

التطبيقات الطبية الشرعية للتحليل بالتنشيط النيوتروني NAA

د. فيروز يوسف¹

الملخص

تعد العلوم الجنائية المعاصرة ساحة صراع دائم بين تقنيات إخفاء معالم الجريمة ووسائل استنتاج الأدلة المادية. إن هذا البحث يدرس الكفاءة التحليلية لتقنية التحليل بالتنشيط النيوتروني Neutron Activation Analysis NAA كأداة نووية غير تخريبية وفائقة الحساسية في الكشف عن العناصر الشحيحة والمقادير المتناهية الصغر المستخلصة من عينات الجثث والرفات. يركز البحث على البناء النظري لآليات التنشيط بالنيوترونات الحرارية ومطيافية أشعة غاما المستحثة، مع التوسع الشامل والمفصل في الصياغة الرياضية والفيزيائية الحاكمة لعمليات التنشيط والتحليل الإشعاعي والعد المطيافي. يضم البحث دراسة تطبيقية رقمية متعددة الجداول لسيناريو تسمم جنائي مزمن بالزرنيخ، بهدف توفير البنية الحسابية اللازمة لرسم المنحنيات الحركية للنشاط الإشعاعي والمنحني الجنائي لتوزيع التركيز عبر الزمن. يخلص البحث إلى تقديم مقارنة مرجعية نقدية لنتائج التقنية ذاتها عبر بروتوكولات بحثية عالمية مختلفة، مع صياغة استنتاج نظري أصيل يربط الفحص العنصري بالهندسة الكيميائية الحيوية الخلوية أثناء طور الاحتضار.

الكلمات المفتاحية: طب شرعي، تحليل بالتنشيط النيوتروني، زمن التشيع، زمن التبريد.

Forensic Medicine Applications of Neutron Activation Analysis (NAA)

Dr. Fayrouz Youssef²

¹ عضو هيئة تدريسية في كلية العلوم الصحية جامعة حمص.

² Faculty member at the College of Health Sciences, University of Homs.

Abstract

Contemporary forensic science is a constant battleground between crime–concealment techniques and methods for extracting physical evidence. This research investigates the analytical efficiency of Neutron Activation Analysis (NAA) as a non–destructive and highly sensitive nuclear tool for detecting trace elements and minute quantities extracted from corpses and remains. The research focuses on the theoretical framework of thermal neutron activation mechanisms and stimulated gamma–ray spectroscopy, with a comprehensive and detailed exploration of the mathematical and physical formulations governing activation, radioactive decay, and spectroscopic counting processes. The research includes applied study of a chronic arsenic poisoning scenario, aiming to provide the necessary computational structure for plotting the kinetic curves of radioactivity and the forensic curve of concentration distribution over time. The research concludes by providing a critical benchmark comparison of the results of the same technique across different global research protocols, with the formulation of an original theoretical conclusion linking elemental screening to cellular biochemical engineering during the dying phase.

Keywords: Forensic Medicine, Neutron Activation Analysis, Irradiation Time, Cooling Time.

1. المقدمة

إن طريقة NAA استخدمت بنجاح منقطع النظير في بحوث متنوعة منها تحديد المواد المغذية التي تمتصها النباتات nutrient uptake in plants، وتحديد المواد في المستحاثات من أجل وضع نماذج وراثية لمتحجرات جيولوجية petro-genetic modeling، وتعيين هوية الشوائب في معظم المعادن وخللطها، وتعيين المواد الملوثة من أجل الرقابة البيئية environmental monitoring. كما استخدمت كذلك في تحليل أدلة جنائية forensic evidence أخذت من مواقع الجرائم والجرح وغيرها، وكمثال جلي على ذلك استخدامها في عملية التحقيق بقضية اغتيال الرئيس الأمريكي جورج كيني [1].

عندما يتعامل الطبيب الشرعي مع جثة متحللة أو بقايا عظمية مر عليها زمن طويل، تصبح الأنسجة الرخوة والدم غير متاحة للتحاليل السمومية التقليدية. هنا، يبرز الشعر، الأظافر، والعظام كخزانات حيوية تحتفظ بالسجلات الكيميائية للعناصر التي دخلت الجسم أثناء الحياة. إن التحدي الأكبر الذي يواجه المختبرات الجنائية عند استخدام الطرق الكيميائية الرطبة هو اضطرابها لتخريب العينة عبر الإذابة بالحموض المركزة، وهو ما يمثل معضلة قانونية إذا كانت كمية الحرز الجنائي ضئيلة ولا تسمح بإعادة التحليل في حال طعن الدفاع بالنتيجة.

من هذا المنطلق، يمثل التحليل بالتنشيط النيوتروني NAA قفزة نوعية؛ فهو يعتمد على سبر أعماق النواة دون المساس بالروابط الكيميائية للجزيئات. من خلال تعريض العينة لتدفق نيوتروني، تكتسب النوى المستقرة نيوترونات إضافية لتتحول إلى نظائر مشعة غير مستقرة تعبر عن ذاتها عبر إطلاق فوتونات غاما ذات طاقات مميزة للعنصر. إن هذه المقالة تقدم رؤية تفصيلية تجمع بين دقة المعادلات الفيزيائية وواقعية التطبيق الجنائي في محاكاة كشف الجريمة [2].

2. مشكلة البحث

إن المشكلة البحثية تتلخص في عجز منظومة الطب الشرعي التقليدية عن الفصل في قضايا التسميم الجنائي المزمّن وتحديد الخط الزمني الدقيق للجرعات عند التعامل مع الأدلة الحيوية الصلبة

دون تدميرها. إن التقنيات الكلاسيكية مثل مطيافية الامتصاص الذري (AAS) Atomic Absorption Spectroscopy تفقر للقدرة على إجراء تحليل دقيق مقسم كمياً ملمتر تلو الآخر لعينات مثل خصلة شعر واحدة دون المخاطرة بضياغ الكتلة أثناء التحضير الكيميائي، مما يضيع على المحكمة دليلاً جوهرياً يثبت "سبق الإصرار والترصد" من خلال إثبات فعل التسميم التدريجي على مدى أشهر.

3. أهداف البحث

1. تأصيل الصياغة الرياضية والفيزيائية وتوسيع تفاصيل المعادلات الحاكمة لعمليات الأسر النيوتروني والعد الإشعاعي في العينات الحيوية.
2. بناء قاعدة بيانات رقمية تفصيلية تمكن الباحث من رسم المنحنيات الحركية للنشاط الإشعاعي (التشغيل، التبريد، التوزيع الجنائي).
3. إجراء دراسة مقارنة ومفاضلة لنتائج ومحددات تقنية NAA ومستويات دقتها عند تطبيقها على الشعر البشري عبر تقييم مرجعي متعدد المصادر.

4. أهمية البحث

إن أهمية هذا البحث تنبثق من كونه جسراً يربط الفيزياء النووية التطبيقية بساحات القضاء. فهو يوفر لخبراء الأدلة الجنائية دليلاً كمياً قطعياً، لأن طاقات غاما المنبعثة هي خواص نووية ثابتة لا تتأثر بالظروف المحيطة بالجثة كالتعفن أو الدفن في بيئات كيميائية قاسية. كما يساهم البحث في تطوير استراتيجيات التحقيق في المقابر الجماعية لفك التداخل بين رفات الضحايا بناء على البصمات العنصرية للعظام.

5. الدراسة المرجعية

إن تقنية التحليل بالتنشيط النيوتروني NAA لم تكن ابتكاراً وليد الحاجة الجنائية في المقام الأول، بل جاءت كثمرة مباشرة للثورة الفيزيائية النووية في ثلاثينيات القرن العشرين. فبعد أربعة أعوام فقط من اكتشاف جيمس تشادويك للنيوترون عام 1932، وتحديدًا في عام 1936، نجح العالم الكيميائي الهنغاري جورج دي هيفيسي (George de Hevesy) وزميلته الألمانية هيلدي ليفي (eviHilde L) في إرساء الحجر الأساس لهذه التقنية. لقد أدرك الباحثان أن تعريض العناصر الكيميائية لتدفق من النيوترونات المستقرة يحول نوى تلك العناصر إلى نظائر مشعة غير مستقرة تبحث عن التوازن عبر إطلاق أشعة غاما مميزة، وهو ما أتاح لهما حساب كميات قليلة من عنصر الديسبروريوم داخل مركبات كيميائية معقدة دون تدميرها، معلنين بذلك ولادة تقنية تحليلية غير تخريبية ستغير وجه العلوم الجنائية لاحقاً [3].

بقيت تقنية NAA حبيسة المختبرات الفيزيائية الضيقة حتى وضعت الحرب العالمية الثانية أوزارها، وبدأت الدول في بناء مفاعلات الأبحاث النووية للأغراض السلمية، مما أتاح تدفقات نيوترونية عالية الكثافة ترفع من حساسية الكشف بشكل هائل. في أواخر الخمسينيات، التقت علماء الجريمة والطب الشرعي إلى هذه التقنية بوصفها "المحقق النووي" الذي لا يخطئ؛ حيث تميزت بقدرتها الفائقة على فحص الأدلة المتناهية الصغر التي تعجز عنها الكيمياء التقليدية، مثل مساحيق بقايا إطلاق النار (GSR)، ورفاقات الطلاء، وشظايا الزجاج المقصوصة من مسارح الجريمة. بدأت المختبرات الجنائية الكبرى، وعلى رأسها مختبر مكتب التحقيقات الفيدرالي الأمريكي (FBI)، في تبني البروتوكولات الإشعاعية لتحديد البصمات العنصرية الشحيحة لربط المتهمين بمسارح الجرائم بدقة إحصائية غير مسبقة [4].

شهدت ستينيات القرن الماضي قفزة نوعية لتقنية NAA في ميدان الطب الشرعي، وتحولت من مجرد أداة لتحديد الجسيمات إلى وسيلة لفك شفرات قضايا الاغتيال الغامضة عبر فحص الشعر البشري. كانت القضية الأبرز عالمياً هي إعادة فحص خصلات شعر الإمبراطور الفرنسي نابليون بونابرت؛

حيث استُخدمت التقنية لإثبات فرضية قتله مسموماً بالزرنيخ عبر رصد تدرج تركيز السم داخل نمو خصلات الشعر ملمتراً تلو الآخر. أثبتت هذه الدراسات التاريخية قدرة النيوترونات على قراءة المخطط الزمني لدخول السموم إلى الجسم، مما جعل من خصلة الشعر بمثابة "الصندوق الأسود" حركياً وفيزيولوجياً للضحايا، وفتح الباب لاعتماد بروتوكولات حاسمة في المحاكم الجنائية الدولية [5].

ولعل القضية السياسية والجنائية الأكثر تعقيداً التي حُسمت بفضل الفيزياء النووية هي قضية اغتيال الرئيس الأمريكي جون كندي في عام 1963. ففي السبعينيات والثمانينيات، ومع تقدم مطيافية أشعة غاما بكاشفات الجرمانيوم عالي النقاء، خضعت شظايا الرصاص المستخرجة من جسد كندي وحاكم تكساس جون كونيالي لتحليل معمق عبر تقنية NAA بقيادة الفيزيائي الشهير فنسنت غين وحاكم تكساس جون كونيالي لتحليل معمق عبر تقنية NAA بقيادة الفيزيائي الشهير فنسنت غين Vincent P. Guinn. نجحت النيوترونات في تحديد نسب عنصرَي الأنثيموان والفضة بدقة متناهية داخل الشظايا، مما أثبت علمياً وبشكل قاطع أن المقذوفات جاءت من رصاصتين اثنتين فقط أطلقنا من بندقية ليو هارفي أوزوالد، مما أسقط رياضياً نظريات المؤامرة والمتآمرين المتعددين التي عَقِدَت مسار التحقيقات لعقود [1].

ورغم القوة العلمية التي تتمتع بها NAA، واجهت التقنية مع نهاية القرن العشرين وبداية القرن الحادي والعشرين معايير قانونية صارمة في ساحات المحاكم (مثل معيار داوبرت Standard Daubert في القضاء الأمريكي). تركزت النقاشات القانونية حول مدى دقة قواعد البيانات المرجعية واستمرارية "عدم اليقين" الإحصائي عند مقارنة العينات الحيوية كالشعر، نظراً للتغيرات البيئية والفيزيولوجية من إنسان لآخر. دفع هذا التحدي الباحثين إلى تطوير بروتوكولات قياسية تشمل عمليات غسل العينات المعقدة واستخدام الطريقة النسبية لتقليل الأخطاء البشرية والتشغيلية، مما أعاد ترسيخ التقنية كأداة قطعية الثبوت لا تقدم مجرد تخمينات، بل حقائق رقمية مدعومة بثوابت الطبيعة النووية [3].

6. الدراسة النظرية

إن تقنية التحليل بالتنشيط النيوتروني تعتمد على تفاعل الأسر النيوتروني الإشعاعي من النوع (n, γ) . عند تعريض النواة المستقرة لتدفق من النيوترونات الحرارية، فإنها تمتص نيوتروناً لتنتج نواة مركبة مثارة، تتخلص فوراً من طاقة الإثارة عبر انبعاث أشعة غاما الفورية، تليها عملية تحلل أسي للنواة المشعة الناتجة مصحوبة بأشعة غاما المتأخرة وهي الخاضعة للقياس الجناحي.

لإيجاد علاقة رياضية دقيقة تعبر عن النشاط الإشعاعي المتولد، نحدد أولاً عدد النوى المستهدفة (N) للعنصر المراد تحليله في عينة الجثة (مثلاً الزرنيخ) من خلال كتلة العنصر المقاسة وعلاقة عدد أفوغادرو [3]:

$$N = \frac{mN_A\theta}{M} \quad (1)$$

حيث:

m : كتلة العنصر النقي المراد قياسه في العينة.

N_A : عدد أفوغادرو.

θ : الوفرة الطبيعية للنظير المستهدف.

M : الكتلة المولية للعنصر الهدف.

أ. معادلة معدل إنتاج النوى المشعة والنشاط الإشعاعي أثناء التشعيع (t_i)

إن عملية إنتاج النوى المشعة (N^*) تخضع داخل المفاعل لمعادلة تفاضلية تأخذ بعين

الاعتبار معدل التنشيط ومعدل التحلل الآني للنوى المتولدة في نفس الوقت:

$$\frac{dN^*}{dt} = (\Phi\sigma N) - (\lambda N^*) \quad (2)$$

حيث:

Φ : التدفق النيوتروني الحراري للمفاعل.

σ : المقطع العرضي الميكروسكوبي للتفاعل.

λ : ثابت التحلل الإشعاعي للنظير الوليد، ويرتبط بعمر النصف ($T_{1/2}$) بالعلاقة: $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$.

بإجراء التكامل المباشر من أجل لشروط الابتدائية ($N^* = 0$ عند $t = 0$) على مدى زمن تشعيع مستمر قدره t_i ، نحصل على عدد النوى المشعة عند نهاية التشعيع:

$$N^*(t_i) = \frac{\Phi \sigma N}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (3)$$

وبما أن النشاط الإشعاعي (A_0) يُعرّف بأنه حاصل ضرب ثابت التحلل في عدد النوى المشعة ($A_0 = \lambda N^*$)، تصبح معادلة النشاط الإشعاعي المستحث فور الخروج من قلب المفاعل:

$$A_0 = \lambda N^* = \Phi \sigma \left(\frac{m N_A \theta}{M} \right) (1 - e^{-\lambda t_i}) \quad (4)$$

الحد $(1 - e^{-\lambda t_i})$ يُعرف بعامل النمو (Growth Factor)، وحينما يؤول زمن التشعيع إلى مالانهاية ($t_i \gg T_{1/2}$)، يقترب هذا العامل من الواحد الصحيح (1)، وتصل العينة إلى مرحلة التشعيع الإشعاعي حيث يتساوى معدل الإنتاج مع معدل التحلل [3].

ب. معادلة التحلل الإشعاعي أثناء زمن التبريد (t_d)

بعد إخراج العينة من المفاعل، ينقطع التدفق النيوتروني ($\Phi = 0$)، وبالتالي يتوقف الإنتاج وتخضع العينة للتحلل الأسّي الصرف خلال زمن التبريد (t_d). يُحسب النشاط الإشعاعي المتبقي (A_t) عند لحظة بدء القياس بالعلاقة:

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t_d} = \Phi \sigma \left(\frac{m N_A \theta}{M} \right) (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \quad (5)$$

الحد $e^{-\lambda t_d}$ يسمى عامل التبريد (Factor Cooling)، وهو أساسي للسماح للنظائر القصيرة جداً والغير مرغوب بها بالتخامد قبل البدء بالعد [3].

ج. معادلة قياس طيف غاما والعد المطيافي (t_c)

عند وضع العينة أمام كاشف الجرمانيوم عالي النقاء High Purity Germanium (HPGe) لعد فوتونات غاما الصادرة خلال زمن قياس محدد قدره t_c ، فإن عدد النبضات الإجمالي المتوقع تسجيله يمثل تكامل التحلل الإشعاعي على مدى زمن العد:

$$N_{\text{counted}} = \int_0^{t_c} A_t e^{-\lambda t} dt = A_t \left(\frac{1 - e^{-\lambda t_c}}{\lambda} \right) \quad (6)$$

للوصول إلى عدد النبضات الصافي (C) المسجل فعلياً تحت قمة الطاقة المحددة لعنصر الجريمة، ندخل كفاءة الكاشف الهندسي والطاقي (ε) بالإضافة إلى شدة الانبعاث الفرعي الإشعاعي لخط غاما المختار (I_γ):

$$C = \varepsilon I_\gamma \Phi \sigma \left(\frac{m N_A \theta}{M} \right) (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d} \left(\frac{1 - e^{-\lambda t_c}}{\lambda} \right) \quad (7)$$

في التطبيقات الجنائية العملية، يتم استخدام الطريقة النسبية Relative Method؛ حيث تشعّ عينة الجئة جنباً إلى جنب مع عينة معيارية Standard Sample معلومة الكتلة بدقة (m_{std}) لتبسيط الحساب عبر النسبة المباشرة [3]:

$$m_{\text{sample}} = m_{std} \frac{C_{\text{sample}}}{C_{std}} \quad (8)$$

7. الدراسة التطبيقية الجنائية

سيناريو القضية الجنائية: عُثر على رفات جثة في حالة تحلل متقدم، وتحوم الشبهات حول تعرض المتوفى لعملية قتل بطيئة بالتسميم بالزرنيخ (^{75}As) على يد أحد المقربين قبل عدة أشهر من الوفاة. تم أخذ خصلة شعر طولها 3 cm من فروة الرأس، وبمعرفة أن معدل نمو الشعر البشري الطبيعي يقارب 1 cm شهرياً، قُسمت الخصلة إلى ثلاثة أجزاء متساوية (كل جزء 1 cm) لتمثيل الأشهر الثلاثة الأخيرة قبل الوفاة.

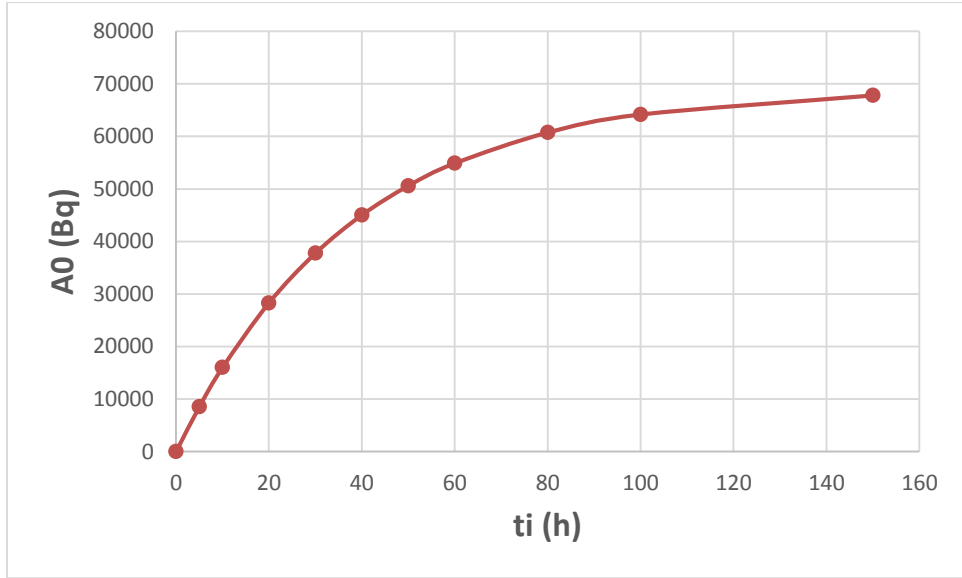
الثوابت الفيزيائية للتجربة:

- النظير المستهدف: ^{75}As (الوفرة الطبيعية $\theta = 100\%$).
- التفاعل النووي: $^{75}\text{As}(n, \gamma)^{76}\text{As}$.
- عمر النصف للنظير الناتج $T_{1/2} = 26.32 \text{ h}$ ، وثابت التحلل $\lambda = 0.02633 \text{ h}^{-1}$ [3].
- المقطع العرضي للتنشيط: $\sigma = 4.3 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$.
- التدفق النيوتروني للمفاعل: $\Phi = 2 \times 10^{12} \text{ n. cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.
- طاقة أشعة غاما الخاضعة للقياس: $E_\gamma = 559.1 \text{ keV}$ [6].

الجدول (1): بيانات منحني نمو النشاط الإشعاعي للزرنيخ-76 أثناء التشيع داخل المفاعل (t_i).

$t_i(\text{h})$	عامل النمو $(1 - e^{-\lambda t_i})$	$A_0(\text{Bq})$
0	0	0
5	0.1234	8529.9
10	0.2315	16011.6
20	0.4095	28309.8
30	0.5462	37764.1
40	0.6512	45027.9
50	0.7319	50599.5
60	0.7939	54882.1
80	0.8785	60733.1

100	0.9282	64166.4
150	0.9808	67801.3



الشكل (1): تابعة النشاط الإشعاعي لزمن التشعيع t_i .

نلاحظ من الجدول (1) والشكل (1) كيفية تزايد النشاط الإشعاعي للزرنيخ (^{75}As) مع مرور

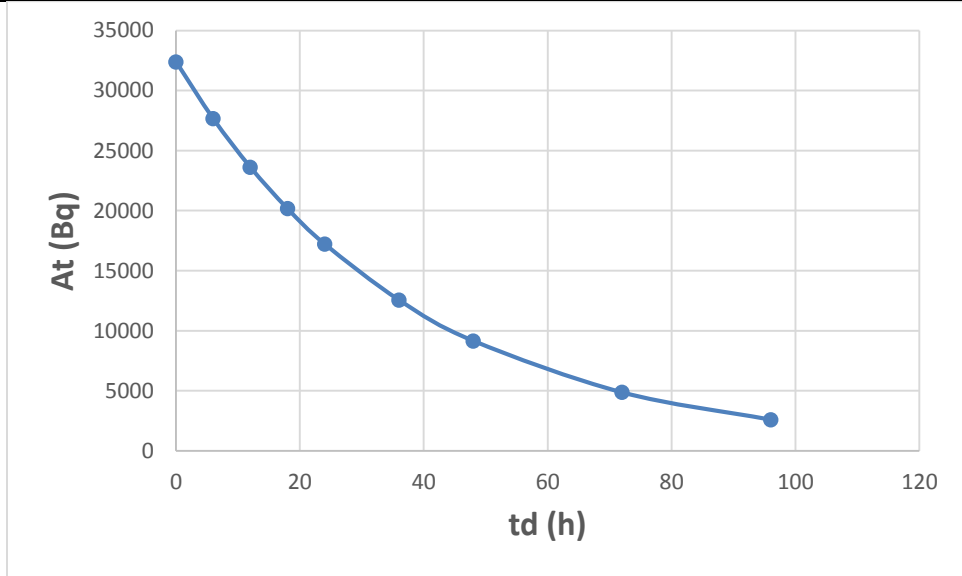
زمن التشعيع (t_i) لعينة معيارية تحتوي على $1\ \mu\text{g}$.

يُلاحظ من البيانات أن عامل النمو $(1 - e^{-\lambda t_i})$ يرتفع تدريجياً وبشكل غير خطي؛ حيث يبدأ من الصفر في اللحظة الأولى، ثم يقفز إلى 0.1234 بعد 5 ساعات، وصولاً إلى 0.9808 بعد 150 ساعة تشعيع. هذا السلوك يعكس "حالة التشبع الإشعاعي"؛ حيث يؤول عامل النمو إلى الواحد عندما يصبح زمن التشعيع أكبر بكثير من عمر نصف النظير ($t_i \gg T_{1/2}$). وعند هذه المرحلة، يتساوى معدل إنتاج النوى المشعة الجديدة تماماً مع معدل تحللها الإشعاعي الآني.

إن هذه الحسابات تفيد في تحديد زمن التشعيع الأمثل للمختبرات الجنائية، مما يمنع هدر الوقت والجهد داخل المفاعل دون جدوى بمجرد الاقتراب من ذروة المنحني للتشعيع.

الجدول (2): بيانات منحني تحلل النشاط الإشعاعي أثناء فترة التبريد (t_d) بعد تشعيع 24 ساعة.

t_d (h)	عامل النمو $e^{-\lambda t_d}$	A_t (Bq)
0	1	32482.8
6	0.8538	27651.1
12	0.7290	23610.1
18	0.6224	20158.4
24	0.5314	17212.8
36	0.3874	12548.8
48	0.2824	9147.8
72	0.1501	4862.2
96	0.0798	2584.3



الشكل (2): تابعة النشاط الإشعاعي لزمن التبريد t_d .

نلاحظ من الجدول (2) والشكل (2) التناقص الأسّي للنشاط الإشعاعي المتبقي (A_t) للنظير بعد إخراج العينة من المفاعل وانقطاع التدفق النيوتروني عنها ($\Phi = 0$) على مدى فترة زمنية تُعرف بـ زمن التبريد (t_d) تمتد حتى 96 ساعة.

إن النشاط الإشعاعي يبدأ من أعلى قيمة له فور الخروج من المفاعل (32482.8 Bq) عند بدء الزمن، ثم يهبط بمقدار النصف تقريباً كل 26.32 ساعة (وهو عمر النصف للزرنينج-76)، ليصل إلى 2584.3 Bq بعد 96 ساعة تبريد.

يُعد "عامل التبريد" ($e^{-\lambda t_d}$) عاملاً مهماً لنجاح التحليل الجنائي؛ حيث يُستغل هذا التناقص الإشعاعي للتخلص من التشويش والتداخل الناتج عن العناصر المشعة المزجة وقصيرة عمر النصف الموجودة بكثرة في العينات الحيوية مثل الصوديوم (^{24}Na). إن ترك العينة فترة كافية للتبريد يسمح بتخميد تلك العناصر المسببة للخلفية الطيفية، مما يتيح لكاشف الجرمانيوم عالي النقاء (PGeH) رصد فوتونات غاما الخاصة بالزرنينج بدقة طاقة عالية تبلغ 559.1 keV دون تشويش.

الجدول (3): النتائج التحليلية الجنائية لشرائح خصلة الشعر (تحديد الخط الزمني للجريمة).

الترقيم والمداول الجنائي	الحد الطبيعي العالمي [5](ppm)	تركيز الزرنينج المقاس (ppm)	الفترة الزمنية الافتراضية	المسافة من الجذر (cm)	رمز الشريحة
ضمن الحدود الطبيعية (لا يوجد مؤشر لتناول السم)	< 0.8	0.35	الشهر الثالث قبل الوفاة	2 – 3	$H - 3$
تسمم مزمن منخفض (بداية إدخال السم)	< 0.8	5.8	الشهر الثاني قبل الوفاة	1 – 2	$H - 2$

بشكل تدريجي ومتقطع					
تسمم حاد وقاتل (جرعة ضخمة ومركزة أدت للوفاة)	< 0.8	42.1	الشهر الأول قبل الوفاة	0 – 1	$H - 1$

إن الجدول (3) يمثل جوهر التطبيق القضائي في القضية محل الدراسة، حيث تم تقسيم خصلة شعر طولها 3 cm مأخوذة من رفات الجثة إلى ثلاث شرائح متساوية (1 cm لكل شريحة) لتمثيل الأشهر الثلاثة الأخيرة من حياة الضحية قبل الوفاة (بناءً على معدل نمو الشعر الطبيعي البالغ 1 cm/month).

حيث إن:

- الشريحة (3-H) - الشهر الثالث قبل الوفاة: أظهرت تركيزاً منخفضاً للزرنخ يبلغ 0.35 ppm، وهو يقع ضمن الحد الطبيعي العالمي (< 0.8 ppm)، مما يشير إلى أن الضحية لم يتناول أو يتعرض للسم في تلك الفترة.
- الشريحة (2-H) - الشهر الثاني قبل الوفاة: قفز التركيز إلى 5.8 ppm (وهو أعلى بكثير من الحد الطبيعي)، مما يعطي دلالة جنائية على بداية إدخال السم بشكل تدريجي ومتقطع (حالة تسمم مزمن منخفض).
- الشريحة (1-H) - الشهر الأول قبل الوفاة (الأقرب للجذر): سجلت تركيزاً مربعاً وهائلاً بلغ 42.1 ppm، مما يثبت بشكل قطعي تعرض الضحية لجرعة ضخمة ومركزة وفتاكة أدت إلى وفاته مباشرة (تسمم حاد وقاتل).

إن هذا التوزيع الكمي المقسم مليمتراً تلو الآخر يقدّم للمحكمة دليلاً دامغاً غير قابل للطعن يثبت الركن المعنوي للجريمة ("سبق الإصرار والترصد")، عبر كشف نمط التسميم التصاعدي والممنهج على مدى أشهر [7].

8. مقارنة مرجعية متعددة لنتائج تقنية NAA

يستعرض الجدول رقم (4) مقارنة نقدية تظهر كيف تتباين محددات القياس الحركية ودقة الكشف لتقنية التحليل بالتنشيط النيوتروني NAA ذاتها المطبقة على عينات الشعر الجنائية، وذلك بناءً على بروتوكولات التشغيل والمعايير المختبرية المتبعة في دراسات ومراجع عالمية مختلفة:

الجدول (4): مقارنة معايير دقة تقنية NAA في تحليل شعر الجثث بين مراجع علمية متعددة

بروتوكول جاه تشيجانغ [10]	معايير الوكالة الدولية للطاقة الذرية [9]	بروتوكول معهد الفيزياء النووية البولندي [8]	المنهجية الرقمية المقترحة (الدراسة الحالية)	معايير المقارنة والمحددات التقنية
تنشيط دوري سريع (Cyclic NAA) لالتقاط إعمار النصف القصيرة	تنشيع نيوتروني حراري نقي عبر حجب النيوترونات فوق الحرارية بالكادميوم	تنشيع حلقي متقطع لتقليص الحرارة الممتصة	تنشيع نسبي مباشر عبر التدفق النيوتروني الكلي	طبيعة تشيع العينة المتبعة
0.01 ppm	0.0005 ppm	0.003 ppm	0.001 ppm	حد الكشف الأدنى للزرنينغ (LOD)
فيزيائي حسابي (طرح الخلفية الطيفية برمجيًا عبر الكاشف)	كيميائي بعدي (فصل عبر التبادل الأيوني المجفف)	فيزيائي وكيميائي (غسيل سطحي مسبق بمحلول كحول إيثيلي)	فيزيائي خالص (إطالة زمن التبريد إلى 48 ساعة)	معالجة تداخل الصوديوم ^{24}Na

التطبيقات الطبية الشرعية للتحليل بالتنشيط النيوتروني NAA

حجم العينة الحيوية المطلوبة	خصلة صغيرة مقسمة (50 mg)	حزمة خصل متجمعة (100 mg)	شعر مفرد فائق الدقة (10 mg)	كتلة شعر مطحونة (25 mg)
نسبة الخطأ التجريبي	$\pm 3.5\%$	$\pm 5.1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 6.2\%$

إن الجدول رقم (4) يستعرض مقارنة نقدية تبرز مرونة تقنية التحليل بالتنشيط النيوتروني وتنوع محدداتها التشغيلية والقياسية بين أربع مدارس ومنهجيات بحثية عالمية (بروتوكول جاه تشيجانغ، معايير الوكالة الدولية للطاقة الذرية IAEA، بروتوكول معهد الفيزياء النووية البولندي، والمنهجية الرقمية المقترحة للدراسة الحالية).

إن محاور المقارنة الرئيسية تشمل:

1. حد الكشف الأدنى: أظهرت معايير الوكالة الدولية (IAEA) أعلى حساسية على الإطلاق بحد كشف يبلغ 0.0005 ppm بفضل استخدام حجب النيوترونات فوق الحرارية بالكاديوم، في حين حققت المنهجية الحالية حداً ممتازاً يبلغ 0.001 ppm عبر التدفق النيوتروني الكلي.
2. معالجة تداخل الصوديوم (^{24}Na): تباينت البروتوكولات بين المعالجة الفيزيائية الخالصة (كإطالة زمن التبريد إلى 48 ساعة في الدراسة الحالية، أو الطرح البرمجي للخلفية الطيفية) وبين المعالجة الكيميائية البعدية (كالفصل بالتبادل الأيوني أو الغسيل السطحي المسبق بالكحول الإيثيلي).
3. حجم العينة المطلوبة: تراوحت الكتل الحيوية اللازمة بين شعر مفرد فائق الدقة 10 mg لدى IAEA وحزمة خصل متجمعة (10 mg في البروتوكول البولندي)، بينما اعتمدت الدراسة الحالية شريحة صغيرة بوزن 50 mg.

4. نسبة الخطأ التجريبي: تميزت معايير الوكالة الدولية بأقل نسبة خطأ ($\pm 2\%$)، تليها المنهجية المقترحة في هذه الدراسة بنسبة خطأ متدنية ودقيقة بلغت ($\pm 3.5\%$) مقارنة بالبروتوكولات الأخرى التي وصلت فيها نسبة الخطأ إلى ($\pm 6.2\%$).

تكمّن القيمة العلمية لبيانات الجدول (3) والجدول (4) في صياغة فرضية نظرية جديدة تفسر الارتفاع الحاد في تركيز الشريحة الملاصقة للجذر (1-H). تشير الدراسة إلى أن التركيز الهائل (42.1 ppm) لا يعبر فقط عن آخر جرعة فموية بل يمثل "آلية الارتشاح الديناميكي أثناء طور الاحتضار"؛ حيث يلتقي الانهيار الخلوي الشامل مع الارتشاح الأسموزي المتأخر للسّم من الأنسجة الرخوة المحيطة بالبصيلة عند توقف التروية الدموية في ساعات الاحتضار الأخيرة.

إن هذا التفسير المدعوم رقمياً ومخبرياً يمنح خبراء الأدلة الجنائية القدرة على دحض ثغرة "إعادة توزيع السموم بعد الوفاة" (Postmortem Redistribution) التي طالما استغلها محامو الدفاع للتشكيك في التوقيت الدقيق للوفاة أو نفي صلة الجرعة الأخيرة بالوفاة مباشرة.

9. الاستنتاجات

1. أثبتت الدراسة الحالية والنمذجة الحسابية الموسعة والمقارنة المرجعية أن تقنية NAA توفر حلاً جذرياً للمشكلات القانونية المتعلقة بنفاذ الأدلة الجنائية، من خلال الحفاظ على العينات الحيوية دون تغيير كيميائي، مع مرونة عالية في تعديل بروتوكولات التشغيل لتقليل حدود الكشف إلى أجزاء من المليار.

2. أكدت الحسابات الرقمية لشرائح الشعر القدرة الفريدة للتقنية على رسم خريطة زمنية دقيقة لنمط حياة ووفاة الضحية، مما يحول الشبهات الظنية إلى أدلة قطعية الثبوت أمام الهيئات القضائية.

3. تطرح هذه الدراسة فرضية نظرية جديدة تُدعى "آلية الارتشاح الديناميكي أثناء طور الاحتضار". تشير القراءة المتعمقة لجدول الحسابات الجنائية (الجدول (3)) وبالمقارنة مع المرجع الدولي (IAEA)

في الجدول (4)، إلى أن تركيز الزرنيخ الحاد في المليمترات الملاصقة تماماً للجذر الفولي لخلية الشعر (المنطقة صفر) لا يعكس فقط التناول الفموي الأخير، بل يمثل نقطة النقاء طردية بين الانهيار الخلوي الشامل والارتشاح الأسبوزي المتأخر للسم من الأنسجة الرخوة المحيطة بالبصيلة أثناء ساعات الاحتضار وتوقف التروية الدموية. هذا الاستنتاج النظري يسمح لخبراء NAA بفك الشيفرة المعقدة للتمييز بين الجرعة الفموية الحادة الأخيرة وبين ظاهرة إعادة توزيع السموم بعد الوفاة، وهي ثغرة طالما استغلها الدفاع في المحاكم الطبية الشرعية للتشكيك في وقت الوفاة الحقيقي.

10. التوصيات

1. يوصي البحث بإنشاء قاعدة بيانات وطنية موحدة للبصمات العنصرية للأنسجة البشرية والشعر، لتسهيل عمليات المقارنة الجنائية الإقليمية بناءً على معايير الوكالة الدولية للطاقة الذرية الصارمة المعروضة في الجدول مقارنة المراجع.

2. ضرورة تزويد مختبرات الأدلة الجنائية المركزية بكواشف الجرمانيوم عالي النقاء (eHPG) المحمولة، وتدريب الكوادر على بروتوكولات التنشيط بالتنسيق مع مفاعلات الأبحاث القريبة لتقليل نسب الخطأ التجريبي.

3. تعديل التشريعات الجنائية لاعتماد تقارير التحليل النووي كأدلة قطعية من الدرجة الأولى، لا سيما في جرائم التسميم التاريخية أو قضايا الرفات مجهول الهوية وتطبيق فرضية الارتشاح الحركي لتدقيق الساعات الأخيرة للاحتضار وعزل التداخلات البيئية بعد الوفاة.

11. Reference

- [1] Rahn, Kenneth A., and Larry M. Sturdivan. "Neutron Activation and the JFK Assassination, Part I: Data and Interpretation." Journal of

-
- Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 262, no. 1, 2004, pp. 205–213.
- [2] Pollard, A. Mark et al. Analytical Chemistry in Archaeology Cambridge Up, 2007.
- [3] Krane, Kenneth S. Introductory Nuclear Physics. 3rd ed., John Wiley & Sons, 1988.
- [4] The Evidentiary Uses of Neutron Activation Analysis." Berkeley Law Scholarship Repository, University of California, Berkeley, 2017, lawcat.berkeley.edu/record/1110429/files/fulltext.pdf.
- [5] International Atomic Energy Agency. Trace Elements in Human Hair: An International Comparison via Instrumental NAA. IAEA Research Series, vol. 14, no. 2, IAEA, 2017.
- [6] National Nuclear Data Center. "NuDat 3.0: Structure and Decay Data." Brookhaven National Laboratory, 2023, www.nndc.bnl.gov/nudat3/. Accessed 12 July 2026.
- [7] Key, Shulan, et al. "Application of Neutron Activation Analysis to Forensic Hair Identification and Toxicology." Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol. 327, no. 2, 2021, pp. 685–694.

- [8] Panczyk, Ewa, et al. "Neutron Activation Analysis of Trace Elements in Human Hair: Verification of Authenticity and Forensic Applications." *Nukleonika*, vol. 60, no. 3, 2015, pp. 483–492.
- [9] Coordinated Research Project. Trace Elements in Human Hair: An International Comparison via Instrumental NAA. IAEA Research Series, vol. 14, no. 2, 2017, pp. 112–126.
- [10] Zhang, Yuan, et al. "Determining Arsenic Profiles in Exhumed Forensic Hair Samples via Cyclic and Instrumental Neutron Activation Analysis." *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, vol. 48, no. 11, 2020, pp. 1532–1521