إلى أماكن الاستخدام (المشافي- مراكز الطب النووي). كما يجب أن يكون مناسباً حيوياً لضمان أقل جرعة إشعاع فعالة ممكنة لجسم المريض.

تعد مسألة اختيار النظير المشع لجسيمات ألفا المناسب لـ (TAT) بالغة الأهمية [4]، فعمر النصف للنظير المشع يجب ألا يكون قصيراً للسماح بوقت كاف للإنتاج، والتخليق الصيدلاني، والتسليم للمريض، كما يجب ألا يكون عمر النصف للنوى المشعة الوليدة طويلاً جداً لتجنب الجرعة الزائدة للمريض.

ونبين فيما يلي النظائر المصدرة لألفا، التي تحقق الشروط المتعلقة بعمر النصف المناسب للنواة الأم والنواة الوليدة (الأبنة)، حتى يمكن استخدامها في (TAT)، وأهمها النظائر التالية [7]:

يتمتع نظير الأوستاتين (^{211}At)، المبين مخطط تفككه في الشكل (1)، بأهمية عالية في TAT، فهو يتفكك في سلسلة متفرعة معطياً جسيمات ألفا نسبة 42%، والتي تودع في الأنسجة الحية المستهدفة بنسبة 100%. كما يتمتع نظير البيزموت (^{211}Bi) بخصائص مشابهة لنظير الأوستاتين (^{211}At).



الشكل (1): مخطط تفكك نظير الأوستاتين ^{211}At ، المصدر لجسيمات ألفا، ذو الأهمية العالية في الطب النووي.

ينتج نظير الراديوم (Ra-224) من سلسلة التفكك الطبيعي لـ (Th-232)، معطياً ثلاث جسيمات ألفا، قبل أن يتحول إلى نظير الرصاص (Pb-212)، الذي يتفكك بدوره وفق تفكك بيتا، لكنه يعتبر مولداً لنظير البزموت (Bi-212) ذو الأهمية العالية في TAT، كونه - بشكل مماثل للأوستاتين- يتفكك في سلسلة متفرعة بنسبة 100 % وفق ألفا.

تحتوي سلسلة تفكك اليورانيوم (U-233) على نظيرين مهمين جداً لـ TAT وهما (Ac-225) و (Bi-213). يعتبر (Ac-225) أهم النظائر المشعة لجسيمات ألفا في TAT بشكل خاص والطب النووي بشكل عام، لأنه يعطي في سلسلة تفككه خمسة جسيمات ألفا ذات طاقة عالية نسبياً، مداها صغير داخل الأنسجة الحية، بالإضافة لإصدار فوتون قابل للتصوير من أحد نواتجه (Bi-213)، الذي بدوره يتفكك بسلسلة متفرعة معطياً المزيد من جسيمات ألفا. تحتوي سلسلة التفكك الطبيعي لليورانيوم (U-235) والتي تدعى سلسلة الاكتينيوم (Ac-227) على نظيرين مهمين جداً في الطب النووي، وتحديداً TAT. يعتبر Ac-227 مولد لهذين النظيرين، (Th-227) و (Ra-223)، اللذان تكمن أهميتهما انهما مصدران لجسيمات ألفا عالية الطاقة ذات نقل طاقة خطي عالي (LET) للأنسجة الحية. تكمن أهمية نظير التريبيوم (Tb-149)، كونه يمتلك خصائص علاجية، بالإضافة كونه يتفكك معطياً جسيمات ألفا بنسبة 17 %، مطلقاً لحزمة غاما عالية الطاقة.

يعطي نظير الفيرميوم (Fm-255) أثناء تفككه جسيماً ألفا بنسب مئوية مختلفة. توجد نظائر أخرى مفيدة لتقنية TAT، مثل (Th-226 و U-230)، تعطي العديد من جسيمات ألفا أثناء تفككها مودعةً طاقة كبيرة نسبياً في الأنسجة الحية.

ان النمط الرئيسي لتفكك العناصر الثقيلة (HN) والعناصر فائقة الثقل (SHN) هي التفكك وفق جسيمات ألفا والانقسام التلقائي. وللتحقق من تفكك ألفا، تمت دراسة الصيغ التفسيرية المختلفة التي قدمها باحثون مختلفون. تم توصيف تفكك ألفا لأول مرة بواسطة رذرفورد (Rutherford) في بداية القرن الماضي. مقدماً واحدة من أهم الأدوات للحصول على معلومات البنية النووية وتحديد النظائر الجديدة أو العناصر الجديدة [8]. في عام 1911، قدم غايغر ونوتال (Geiger H and Nuttall) أول صيغة تجريبية لعمر نصف تفكك ألفا [9]:

$$\log_{10} \left(T_{\frac{1}{2}} \right) (s) = aQ^{-\frac{1}{2}} + b \quad (1)$$

عيب هذه الصيغة هو أن الوسيطين "a" و "b" تعتمدان على سلسلة النظائر. لكن في عام 1928 تم وصف تفكك ألفا بنجاح على أنه تأثير نفق كمي بشكل مستقل بواسطة غاموف (Gamow) [10] وكوندون وجورني (Condon E U and Gurney R W) [11]. منذ ذلك الحين تم دراسة تفكك ألفا وفق كلا النهجين التجريبي والنظري [12، 13].

تُظهر الدراسات المرجعية، أنه تم اقتراح العديد من الصيغ شبه التجريبية لحساب عمر نصف تفكك ألفا، والذي يعتمد على طاقات تفكك ألفا (Q_{α}) والعدد الذري Z وعدد الكتلة للنواة A. مثل صيغة فيولا وسيبورج [14]: (V.E. Viola, G.T. Seaborg- VSS)

$$\log_{10} \left(T_{\frac{1}{2}} \right) (s) = (aZ + b)Q^{-\frac{1}{2}} + cZ + d + h_{log} \quad (2)$$

حيث يُقدر عمر النصف بالثواني، وتقدر قيمة Q_{α} بالـ MeV، و Z هو العدد الذري للنواة الأم، المعاملات a b c d تم الحصول عليها من خلال ملائمة النوى المتفككة ذات النوعية الزوجية الزوجية (e-e)، أما الثابت h_{log} فهو يمثل

اختلاف نوعية النوى ($Z-N$) ويأخذ القيمة (0) للنوى ($e-e$) أما بالنسبة للنوى ($e-o$)، ($o-e$)، ($o-o$)، فهو يأخذ القيم: $1.066 - 0.772 - 1.114$ على الترتيب.

قامت فيولا ببناء معادلة عمر النصف اللوغاريتمية من خلال تضمين وسائط التقاطع والاعتماد الخطي على رقم الشحنة لنواة الابنة، وحدد معاملات هذه العلاقة شبه التجريبية سوبيتشوسكي وباتيك وكويك (A. Sobiczewski, Z. Patyk, S. Cwiok) [15].

في عام 1992، طور براون (B.A. Brown) [16]، علاقة نصف تجريبية لعمر النصف اللوغاريتمي لتفكك ألفا مشتقة من قانون غايغر- نوتال للنوى فائقة الثقل، تتضمن Z_H (العدد الذري للنواة الابنة) و Q_α (طاقة تفكك ألفا)، وفي العام 2000 أنشأ (Royer) [17] صيغة تجريبية لعمر نصف تفكك ألفا. تم تطوير العديد من الصيغ التجريبية وشبه التجريبية، ذات المعاملات القابلة للتعديل واستنتاج قيمها التجريبية. تشتق كل هذه الصيغ من حالات مختلفة في نظرية غاموف [10] ونظريات أخرى. حيث تعتمد جميع الصيغ تقريباً على العدد الذري Z والعدد الكتلي A والطاقة المنبعثة Q_α . قام العديد من الباحثين [18] بإحصاء أغلب هذه الطرق وتحليلها، وتعتبر أوجه الارتياح في تلك الصيغ المتوفرة في المراجع مهمة للحساب الدقيق لعمر نصف تفكك ألفا.

إن التحقق من هذه الصيغ المتاحة، وإنشاء معادلة دقيقة لتفكك ألفا للنوى الثقيلة (HN) والفرق الثقيلة (SHN)، أمر مهم في اكتشاف نظائر جديدة للنوى الثقيلة وفائقة الثقل. تم إجراء هذا البحث في قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين.

أهمية البحث وأهدافه :

- التطور التقني في الطب النووي في العقود الأخيرة أدى لابتكار تقنيات حديثة تعتمد على النظائر المشعة اعتماداً وثيقاً، وخاصة التقنيات المتعلقة بالنظائر المشعة لجسيمات ألفا، أهمها (TAT)، التي تعتمد بشكل أساسي على خواص فيزيائية مهمة للنظائر المشعة لجسيمات ألفا (كعمر النصف والنقل الخطي للطاقة ونوع النواة الوليدة) والتي تمثل صلب هذا البحث.
- من بين النظائر المشعة لجسيمات ألفا والموجودة في الطبيعة، هناك عدد قليل منها ذات أهمية للتطبيقات العلاجية أو التشخيصية في الطب النووي، لذلك تعد مسألة البحث عن النظير المشع المناسب مسألة بالغة الأهمية، تتعلق بالعديد من العوامل أهمها عمر النصف، وهنا تكمن أهمية عمر النصف للنظير المشع المستخدم.
- التعرف على الصيغ شبه التجريبية التي تعطي عمر النصف للنظير المشع لجسيمات ألفا واستخدام إحدى هذه الصيغ وتطبيقها على بيانات نووية حديثة مأخوذة من المراجع.
- اقتراح صيغة شبه تجريبية للحصول على عمر النصف لنظائر مشعة لجسيمات ألفا، والمستخدم في الطب النووي.

طرائق البحث ومواده :

- 1- طريقة المربعات الصغرى المستخدمة وملاءمة البيانات النووية (Least Squares Fitting of Data): تعتمد هذه الطريقة [19] على جعل الانحرافات التربيعية (مربع الفرق بين القيم التجريبية والقيم الحسابية) أقل ما يمكن بحيث نحصل على أفضل خط بياني مطابق للخط البياني للقيم التجريبية وبالتالي أفضل قيم حسابية .

الصيغ شبه التجريبية المستخدمة في هذا البحث تحتوي على ثلاث معاملات (a,b,c) وعليه تم استخدام ملائمة مستوية لنقاط ثلاثية الأبعاد من الشكل $(x,y,f(x,y))$:

بفرض أن المكون Z من البيانات يعتمد وظيفياً على المكونين X وY، لتأخذ مجموعة من العينات $\{(x_i, y_i, z_i)\}_{i=1}^m$ ، ويجب تحديد a و b و c بحيث يكون المستوي $(z = ax + by + c)$ يناسب العينات بشكل أفضل، بمعنى أن مجموع الأخطاء التربيعية بين قيم z_i والمستوي $(ax_i + by_i + c)$ ، يتم تصغيره. وبحسب الارتياح فقط في الاتجاه Z. لنعرف التابع الموجب تماماً:

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^m [(ax_i + by_i + c) - z_i]^2 \quad (3)$$

إن الخط البياني لهذا التابع هو قطع مكافئ نحصل على ذروته عندما يكون التدرج (المشتق الأول) معدوماً:

$$\nabla f = (0,0,0) \quad (4)$$

وهذا يقودنا إلى مجموعة من المعادلات الخطية بثلاث مجاهيل a,b,c التي يمكن حلها وفق الطريقة التالية:

$$(0,0,0) = \nabla f = 2 \sum_{i=1}^m [(ax_i + by_i + c) - z_i](x_i, y_i, 1) \quad (5)$$

عندئذ نحصل على:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i^2 & \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m x_i \\ \sum_{i=1}^m x_i y_i & \sum_{i=1}^m y_i^2 & \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m y_i & \sum_{i=1}^m 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m x_i z_i \\ \sum_{i=1}^m y_i z_i \\ \sum_{i=1}^m z_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

يعطي حل هذه المصفوفات حل المربعات الصغرى للمعادلة:

$$z = ax + by + c \quad (7)$$

وبالتالي نحصل على قيم المعاملات a و b و c التي تحقق أفضل مستوي يحتوي النقاط وبالتالي أفضل ملائمة.

2 - صيغة سانثوش (Santhosh K P) شبه التجريبية المستخدمة لحساب عمر النصف:

استخدمنا في هذا العمل صيغة شبه تجريبية طورها سانثوش (Santhosh K P) وآخرون، لعمر النصف اللوغاريتمي لتفكك العنقودي، والتي طبقها على تفكك ألفا بأقل عدد ممكن من المعاملات، تعطى هذه الصيغة وفق العلاقة [20]:

$$\log_{10} \left(T_{\frac{1}{2}} \right) (s) = aZ_1 Z_2 Q^{-1/2} + b\eta_A + c \quad (8)$$

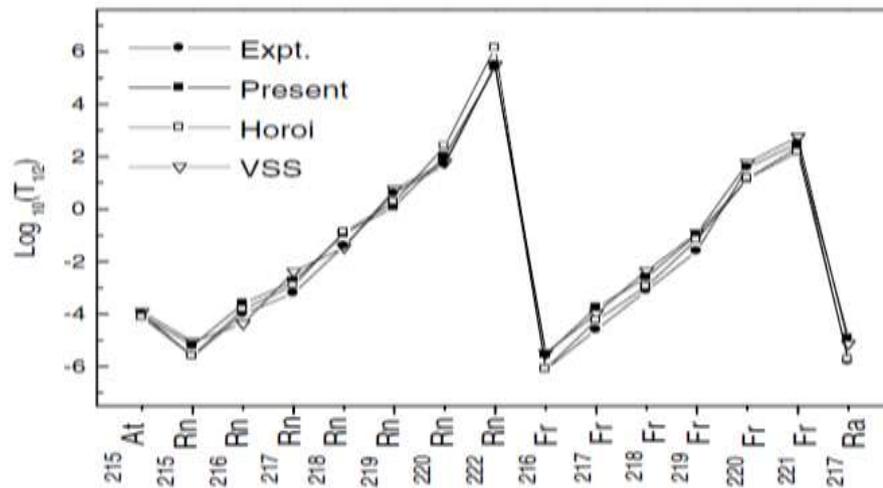
مع المعاملات التي حددها سانثوش : $a = 0.727356, b = 40.3887, c = -85.1625$

حيث: Z_1, Z_2 هما العدد الذري للنواة الابنة وجسيم ألفا على الترتيب، η_A يمثل عدم تناسق الكتلة $\frac{A_1 - A_2}{A}$ ، و Q طاقة التفاعل [MeV].

يعطى الانحراف المعياري الخاص بالنتائج [20] بالعلاقة:

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left[\log \left(\frac{T_{th}}{T_{exp}} \right) \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (9)$$

كما قام سانثوش بمقارنة نتائجه على تفكك ألفا مع نموذج آخر مستخدماً من قبله يدعى نموذج كولون وإمكانيات القرب (the Coulomb and proximity potential model- CPPM)، ومع الصيغة التجريبية لهوري وآخرون (Horoi et al) [21]، ومع النتائج التجريبية المأخوذة من المراجع والمبينة في الشكل (2).



الشكل (2): المخطط الذي يقارن بين عمر النصف اللوغاريتمي لتفكك ألفا من مختلف النظائر الأصلية At و Rn و Fr و Ra. يؤخذ عمر النصف $T_{1/2}$ بالثواني.

في بحثنا تم التحقق من المعاملات التي لاعمها سانشوش باستعمال نفس البيانات النووية المستخدمة من قبله وفق طريقة المربعات الصغرى [19]، وتم أخذ القيم التجريبية المعتمدة من سانشوش لـ 116 نظير مشع من النوع ألفا وحساب اللوغاريتم العشري لعمر النصف $\log(T_{1/2})$ وعدم تناسق الكتلة $\eta_A = \frac{A_1 - A_2}{A}$ و المقدار $Z_1 Z_2 Q_\alpha^{-1/2}$ ، تمهيداً لتطبيق طريقة المربعات الصغرى للملائمة [19]، فحصلنا على معاملات جديدة للعلاقة (8) مختلفة عن المعاملات التي حصل عليها سانشوش، وهي:

$$a = 0.8206 \quad b = -465.6067 \quad c = 396.2633$$

يعود هذا الاختلاف في قيم المعاملات عن قيم سانشوش، لأن سانشوش، قام باستخراج المعاملات من خلال ملائمة البيانات النووية للتفكك العنقودي، وطبقها على تفكك ألفا. أما في هذا البحث فقد قمنا بملاءمة البيانات النووية لـ 116/ نظير مشع لجسيمات ألفا، والتي استخدمها سانشوش نفسه.

تمت مقارنة عمر النصف اللوغاريتمي المحصول عليه من قبلنا مع عمر النصف اللوغاريتمي للبيانات التجريبية التي قدمها سانشوش نفسه. كما أن مقارنة الانحراف المعياري الناشئ عن المعاملات المحسوبة سابقاً مع الانحراف المعياري المحسوب من قبل سانشوش، الجدول (1)، يظهر أن الانحراف المعياري المحسوب وفق هذا البحث أفضل من الانحراف المعياري الذي حصل عليه سانشوش تحديداً من أجل النوى الزوجية - الزوجية (Even-Even) والنوى الفردية - الزوجية (Odd-Even).

الجدول (1): المقارنة بين الانحراف المعياري المحسوب من قبلنا (present) والانحراف المحسوب من قبل سانشوش (san) لأنواع النوى

الأربعة: (Even-Even)، (Even-Odd)، (Odd-Even)، (Odd-Odd):

نوع النوى	عدد النوى	الانحراف المعياري σ	
		Present	San
Even-Even	41	0.712	1.627
Even-Odd	16	0.934	0.963
Odd-Even	32	0.635	1.04
Odd-Odd	27	1.108	0.988

قمنا بتصنيف البيانات النووية المأخوذة من قبل سانتوش إلى الأنواع الأربعة (Even-Even)، (Even-Odd)، (Odd-Even)، (Odd-Odd)، وملاءمة كل صنف بصورة مستقلة، فحصلنا على معاملات جديدة للعلاقة (8) خاصة بكل صنف، الجدول (2)، مع انحراف معياري مقدر وفق العلاقة (9)، فوجدنا أن النوى من النوع (Even-Even)، تمتلك أفضل انحراف معياري /0.226/ بالنسبة للنوى الزوجية - الزوجية والبالغ /41/ نواة.

الجدول (2): قيم المعاملات المحسوبة في هذا البحث، لعلاقة سانتوش، لكل نوع من النوى بشكل مستقل مع انحرافها المعياري:

نوع النوى	عدد النوى	المعاملات			الانحراف المعياري σ
		a	b	c	
Even-Even	41	0.829	-538.605	465.493	0.226
Even-Odd	16	0.826	-425.064	357.236	0.696
Odd-Even	32	0.859	-516.487	442.705	0.592
Odd-Odd	27	0.838	-414.311	346.315	0.799

لكن القيم التجريبية - البيانات النووية - التي استخدمها سانتوش [20] تعتبر قديمة وقد قمنا بتعديلها وفقاً للمراجع الحديثة، لذلك استخرجنا بيانات نووية لـ /239/ نظير مشع لجسيمات ألفا من مراجع تقييم البيانات النووية NUBASE2020 [22، 23]، وملاءمتها وفقاً لطريقة المربعات الصغرى، حيث تم الحصول على معاملات جديدة لعلاقة سانتوش، العلاقة (8)، كما يلي:

$$a = 0.8085 \quad b = -508.8539 \quad c = 438.6339$$

3- الصيغة شبه التجريبية المطورة (developed semi-experimental formula):

يرتبط عمر النصف للنظير المشع بطاقة التفكك ونوع النظير المشع، لذلك يجب أن تعتمد علاقة عمر النصف على طاقة التفكك Q، وعلى كل من الشحنة والكتلة للنواة الأم والنواة الوليدة وجسيم ألفا الناتج، وبناءً على ذلك حصلنا على بيانات نووية حديثة- الجدول (3)- للنظائر المشعة التي تتفكك وفق تفكك ألفا وعددها /239/ من المراجع الحديثة NUBASE2020 [22، 23]، واستخدمنا العلاقة التالية المطورة من قبلنا:

$$\log_{10} \left(T_{\frac{1}{2}} \right) (s) = aQ^{-1/2} + b\mu_Z\mu_A + c \quad (10)$$

حيث: $\mu_Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z}$ الكتلة المخففة والشحنة المخففة. وتختلف هذه المعادلة عن معادلة سانتوش (8) بما يلي:

- تم الاستغناء عن جداء شحنة النواة الوليدة Z_1 وشحنة جسيمة ألفا Z_2 في الحد الأول الحاوي على $Q^{-1/2}$.
 - تم استبدال المقدار η_A (عدم تناسق الكتلة)، بالجداء $\mu_Z\mu_A$ (الكتلة المخففة والشحنة المخففة) في الحد الثاني.
- وعند تطبيق هذه العلاقة وملاءمة البيانات النووية، باستخدام طريقة المربعات الصغرى، حصلنا على المعاملات الثلاث التالية للعلاقة (10):

$$a = 133.8944 \quad b = 105.2775 \quad c = -857.4192$$

طبقتنا العلاقة (10) السابقة على بيانات نووية حديثة [22، 23]، مستخدمة في هذا البحث، ومصدرة لجسيمات ألفا بنسبة 100%، ومنها بعض النظائر المشعة لجسيمات ألفا (المصدرة لجسيمات ألفا بنسبة 100%)، والمستخدمة في الطب النووي (TAT). ويعود الاختلاف في قيمة المعاملات (a, b, c) عن معاملات علاقة سانتوش، إلى الاختلاف بين العلاقتين، فالحد الأول الحاوي على $Q^{-1/2}$ ، في العلاقة المطورة، لا يحتوي على جداء الشحنتين $Z_1 Z_2$ لجسيم ألفا والنواة الوليدة، بما يتوافق مع العلاقة (1) التي تشتق منها معظم الصيغ شبه التجريبية. كما أننا في الحد الثاني استبدلنا

المقدار η_A (عدم تناسق الكتلة)، بالجداء $\mu_Z\mu_A$ (الكتلة المخففة والشحنة المخففة). بالإضافة إلى أن علاقة سانتوش قد طورت من أجل التفكك العنقودي، واستخدمت على تفكك ألفا، بخلاف العلاقة (10) المطورة من قبلنا التي استخدمت على بيانات نووية لتفكك ألفا فقط.

النتائج والمناقشة:

كما اشرنا سابقاً، وعند تطبيق كل من العلاقتين (8) و (10)، بهدف المقارنة، وباستخدام بيانات نووية حديثة، حصلنا على النتائج المبينة في الجدول (3)، والتي تخص النظائر المشعة لجسيمات ألفا (بنسبة اصدار 100%). اعطت العلاقة (10) توافق جيد مع القيم التجريبية الحديثة، وكان الانحراف المعياري المحسوب /0.826/ في حين أن الانحراف المعياري المحسوب وفق علاقة سانتوش /0.875/.

الجدول (3): مقارنة بين عمر النصف اللوغاريتمي التجريبي (exp) وعمر النصف اللوغاريتمي المحسوب في هذا البحث (dev) وفق

العلاقة (10)، وعمر النصف اللوغاريتمي وفق علاقة سانتوش (san)، حيث يؤخذ عمر النصف بالثواني. وقد أشرنا إلى النظائر

المستخدمة في الطب النووي عن طريق تظليل الخلايا.

Isotope	T (exp)	Q (MeV)	$\log T_{1/2}$			Isotope	T (exp)	Q (MeV)	$\log T_{1/2}$		
			(exp)	(dev)	(San)				(exp)	(dev)	(San)
$^{211}_{83}\text{Bi}$	2.14 min	6.75	2.1086	0.4612	-0.5127	$^{226}_{93}\text{Np}$	35 ms	8.33	-1.4559	-1.5054	-1.2229
$^{210}_{84}\text{Po}$	138.376 d	5.407	7.0776	6.6697	6.1886	$^{227}_{93}\text{Np}$	0.51 s	7.816	-0.2924	0.0600	0.3475
$^{211}_{84}\text{Po}$	0.516 s	7.595	-0.2873	-2.2532	-2.8131	$^{237}_{93}\text{Np}$	2144000 y	4.957	13.8303	12.9185	13.0489
$^{212}_{84}\text{Po}$	294.4 ns	8.954	-6.5311	-6.0183	-6.7056	$^{228}_{94}\text{Pu}$	2.1 s	7.94	0.3222	-0.0624	0.4301
$^{213}_{84}\text{Po}$	3.705 μs	8.536	-5.4312	-4.8630	-5.7237	$^{236}_{94}\text{Pu}$	2.858 y	5.867	7.9552	8.1887	8.4478
$^{214}_{84}\text{Po}$	163.47 μs	7.834	-3.7866	-2.7815	-3.8232	$^{238}_{94}\text{Pu}$	87.7 y	5.593	9.4421	9.6439	9.7894
$^{215}_{84}\text{Po}$	1.781 ms	7.526	-2.7493	-1.7410	-2.9520	$^{240}_{94}\text{Pu}$	6561 y	5.256	11.3161	11.5462	11.6321
$^{216}_{84}\text{Po}$	0.144 s	6.906	-0.8416	0.4736	-0.9167	$^{242}_{94}\text{Pu}$	375000 y	4.984	13.0731	13.2323	13.2391
$^{217}_{84}\text{Po}$	1.53 s	6.662	0.1847	1.4684	-0.0878	$^{229}_{95}\text{Am}$	1.8 s	8.14	0.2553	-0.4013	0.2663
$^{218}_{84}\text{Po}$	3.097 min	6.115	2.2691	3.8084	2.0746	$^{241}_{95}\text{Am}$	432.6 y	5.638	10.1352	9.7755	10.0059
$^{212}_{85}\text{At}$	0.314 s	7.817	-0.5031	-2.6431	-3.0139	$^{243}_{95}\text{Am}$	7350 y	5.439	11.3654	10.9104	11.0151
$^{213}_{85}\text{At}$	125 ns	9.254	-6.9031	-6.4452	-6.9884	$^{240}_{96}\text{Cm}$	30.4 d	6.398	6.4194	6.4451	6.8350
$^{214}_{85}\text{At}$	558 ns	8.988	-6.2533	-5.7265	-6.4296	$^{242}_{96}\text{Cm}$	162.8 d	6.216	7.1482	7.3280	7.5683
$^{215}_{85}\text{At}$	37 μs	8.178	-4.4318	-3.4955	-4.3533	$^{243}_{96}\text{Cm}$	29.1 y	6.169	8.963	7.5883	7.7308
$^{216}_{85}\text{At}$	0.3 ms	7.95	-3.5229	-2.7580	-3.7727	$^{245}_{96}\text{Cm}$	8250 y	5.625	11.4156	10.2457	10.4851
$^{217}_{85}\text{At}$	0.0326 s	7.201	-1.4868	-0.2792	-1.4453	$^{246}_{96}\text{Cm}$	4706 y	5.475	11.1718	11.0686	11.2895
$^{219}_{85}\text{At}$	56 s	6.342	1.7482	3.1311	1.6631	$^{248}_{96}\text{Cm}$	348000 y	5.162	13.0407	12.8861	13.0966
$^{212}_{86}\text{Rn}$	23.9 min	6.385	3.1565	2.6818	2.7370	$^{247}_{97}\text{Bk}$	1380 y	5.89	10.639	9.2481	9.5585
$^{213}_{86}\text{Rn}$	0.0195 s	8.254	-1.71	-3.6291	-3.8293	$^{249}_{98}\text{Cf}$	40.3 s	7.711	1.6053	2.0803	2.6449
$^{214}_{86}\text{Rn}$	259 ns	9.208	-6.5867	-6.0372	-6.4347	$^{246}_{98}\text{Cf}$	35.7 h	6.862	5.109	5.3115	5.5887
$^{215}_{86}\text{Rn}$	2.3 Ms	8.939	-5.6383	-5.3066	-5.8547	$^{248}_{98}\text{Cf}$	333.5 d	6.361	7.4596	7.3945	7.7447
$^{216}_{86}\text{Rn}$	29 μs	8.198	-4.5376	-3.2556	-3.9335	$^{249}_{98}\text{Cf}$	351 y	6.293	10.0444	7.7340	8.0104
$^{217}_{86}\text{Rn}$	593 μs	7.887	-3.227	-2.2723	-3.0941	$^{251}_{98}\text{Cf}$	898 y	6.177	10.4524	8.3384	8.4585
$^{218}_{86}\text{Rn}$	33.75 ms	7.263	-1.4717	-0.1969	-1.1452	$^{252}_{98}\text{Cf}$	2.645 y	6.217	7.9215	8.2170	8.1929

²¹⁹ ₈₆ Rn	3.96 s	6.946	0.5977	0.9931	-0.0932	²⁴¹ ₉₉ Es	5.1 s	8.295	0.7076	0.5797	3.3445
²²⁰ ₈₆ Rn	55.6 s	6.405	1.7451	3.1635	1.9548	²⁵² ₉₉ Es	471.7 d	6.739	7.6102	6.2662	6.3559
²²² ₈₆ Rn	3.8215 d	5.59	5.5187	7.0238	5.5675	²⁵⁴ ₉₉ Es	275.7 d	6.617	7.377	6.8426	6.7832
²¹⁴ ₈₇ Fr	5.51 ms	8.598	-2.2589	-4.2778	-4.3226	²⁴³ ₁₀₀ Fm	231 ms	8.69	-0.6364	-0.2091	0.2895
²¹⁵ ₈₇ Fr	90 ns	9.54	-7.0458	-6.5193	-6.7854	²⁴⁵ ₁₀₀ Fm	4.2 s	8.44	0.6232	0.5696	0.9431
²¹⁶ ₈₇ Fr	700 ns	9.174	-6.1549	-5.5921	-5.9941	²⁴⁶ ₁₀₀ Fm	1.54 s	8.379	0.1875	0.7919	1.0738
²¹⁷ ₈₇ Fr	22 μs	8.469	-4.6576	-3.7187	-4.2299	²⁴⁸ ₁₀₀ Fm	34.5 s	7.995	1.5378	1.9979	2.2396
²¹⁸ ₈₇ Fr	1.4 ms	8.014	-2.8539	-2.3611	-2.9937	²⁵² ₁₀₀ Fm	25.39 h	7.154	4.961	4.9153	5.1818
²¹⁹ ₈₇ Fr	22.5 ms	7.449	-1.6478	-0.5312	-1.2713	²⁵⁴ ₁₀₀ Fm	3.24 h	7.307	4.0668	4.4916	4.4310
²²⁰ ₈₇ Fr	27.4 s	6.801	1.4378	1.8211	0.9888	²⁴⁴ ₁₀₁ Md	0.36 s	8.95	-0.4437	-0.6540	-0.0252
²²¹ ₈₇ Fr	4.801 min	6.458	2.4595	3.2346	2.2867	²⁴⁵ ₁₀₁ Md	0.38 s	9.01	-0.4202	-0.7480	-0.2718
²¹¹ ₈₈ Ra	11.6 s	7.042	1.1004	0.5126	1.4777	²⁴⁶ ₁₀₁ Md	0.92 s	8.89	-0.0362	-0.3931	0.0194
²¹⁵ ₈₈ Ra	1.669 ms	8.862	-2.7775	-4.6756	-4.5713	²⁴⁷ ₁₀₁ Md	1.19 s	8.764	0.0755	-0.0171	0.3370
²¹⁶ ₈₈ Ra	172 ns	9.526	-6.7645	-6.2006	-6.3165	²⁵⁸ ₁₀₁ Md	51.59 d	7.271	6.6491	4.9797	4.9272
²¹⁷ ₈₈ Ra	1.95 μs	9.161	-5.71	-5.2746	-5.5145	²⁵⁴ ₁₀₂ No	51.2 s	8.226	1.7093	1.9678	2.1870
²¹⁸ ₈₈ Ra	25.91 μs	8.54	-4.5865	-3.6248	-3.9593	²⁵⁶ ₁₀₂ No	2.91 s	8.582	0.4639	1.0909	0.8800
²¹⁹ ₈₈ Ra	0.009 s	8.138	-2.0458	-2.4378	-2.8834	²⁵⁷ ₁₀₂ No	24.5 s	8.477	1.3892	1.4233	1.1589
²²⁰ ₈₈ Ra	18.1 ms	7.594	-1.7423	-0.7175	-1.2521	²⁵² ₁₀₃ Lr	369 ms	9.164	-0.433	-0.4313	-0.1150
²²¹ ₈₈ Ra	25 s	6.88	1.398	1.8092	1.2181	²⁵³ ₁₀₃ Lr	632 ms	8.918	-0.1993	0.2264	0.5602
²²² ₈₈ Ra	33.6 s	6.678	1.5263	2.6426	1.9311	²⁵⁵ ₁₀₃ Lr	31.1 s	8.556	1.4928	1.2675	1.5790
²²³ ₈₈ Ra	11.4352 d	5.979	5.9948	5.6542	4.9076	²⁵⁶ ₁₀₃ Lr	27.9 s	8.85	1.4456	0.5514	0.5813
²²⁴ ₈₈ Ra	3.6316 d	5.789	5.4966	6.6114	5.7519	²⁵⁷ ₁₀₃ Lr	6 s	9.07	0.7782	0.0524	-0.1504
²²⁶ ₈₈ Ra	1600 y	4.871	10.7032	11.7592	10.8025	²⁵⁸ ₁₀₃ Lr	3.92 s	8.904	0.5933	0.5147	0.2913
²¹⁰ ₈₉ Ac	0.35 s	7.59	-0.4559	-1.2063	0.2293	²⁶⁰ ₁₀₃ Lr	3 min	8.4	2.2553	1.9397	1.7880
²¹¹ ₈₉ Ac	0.213 s	7.57	-0.6716	-1.0678	0.2048	²⁵⁷ ₁₀₄ Rf	5 s	9.083	0.699	0.1753	0.3473
²¹² ₈₉ Ac	0.895 s	7.54	-0.0482	-0.8975	0.2155	²⁵⁹ ₁₀₄ Rf	2.63 s	9.13	0.42	0.1601	0.0839
²¹³ ₈₉ Ac	0.738 s	7.498	-0.1319	-0.6882	0.2686	²⁵⁷ ₁₀₅ Db	2.3 s	9.206	0.3617	0.0294	0.5134
²¹⁵ ₈₉ Ac	0.171 s	7.746	-0.767	-1.3335	-0.7383	²⁵⁹ ₁₀₅ Db	0.51 s	9.62	-0.2924	-0.8313	-0.8031
²¹⁶ ₈₉ Ac	0.44 ms	9.241	-3.3566	-5.3256	-5.0950	²⁶⁰ ₁₀₅ Db	1.52 s	9.5	0.1818	-0.5104	-0.5255
²¹⁷ ₈₉ Ac	69 ns	9.832	-7.1612	-6.5997	-6.5943	²⁵⁹ ₁₀₆ Sg	402 ms	9.765	-0.3958	-1.0040	-0.6858
²¹⁸ ₈₉ Ac	1 μs	9.38	-6	-5.5133	-5.6121	²⁶¹ ₁₀₆ Sg	183 ms	9.714	-0.7376	-0.7939	-0.6652
²¹⁹ ₈₉ Ac	9.4 μs	8.83	-5.0269	-4.1034	-4.2884	²⁶³ ₁₀₆ Sg	0.94 s	9.4	-0.0269	0.0140	0.1100
²²⁰ ₈₉ Ac	26.36 ms	8.348	-1.5791	-2.7525	-3.0253	²⁶⁰ ₁₀₇ Bh	41 ms	10.4	-1.3872	-2.1374	-1.9137
²²¹ ₈₉ Ac	52 ms	7.79	-1.284	-1.0537	-1.3953	²⁶¹ ₁₀₇ Bh	12.8 ms	10.5	-1.8928	-2.2869	-2.2250
²²² ₈₉ Ac	5 s	7.137	0.699	1.1600	0.7771	²⁶² ₁₀₇ Bh	84 ms	^{10.31} ₉	-1.0757	-1.8777	-1.8270
²²³ ₈₉ Ac	2.1 min	6.783	2.1004	2.5178	2.0516	²⁶⁶ ₁₀₇ Bh	10.6 s	9.43	1.0253	0.2325	0.3747
²²⁵ ₈₉ Ac	9.919 d	5.935	5.933	6.1992	5.6195	²⁶⁷ ₁₀₇ Bh	22 s	9.23	1.3424	0.7490	0.9132
²¹⁰ ₉₀ Th	16 ms	8.069	-1.7959	-2.4646	-2.5634	²⁷⁰ ₁₀₇ Bh	3.8 min	9.06	2.3579	1.2981	1.2657
²¹¹ ₉₀ Th	48 ms	7.94	-1.3188	-2.0089	-0.4269	²⁷¹ ₁₀₇ Bh	2.9 s	9.42	0.4624	0.4850	0.1217
²¹² ₉₀ Th	31.7 ms	7.958	-1.4989	-1.9890	-0.5750	²⁷² ₁₀₇ Bh	11.3 s	9.3	1.0531	0.8104	0.4222
²¹³ ₉₀ Th	144 ms	7.837	-0.8416	-1.5511	-0.2772	²⁷⁴ ₁₀₇ Bh	57 s	8.94	1.7559	1.7744	1.4229
²¹⁴ ₉₀ Th	87 ms	7.827	-1.0605	-1.4483	-0.3341	²⁶³ ₁₀₈ Hs	9 ms	10.73	-3.0458	-2.4922	-2.4146
²¹⁵ ₉₀ Th	1.35 s	7.665	0.1303	-0.8736	0.1121	²⁶⁵ ₁₀₈ Hs	1.96 ms	10.47	-2.7077	-1.8929	-1.8856
²¹⁶ ₉₀ Th	26.28 ms	8.072	-1.5804	-2.0377	-1.2881	²⁶⁷ ₁₀₈ Hs	55 ms	^{10.03} ₈	-1.2596	-0.9184	-0.8728

$^{217}_{90}\text{Th}$	248 μs	9.435	-3.6056	-5.5041	-5.1337	$^{268}_{108}\text{Hs}$	1.4 s	9.76	0.1461	-0.2746	-0.1646
$^{218}_{90}\text{Th}$	122 ns	9.849	-6.9136	-6.3605	-6.2039	$^{269}_{108}\text{Hs}$	15 s	9.27	1.1761	0.8894	1.2103
$^{219}_{90}\text{Th}$	1.023 μs	9.51	-5.9901	-5.5377	-5.4880	$^{270}_{108}\text{Hs}$	9 s	9.07	0.9542	1.4172	1.7715
$^{220}_{90}\text{Th}$	10.2 μs	8.973	-4.9914	-4.1890	-4.2118	$^{273}_{108}\text{Hs}$	1.06 s	9.65	0.0253	0.1950	-0.1310
$^{221}_{90}\text{Th}$	1.75 ms	8.625	-2.757	-3.2285	-3.3467	$^{275}_{108}\text{Hs}$	0.28 s	9.45	-0.5528	0.7368	0.3414
$^{222}_{90}\text{Th}$	2.24 ms	8.133	-2.6498	-1.8026	-1.9856	$^{266}_{109}\text{Mt}$	2 ms	$\frac{10.99}{6}$	-2.699	-2.7069	-2.7383
$^{223}_{90}\text{Th}$	0.6 s	7.567	-0.2219	-0.0118	-0.2354	$^{270}_{109}\text{Mt}$	0.8 s	10.18	-0.0969	-0.9357	-0.9141
$^{224}_{90}\text{Th}$	1.04 s	7.299	0.017	0.9397	0.6243	$^{274}_{109}\text{Mt}$	0.85 s	10.6	-0.0706	-1.5966	-2.2194
$^{225}_{90}\text{Th}$	8.75 min	6.921	2.7202	2.3405	1.9627	$^{275}_{109}\text{Mt}$	31 ms	10.48	-1.5086	-1.3180	-1.9700
$^{226}_{90}\text{Th}$	30.7 min	6.453	3.2653	4.2185	3.8098	$^{276}_{109}\text{Mt}$	0.7 s	10.1	-0.1549	-0.5035	-3.5611
$^{227}_{90}\text{Th}$	18.693 d	6.147	6.2082	5.5787	5.1078	$^{278}_{109}\text{Mt}$	6 s	9.58	0.7782	0.7110	0.3244
$^{228}_{90}\text{Th}$	1.9125 y	5.52	7.7807	8.6270	8.2011	$^{267}_{110}\text{Ds}$	10 μs	11.78	-5	-3.8888	-4.0906
$^{229}_{90}\text{Th}$	7916 y	5.168	11.3976	10.5989	10.1518	$^{269}_{110}\text{Ds}$	2.3 ms	11.51	-3.6383	-3.3418	-3.6107
$^{211}_{91}\text{Pa}$	0.006 s	8.48	-2.2219	-3.3450	-1.5059	$^{270}_{110}\text{Ds}$	2.5 ms	$\frac{11.11}{7}$	-0.6883	-2.6047	-2.7647
$^{212}_{91}\text{Pa}$	5.8 ms	8.41	-2.2366	-3.0803	-1.3917	$^{273}_{110}\text{Ds}$	2.4 ms	11.37	-3.6198	-2.9194	-3.5164
$^{213}_{91}\text{Pa}$	7.4 ms	8.384	-2.1308	-2.9358	-1.4049	$^{277}_{110}\text{Ds}$	6 ms	10.9	-2.2219	-1.8973	-2.6269
$^{214}_{91}\text{Pa}$	17 ms	8.27	-1.7696	-2.5459	-1.1528	$^{282}_{110}\text{Ds}$	4.2 min	8.91	2.4014	2.6152	2.7222
$^{215}_{91}\text{Pa}$	14 ms	8.24	-1.8539	-2.3896	-1.1503	$^{272}_{111}\text{Rg}$	4.2 ms	$\frac{11.19}{7}$	-2.3768	-2.5224	-2.5798
$^{216}_{91}\text{Pa}$	105 ms	8.099	-0.9788	-1.9144	-0.8034	$^{274}_{111}\text{Rg}$	20 ms	11.48	-1.699	-2.9299	-3.3423
$^{217}_{91}\text{Pa}$	3.8 ms	8.489	-2.4202	-2.9376	-2.0656	$^{278}_{111}\text{Rg}$	8 ms	10.85	-2.0969	-1.6251	-2.0671
$^{218}_{91}\text{Pa}$	108 μs	9.791	-3.9666	-6.0324	-5.5530	$^{279}_{111}\text{Rg}$	170 ms	10.53	-0.7696	-0.9694	-1.3127
$^{219}_{91}\text{Pa}$	56 ns	10.13	-7.2518	-6.6855	-6.4144	$^{280}_{111}\text{Rg}$	4.3 s	$\frac{10.14}{9}$	0.6335	-0.1597	-0.3546
$^{220}_{91}\text{Pa}$	850 ns	9.704	-6.0706	-5.7036	-5.5170	$^{282}_{111}\text{Rg}$	130 s	9.37	2.1139	1.6363	1.7962
$^{221}_{91}\text{Pa}$	5.9 μs	9.25	-5.2292	-4.5937	-4.4806	$^{272}_{112}\text{Cn}$	790 ms	11.62	-3.1024	-2.9044	-3.3432
$^{222}_{91}\text{Pa}$	3.8 ms	8.79	-2.4202	-3.3893	-3.3412	$^{281}_{112}\text{Cn}$	0.18 s	10.43	-0.7447	-0.5541	-0.6560
$^{223}_{91}\text{Pa}$	5.3 ms	8.34	-2.2757	-2.1204	-2.1310	$^{285}_{112}\text{Cn}$	30 s	9.39	1.4771	1.8468	2.1106
$^{224}_{91}\text{Pa}$	0.844 s	7.694	-0.0737	-0.1472	-0.1626	$^{286}_{112}\text{Cn}$	30 s	9.24	1.4771	2.2406	2.5299
$^{225}_{91}\text{Pa}$	1.71 s	7.4	0.233	0.8677	0.7773	$^{278}_{113}\text{Nh}$	2.3 ms	11.99	-2.6383	-3.3410	-3.7405
$^{226}_{91}\text{Pa}$	1.8 min	6.987	2.0334	2.3663	2.2383	$^{282}_{113}\text{Nh}$	0.14 s	10.78	-0.8539	-1.0598	-1.1164
$^{227}_{91}\text{Pa}$	38.3 min	6.58	3.3614	3.9736	3.8176	$^{283}_{113}\text{Nh}$	0.14 s	10.42	-0.8539	-0.3198	-0.2311
$^{216}_{92}\text{U}$	6.9 ms	8.531	-2.1612	-2.9237	-1.5468	$^{284}_{113}\text{Nh}$	0.97 s	10.28	-0.0132	0.0029	0.0956
$^{217}_{92}\text{U}$	0.85 ms	8.42	-3.0706	-2.5522	-1.3063	$^{285}_{113}\text{Nh}$	4.6 s	10.01	0.6628	0.6032	0.7953
$^{218}_{92}\text{U}$	354 μs	8.775	-3.451	-3.4255	-2.4174	$^{286}_{113}\text{Nh}$	12 s	9.79	1.0792	1.1167	1.3793
$^{219}_{92}\text{U}$	60 μs	9.95	-4.2219	-6.1092	-5.4946	$^{290}_{113}\text{Nh}$	8 s	9.38	0.9031	2.2015	2.4233
$^{221}_{92}\text{U}$	660 ns	9.89	-6.1805	-5.8444	-5.5231	$^{285}_{114}\text{Fl}$	0.21 s	10.56	-0.6778	-0.3847	-0.2042
$^{222}_{92}\text{U}$	4.7 μs	9.48	-5.3279	-4.8663	-4.6159	$^{287}_{114}\text{Fl}$	0.51 s	10.17	-0.2924	0.4788	0.7548
$^{223}_{92}\text{U}$	65 μs	9.158	-4.1871	-4.0418	-3.8743	$^{288}_{114}\text{Fl}$	653 ms	$\frac{10.07}{6}$	-0.1851	0.7143	0.9698
$^{224}_{92}\text{U}$	396 μs	8.628	-3.4023	-2.6372	-2.5008	$^{289}_{114}\text{Fl}$	2.1 s	9.95	0.3222	1.0203	1.2811
$^{225}_{92}\text{U}$	62 ms	8.007	-1.2076	-0.8371	-0.6961	$^{290}_{114}\text{Fl}$	80 s	9.86	1.9031	1.2530	1.4939
$^{226}_{92}\text{U}$	269 ms	7.701	-0.5703	0.1586	0.2357	$^{287}_{115}\text{Mc}$	60 ms	10.76	-1.2219	-0.5618	-0.3312
$^{227}_{92}\text{U}$	1.1 min	7.235	1.8195	1.7525	1.8189	$^{288}_{115}\text{Mc}$	177 ms	10.65	-0.752	-0.3115	-0.0935
$^{228}_{92}\text{U}$	9.1 min	6.8	2.7372	3.3836	3.4440	$^{289}_{115}\text{Mc}$	0.41 s	10.49	-0.3872	0.0400	0.2830
$^{230}_{92}\text{U}$	20.23 d	5.993	6.2425	6.8573	6.9277	$^{290}_{115}\text{Mc}$	0.84 s	10.41	-0.0757	0.2380	0.4508
$^{232}_{92}\text{U}$	68.9 y	5.414	9.3373	9.8311	9.8732	$^{290}_{116}\text{Lv}$	9 ms	11	-2.0458	-0.7657	-0.6014

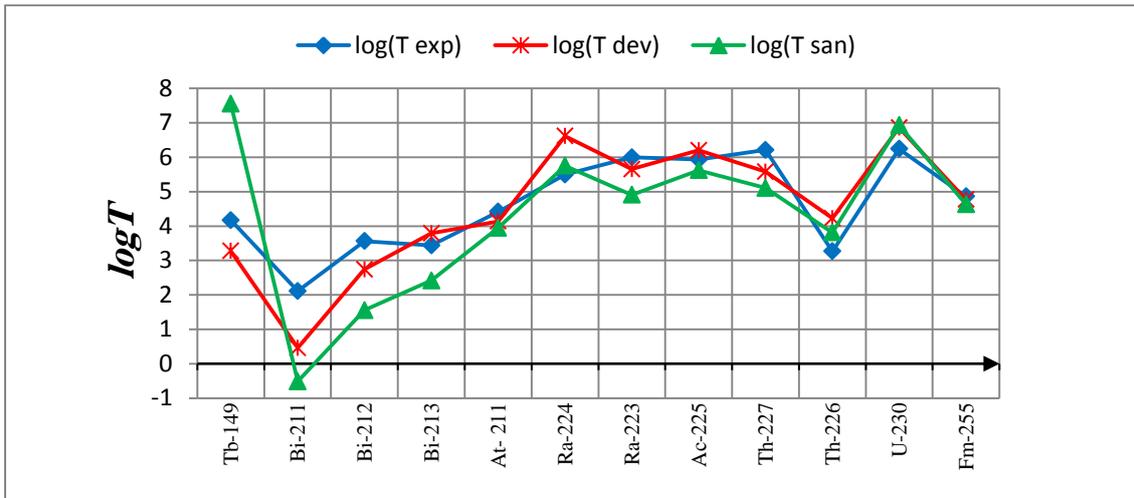
$^{233}_{92}\text{U}$	159190 y	4.908	12.701	12.7857	12.9430	$^{291}_{116}\text{Lv}$	26 ms	10.89	-1.585	-0.5231	-0.3696
$^{236}_{92}\text{U}$	2342000 y	4.573	14.8687	15.1401	15.0846	$^{292}_{116}\text{Lv}$	16 ms	10.79 l	-1.7959	-0.2984	-0.1619
$^{219}_{93}\text{Np}$	0.57 ms	9.21	-3.2441	-4.2436	-3.1440	$^{293}_{116}\text{Lv}$	70 ms	10.68	-1.1549	-0.0485	0.0814
$^{220}_{93}\text{Np}$	29 ns	10.226	-7.5376	-6.4242	-5.7003	$^{293}_{117}\text{Ts}$	25 ms	11.32	-1.6021	-1.1011	-1.0557
$^{222}_{93}\text{Np}$	480 ns	10.2	-6.3188	-6.2359	-5.8084	$^{294}_{117}\text{Ts}$	70 ms	11.18	-1.1549	-0.8143	-0.7580
$^{223}_{93}\text{Np}$	2.5 μs	9.65	-5.6021	-4.9911	-4.5958	$^{294}_{118}\text{Og}$	0.7 ms	11.78	-3.1549	-1.7270	-1.7217
$^{224}_{93}\text{Np}$	48 μs	9.329	-4.3188	-4.1899	-3.8692	$^{295}_{118}\text{Og}$	0.86 s	11.7	-0.1675	-1.5557	-1.5822
$^{225}_{93}\text{Np}$	6.5 ms	8.82	-2.1871	-2.8773	-2.5793						

عند تطبيق العلاقة (10) المطورة من قبلنا على نظائر مشعة لجسيمات ألفا مستخدمة في الطب النووي، الجدول (4)، حصلنا على قيم لعمر النصف اللوغاريتمي لهذه النظائر متوافقة مع البيانات التجريبية. يوضح الشكل (3) المخطط البياني لهذه النظائر المشعة لجسيمات ألفا والمستخدمة في TAT.

الجدول (4) : مقارنة عمر النصف اللوغاريتمي، للنظائر المشعة لجسيمات ألفا المستخدمة في الطب النووي، المحسوب من قبلنا (dev)، مع عمر النصف اللوغاريتمي المحسوب وفق علاقة سانتوش (san)، ومع القيم التجريبية (exp):

$\log T_{1/2}$			Q_{α} (MeV)	عمر النصف من المراجع	Z	النظير المشع
(San)	(dev)	(exp)				
5.619494	6.199244	5.932982	5.935	9.919 d	89	Ac-225
5.751851	6.611418	5.496612	5.789	3.6316 d	88	Ra-224
5.107764	5.578717	6.208193	6.147	18.693 d	90	Th-227
3.948066	4.138011	4.414479	5.982	7.214 h	85	At- 211
7.548183	3.276346	4.170989	4.078	4.118 h	65	Tb-149
4.907574	5.654159	5.994758	5.979	11.4352 d	88	Ra-223
-0.51275	0.461186	2.108565	6.75	2.14 min	83	Bi-211
1.555184	2.741661	3.560265	6.207	60.55 min	83	Bi-212
2.417784	3.788418	3.437116	5.988	45.6 min	83	Bi-213
3.814108	4.222598	3.26529	6.452	30.7 min	90	Th-226
6.927676	6.857254	6.24251	5.993	20.23 d	92	U-230
4.634738	4.767752	4.85885	7.241	20.07 h	100	Fm-255

بلغ الانحراف المعياري المحسوب وفق العلاقة المطورة /0.826/، بينما بلغ الانحراف المعياري المحسوب وفق علاقة سانتوش /1.565/، بالنسبة لعدد النوى البالغ /12/.



الشكل (3): مقارنة عمر النصف اللوغاريتمي المحسوب من قبلنا (dev)، مع عمر النصف اللوغاريتمي المحسوب وفق علاقة سانشوش (san)، مع عمر النصف اللوغاريتمي التجريبي (exp)، للنظائر المشعة لجسيمات ألفا المستخدمة في TAT، عمر النصف مأخوذ بالتواني. يوضح الشكل (3)، ان العلاقة المطورة من قبلنا تعطي حسابات متوافقة مع كافة أنواع النوى المصدرة لجسيمات ألفا (بالنسب المئوية كافة)، سواء كانت خفيفة أو ثقيلة أو فوق ثقيلة، وهذا ما لا تحققه علاقة سانشوش، حيث أنها لا تعطي حسابات دقيقة من أجل النوى الخفيفة مثل (Tb-149).

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تقدم الصيغ شبه التجريبية لحساب عمر النصف اللوغاريتمي قيماً متوافقة إلى حد كبير مع النتائج التجريبية المقدمة من المراجع، مما يجعل من تطوير هذه الصيغ أداة مهمة جداً لحساب عمر النصف للنظائر المشعة لجسيمات ألفا: النظائر المشعة الثقيلة (HN) والفوق الثقيلة (SHN).
- 2- ان الارتباط الوثيق لعمر النصف للنظائر المشعة بالطب النووي، وتحديد تقنية (TAT)، يجعل تحديد عمر نصف تفكك ألفا، سواءً للنظائر المشعة المستخدمة في (TAT) بشكل مباشر أو للنوى الوليدة الناتجة عن التفكك، أمراً في غاية الأهمية، حيث تعطي الحسابات نصف التجريبية قيماً مهمة لعمر نصف نظير مشع ما تفيد في معرفة إذا كان مناسباً للاستخدام في أحد تطبيقات الطب النووي أم لا.
- 3- حققت الصيغة شبه التجريبية المطورة لحساب عمر النصف اللوغاريتمي، نتائجاً متوافقة بشكل جيد مع المعطيات التجريبية، وكانت نتائج هذه الصيغة أفضل من نتائج الصيغة نصف التجريبية لسانشوش.
- 4- يوصي هذا البحث بدراسة الصيغ شبه التجريبية المقدمة في المراجع والعمل على تطوير مثل هذه الصيغ للحسابات المتعلقة بعمر نصف النظير المشع أو طاقة تفكك ألفا للنظائر المشعة المستخدمة في الطب النووي، أو التطبيقات الأخرى.

References:

- [1] Li, Huizi Keiko, & Hasegawa, Sumitaka (2020). A perspective in TRT and TAT Basic and translational sciences. *Radioisotopes (Online)*, 69(6), 207-212.
- [2] Parker, C., Lewington, V., Shore, N., Kratochwil, C., Levy, M., Lindén, O., Noordzij, W., Park, J., & Saad, F. (2018). Targeted Alpha Therapy, an Emerging Class of Cancer Agents. *JAMA Oncology*, 4(12), 1765.
- [3] Poty S, Francesconi LC, McDevitt MR, Morris MJ, Lewis JS. α -Emitters for Radiotherapy: From Basic Radiochemistry to Clinical Studies-Part 1. *J Nucl Med*. 2018 Jun;59(6):878-884.
- [4] Nelson, B.J., Andersson, J.D. and Wuest, F., 2020. Targeted alpha therapy: progress in radionuclide production, radiochemistry, and applications. *Pharmaceutics*, 13(1), p.49.
- [5] Elgqvist, J., Frost, S., Pouget, J.-P., & Albertsson, P. (2014). The Potential and Hurdles of Targeted Alpha Therapy – Clinical Trials and Beyond. *Frontiers in Oncology*, 3.
- [6] Kang CS, Lee KC, Lee YJ. Targeted alpha therapy (TAT) for cancer using metallic radioisotopes. *Journal of Radiopharmaceuticals and Molecular Probes [Internet]*. 2019 Dec 30;5(2):135–44. Available from: <https://doi.org/10.22643/JRMP.2019.5.2.135>
- [7] Ferrier MG, Radchenko V, Wilbur DS. Radiochemical aspects of alpha emitting radionuclides for medical application. *Radiochimica Acta*. 2019 Sep 1;107(9-11):1065-85.
- [8] Rutherford E, Geiger H. An electrical method of counting the number of α -particles from radio-active substances. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*. 1908 Aug 27;81(546):141-61.
- [9] Geiger H, Nuttall JM. LVII. The ranges of the α particles from various radioactive substances and a relation between range and period of transformation. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1911 Oct 1;22(130):613-21.
- [10] Gamow G. Zur quantentheorie des atomkernes. *Zeitschrift für Physik*. 1928 Mar;51(3):204-12.
- [11] Gurney RW, Condon EU. Wave mechanics and radioactive disintegration. *Nature*. 1928 Sep;122(3073):439-.
- [12] Pfützner M, Karny M, Grigorenko LV, Riisager K. Radioactive decays at limits of nuclear stability. *Reviews of modern physics*. 2012 Apr 30;84(2):567.
- [13] Giuliani SA, Matheson Z, Nazarewicz W, Olsen E, Reinhard PG, Sadhukhan J, Schuettrumpf B, Schunck N, Schwerdtfeger P. Colloquium: Superheavy elements: Oganesson and beyond. *Reviews of Modern Physics*. 2019 Jan 22;91(1):011001.
- [14] Viola Jr VE, Seaborg GT. Nuclear systematics of the heavy elements—II Lifetimes for alpha, beta and spontaneous fission decay. *Journal of Inorganic and Nuclear Chemistry*. 1966 Mar 1;28(3):741-61.
- [15] Sobiczewski A, Patyk Z, Ćwiok S. Deformed superheavy nuclei. *Physics letters B*. 1989 Jun 22;224(1-2):1-4.
- [16] Brown BA. Simple relation for alpha decay half-lives. *Physical Review C*. 1992 Aug 1;46(2):811.
- [17] Royer G. Alpha emission and spontaneous fission through quasi-molecular shapes. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2000 Aug 1;26(8):1149.
- [18] Manjunatha HC, Sridhar KN. New semi-empirical formula for α -decay half-lives of the heavy and superheavy nuclei. *The European Physical Journal A*. 2017 Jul;53(7):1-9.
- [19] Eberly D. Least squares fitting of data. Chapel Hill, NC: Magic Software. 2000 Aug:1-0.

- [20] Santhosh KP, Biju RK, Joseph A. A semi-empirical model for alpha and cluster radioactivity. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2008 Jul 2;35(8):085102.
- [21] Horoi M. Scaling behaviour in cluster decay. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*. 2004 May 18;30(7):945.
- [22] Kondev FG, Wang M, Huang WJ, Naimi S, Audi G. The NUBASE2020 evaluation of nuclear physics properties. *Chinese Physics C*. 2021 Mar 1;45(3):030001.
- [23] Wang M, Huang WJ, Kondev FG, Audi G, Naimi S. The AME 2020 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. *Chinese Physics C*. 2021 Mar 1;45(3):030003.