

تحديد تركيز مستوى النشاط الإشعاعي الناتج عن السلاسل الإشعاعية الطبيعية في منطقة سيدي الصيد/ترهونة - ليبيا

سعد صالح إبراهيم¹، إبراهيم علي فرج أحمد²، عادل أبو القاسم أحمد المبروك³
^{1,2}جامعة الزيتونة كلية التربية ترهونة، ³جامعة غريان كلية العلوم الشقيقة.

saadalzgdane@gmail.com, Lemhemed@azu.edu.ly, adel.almabrouk@gu.edu.ly.

Publishing date: 9/1/2025

المخلص:

في هذا البحث تم تحليل عدد ستة عشرة عينة تربة إشعاعياً بواسطة كاشف الجرمانيوم عالي النقاوة HPGe بكفاءة 40% بوضعية عمودية وقدرة فصل مقدارها 1.89keV الموجود بمبنى الوقاية بمركز البحوث النووية- تاجوراء. هذه العينات تم جمعها من منطقة سيدي الصيد بترهونة التي تبعد مسافة 65 كم عن طرابلس جنوباً، وهي منطقة شبه جبلية. يتراوح النشاط الإشعاعي النوعي للعينات بالنسبة لـ ⁴⁰K بين 164.22 Bq/kg إلى 1009.36 Bq/kg ، وبالنسبة لـ ²³⁸U بين 65.39 Bq/kg إلى 125.97 Bq/kg ، وبالنسبة لـ ²³²Th بين 11.49 Bq/kg إلى 62.57 Bq/kg على التوالي، وكان النشاط المكافئ للراديو بين 124.49 Bq/kg إلى 237.67 Bq/kg ، في حين تراوحت الجرعة الفعالة السنوية المكافئة بين 0.072 mSv/y إلى 0.138 mSv/y كما أن مؤشر الخطر الداخلي تراوح بين 0.55 و 0.873، ومؤشر الخطر الخارجي تراوح بين 0.336 و 0.641. أي في جميعها لم تتجاوز الوحدة. بذلك نستنتج أن كل مؤشرات الخطر الأخرى تشير إلى عدم وجود أي مستويات غير طبيعية وأن كل المؤشرات ضمن الحدود المسموح بها محلياً ودولياً.

الكلمات المفتاحية: النشاط الإشعاعي، تقييم المخاطر الإشعاعية، الإشعاع الطبيعي، الجرعة السنوية الفعالة المكافئة (AEDE)، غاز الرادون، منطقة سيدي الصيد/ترهونة ليبيا.

1. المقدمة

توجد النظائر المشعة طبيعياً في الصخور والتربة والماء منذ أن تكونت الأرض، ولأن بعض هذه النظائر تمتلك أعمار نصف طويلة جداً للانحلال (مئات الملايين من السنين أو أكثر) فإن كميات كبيره من هذه النويدات ما تزال موجودة على الأرض إلى يومنا هذا [1].

يتعرض الإنسان إلى الإشعاع بشكلٍ دائمٍ من مصدرين رئيسيين هما المصادر الطبيعية والمصادر الصناعية ويشكل تعرض الإنسان إلى المصادر الطبيعية النسبة الأساسية من التعرض مثل الأشعة الكونية والأشعة الصادرة من العناصر المشعة بصورة طبيعية. يعتمد تركيز العناصر المشعة الطبيعية في التربة على الظروف الجيولوجية والجغرافية. ينشأ النشاط الإشعاعي الطبيعي بصورة رئيسية من سلاسل اليورانيوم ²³⁸U و ²³⁵U والثوريوم ²³²Th والبوتاسيوم الطبيعي ⁴⁰K إضافة إلى الأشعة الكونية والأشعة الموجودة في البيئة وجسم الإنسان وغيرها وهو ما يسمى بـ NORM [2,3,4,5].

تُعرف المواد المشعة بأنها مواد تنقسم بمرور الزمن، وينتج عن هذا الانقسام تحرير للطاقة وتحول المادة إلى عنصر آخر. والمواد هي مجموعة من الذرات، وتتألف الذرة من عدد ثابت من البروتونات والإلكترونات والنيوترونات، وعدد البروتونات هو الذي يُحدد هوية العنصر. يختلف العنصر نفسه أحياناً في عدد النيوترونات مع ثبات عدد البروتونات، مما يجعل للعنصر نظائر ذات عدد نيوترونات مختلف، والكثير من هذه النظائر غير مستقر؛ أي أنه يلجأ إلى إطلاق بعض النيوترونات أو البروتونات أو الطاقة أثناء التحلل الإشعاعي (Radioactive Decay). هذا التحلل يُطلق ثلاثة أنواع شائعة للأشعة، وهي كالآتي:

(1) **اضمحلال ألفا:** وهو الاضمحلال الذي ينتج عنه أكبر إطلاق للأجسام، والمكوّنة من نيوترونين وبروتونين.
(2) **اضمحلال بيتا:** وهو الاضمحلال الذي يحدث عند انطلاق إلكترون واحد ليُصبح النيوترون في الذرة بروتون، وجسيمات بيتا أخف من جسيمات ألفا؛ حيث يمكنها اختراق المواد بعمق أكبر.

(3) **اضمحلال جاما:** وهو الاضمحلال الذي لا يُطلق جسيمات، وإنما يُطلق على شكل أشعة جاما التي تستطيع اختراق المادة بشكلٍ أكبر [6].
تتواجد بعض النظائر المشعة بشكلٍ طبيعي في الأرض، كنتيجة للاصطناع النووي (nucleosynthesis) للنجوم، أو انفجارات السوبرنوفاء، ومن الأمثلة على النظائر المشعة الطبيعية: اليورانيوم 238، واليورانيوم 235، والثوريوم 232، والبوتاسيوم 40. عادة ما يكون للنظائر الطبيعية المشعة فترة نصف عمر طويلة؛ أي أنها تظل لفترات طويلة مُستقرة لجميع الأغراض العملية، وعند تحللها فإنها تُكوّن ما يُسمى بالنيوترونات المشعة، ومن أمثلة ذلك تحلل نظائر الثوريوم 232-، واليورانيوم 238، واليورانيوم 235-، لينتج عنها نويدات مشعة ثانوية من الراديويم والبولونيوم [7,8]. الانشطار النووي ينتج عن النشاط النووي المُتمثل بمحطات الطاقة النووية والأسلحة النووية الحرارية، ومن الأمثلة على النظائر المشعة الناتجة عن الانشطار النووي: اليود 131، وسترونتيوم 90، وفوسفور 32. وعادة ما يُنتج عن الانشطار النووي عدد كبير من النظائر المشعة، وهذا ما يجعل مُعالجة آثار الأنشطة النووية صعباً ومعقداً. تؤثر النظائر المشعة على البيئة والصحة البشرية، ويمكن أن يؤدي التعرض للإشعاع إلى زيادة خطر الإصابة بالسرطان وأمراض أخرى [7]. تشمل هذه التأثيرات تغيير محتوى التغذية في التربة، ومستوى سمية التربة، ومعدل تدهور التربة، وأصبح تحليل العناصر الأساسية لجزيئات التربة ضرورياً بسبب تأثير هذه الجزيئات على البيئة والصحة [9]. يعتبر غاز الرادون (²²²Rn) من أهم نظائر ونواتج لهذه السلاسل الإشعاعية الطبيعية، وهو غاز مشع عديم اللون والطعم والرائحة، ويفرد بكونه المعدن الوحيد الذي يوجد في حالة غازية، وهو أثقل من الهواء بسبعة أضعاف ونصف، ويوجد في كل مكان وفي جميع الأوقات. وقد تم اكتشافه في أوائل هذا القرن، وكان يعتقد أنه آمن، بل ونافع، وذلك حتى وقت قريب لا يتجاوز أربعة عقود من الزمان، ولكن تبين أنه ومشتقاته يشكل حوالي نصف الجرعة الإشعاعية المؤثرة التي يتعرض لها عموم الناس من المصادر الطبيعية مجتمعة، مصدره الرئيسي الأول هو تربة الأرض وصخورها القريبة من السطح، والمصدر الثاني هو الرادون المذاب في المياه الجوفية. أما المصدر الثالث لغاز الرادون فيتمثل في مواد البناء المستخدمة في المساكن التي تطلق غاز الرادون نتيجة التحلل الإشعاعي للراديويم الذي يحتويه، حيث يشكل الرادون المتولد نتيجة التحلل الإشعاعي لليورانيوم 238 ما نسبته 80% على الأقل من غاز الرادون [10].

تتكون السلاسل الإشعاعية الطبيعية من سلسلة من الذرات المشعة التي تتحلل تدريجياً. ينتج عن كل تحلل إشعاعي جسيمات مشحونة يمكن أن تسبب تلفاً للخلايا. لذلك، من المهم تحديد مستويات النشاط الإشعاعي في البيئة المحيطة بنا [11].

يهدف هذا البحث إلى تقييم مستويات تركيز النظائر الإشعاعية الطبيعية في التربة، وتقدير مؤشر خطر جرعة غاز الرادون في بعض المناطق المختارة في منطقة سيدي الصيد بترهونة بليبيا، وهي محاولة لزيادة فهمنا لتركيز النظائر الإشعاعية في التربة في هذه المنطقة، والمساهمة في وضع خريطة إشعاعية للدولة الليبية إسوة ببعض الدول الأخرى.

2. الطرق ومواد البحث 2-1) منطقة الدراسة:

تم اختيار منطقة سيدي الصيد بترهونة للدراسة، وتقع جنوب العاصمة طرابلس، حيث تبعد مسافة 65 كيلو متر من العاصمة طرابلس، وهي منطقة ريفية زراعية تبلغ مساحتها حوالي 150 كيلومتر مربع تقريباً، ويبلغ عدد سكانها حوالي عشرة ألف نسمة، وهي جيولوجياً امتداد جبلي، وتتميز بأنها منطقة زراعية رعوية، والشكل (1) بين مخطط لموقع منطقة سيدي الصيد بترهونة على خريطة ليبيا.



الشكل (1) خريطة جوجل لمنطقة سيدي الصيد بترهونة

2-2) تجميع العينات

تم جمع عينات التربة من مواقع استراتيجية في المنطقة، بما في ذلك المناطق الشبه حضرية والمناطق الريفية، وفي كل موقع للعينات، تم كشط سطح التربة العلوي إلى عمق من 10-20 سم تقريباً من سطح التربة باستخدام الأدوات اليدوية (hand auger) تم ذلك لإزالة أي آثار لتلوث سطح التربة العلوي في الموقع بسبب الأنشطة البشرية، ومن ثم توضع في أكياس بلاستيكية بوزن واحد كجم (1كجم)، ويتم تسجيل اسم العينات، ونوعها كما هو مبين في الشكل (2) ثم تجفف العينة هوائياً، وبعد ذلك يتم غربلتها بغريال يدوي (منخل) ذو فتحات يصل قطرها لـ 2mm لإزالة الشوائب منها، وللحصول على حبيبات أقطارها متجانسة ثم يتم إرسال العينات للمعمل.



شكل (2) طريقة أخذ عينات التربة

2-3) تحضير العينات وطريقة العمل:

لإعداد عينات التربة بهدف قياس تركيز نشاط النويدات المشعة ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K في المعمل، يتم طحنها بالمطحن اليدوي أو المطحن الكهربائي، ويتم غربلتها بغريال (منخل) يدوي ذو فتحات يبلغ قطرها 1mm، لإزالة الشوائب وللحصول على حبيبات متجانسة لعينات التربة، كما هو مبين في الشكل (3):



شكل (3) الغريال اليدوي

ثم يتم وزن الحافظات الخاصة في وعاء مارلين Marinellin beaker باستخدام الميزان الإلكتروني بوزن واحد كيلو جرام لكل عينة على حدة، كما في المعادلة التالية:

وزن العينة = وزن الحافظة وهي مملوءة- وزن الحافظة وهي فارغة.

$$W_s = W_{s+m} - W_m \rightarrow (1)$$

حيث أن: W_s : وزن العينة، W_m : وزن الحافظة التي سيتم وضع العينات فيها، W_{s+m} : وزن الحافظة والعينة بداخلها. ثم يتم إغلاق الحافظة جيداً بشرط بلاستيكي وحفظها في حاويات بلاستيكية محكمة الإغلاق لضمان احتجاز الرادون ^{222}Rn ، ويتم كتابة اسم العينة ورقمها ونوعها ووزنها على الحافظة، ويتم تخزين هذه العينات لمدة أكثر من 20 يوم لغرض الوصول للتوازن الإشعاعي اللازم. بعد ذلك توضع عينات تربة حقل الدراسة في فرن كهربائي Oven عند درجة حرارة 105 $^{\circ}\text{C}$ لمدة 24 ساعة إلى حين الوصول إلى حد الوزن الثابت، وبالتالي ضمان

الإزالة التامة لأي رطوبة متبقية. بعد ذلك تم تنفيذ قياسات التجربة باستخدام جهاز مطيافية جاما Gamma ray spectroscopy ذو كاشف جرمانيوم عالي النقاوة High Purity Germanium Detector (HPGe) بكفاءة 40% المرتبط إلى محلل متعدد القنوات (MCA) لقياس النشاط الإشعاعي، وتحليل النتائج باستخدام برنامج تحليلي للنماذج الخاضعة للدراسة، ولتجنب تأثير إشعاع الخلفية وضع كاشف (HPGe) في درع الرصاص الواقي.

4-2 تقييم المخاطر الإشعاعية

(1) النشاط الإشعاعي (The Activity Concentration-A): تم حساب النشاط الإشعاعي النوعي A (لكل كيلوجرام) باستخدام المعادلة التالية (2) [12].

$$A = \frac{\text{net CPS samples}}{\text{Eff } I_{\gamma} W} \text{ Bq/kg} \rightarrow (2)$$

حيث أن net CPS samples معدل العد الصافي لكل ثانية، Eff كفاءة الكاشف عند الطاقة المحددة، بوحدة قياس (efficiency) I_{γ} نسبة شدة إصدار جاما لهذه الطاقة، بوحدة قياس (intensity) و W وزن العينة، بوحدة قياس (kilogram).

(2) النشاط المكافئ للراديوم (Radium Equivalent Activity- R_{aq}): النشاط المكافئ للراديوم (R_{aq}) بوحدة (becquerel per kilogram) Bq/kg مؤشر خطر إشعاعي واسع الانتشار ويستخدم لتقييم المخاطر المرتبطة بالمواد المحتوية على نويدات ^{226}Ra و ^{232}Th و ^{40}K وقد تم تحديده على أساس افتراض أن: 370Bq/kg من ^{226}Ra و 260Bq/kg من ^{232}Th و 4810Bq/kg من ^{40}K تنتج نفس معدل الجرعة [13]. تم حسابه على النحو الموضح في المعادلة (3) [14].

$$R_{aq} = A_U + (A_{Th} \times 1.43) + (A_K \times 0.077) \text{ Bq/kg} \rightarrow (3)$$

A_U ، A_{Th} و A_K قيم النشاط الإشعاعي لـ: ^{238}U ، ^{232}Th و ^{40}K على التوالي بوحدة Bq/kg. (3) الجرعة الممتصة (Absorbed Dose Rate in Air- D): تحديد معدلات الجرعة الممتصة (D) للعينات بوحدة nGy/h من تركيز النشاط الإشعاعي النوعي، بالإضافة إلى المخاطر الإشعاعية المصاحبة من الجرعة الممتصة عند واحد متر فوق سطح الأرض موضح في المعادلة (4) [14].

$$D = (0.462 \times A_U) + (0.604 \times A_{Th}) + (0.0417 \times A_K) \text{ nGy/h} \rightarrow (4)$$

(4) مكافئ الجرعة الفعالة السنوية (Annual Effective Dose Equivalent- AEDE): يمكن قياس تركيز النويدات المشعة في البيئة بسبب إشعاع جاما الأرضي الناتج من ^{40}K ، ^{232}Th ، ^{238}U من خلال المتوسط المكافئ السنوي الفعلي للجرعة AEDE [15] للمعادلة (5):

$$AEDE = D \times 1.23 \times 10^{-3} \text{ mSv/y} \rightarrow (5)$$

حيث D معدل الجرعة الممتصة (nGy/h).

(5) مؤشر الخطر الداخلي (Internal Hazard Index- H_{int}): مقياس يشير إلى التعرض الداخلي بسبب الرادون ^{222}Rn ويجب أن يكون المؤشر أقل من الواحد ليكون ضمن عتبة السلامة، وحسب كما بالمعادلة (6) [16]

$$H_{int} = \left(\frac{A_U}{185} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) \leq 1 \rightarrow (6)$$

(6) مؤشر الخطر الخارجي (External Hazard Index- H_{ext}): يستعمل مؤشر H_{ext} لتقييم التعرض للإشعاع الخارجي من المواد المحتوية على الراديوم. تمثل قيمة $H_{ext} = 1$ القيمة القصوى المسموح بها المكافئة لنشاط مكافئ الراديوم مقداره 370 Bq/kg للمعادلة (7) [16]

$$H_{ext} = \left(\frac{A_U}{370} + \frac{A_{Th}}{259} + \frac{A_K}{4810} \right) \leq 1 \rightarrow (7)$$

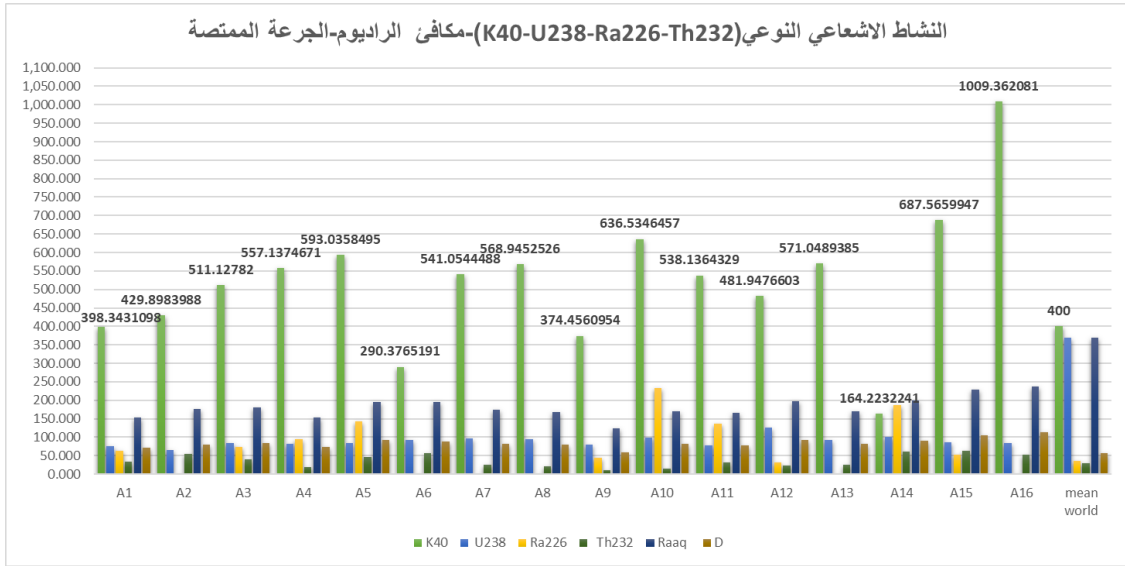
3. النتائج والمناقشة

1-3 النشاط الإشعاعي النوعي

يوضح الشكل (4) النشاط الإشعاعي النوعي والنشاط المكافئ للراديوم والجرعة الممتصة للعينات نلاحظ أن أعلى نشاط إشعاعي هو للبتواسيوم ^{40}K وهو متوقع لأن كمية البوتاسيوم في أي عينة سوف تكون هي الأكبر بحكم أن البوتاسيوم هو العنصر الأكثر تواجداً بين كل هذه العناصر حيث أن البوتاسيوم يكون حوالي 2.1% من القشرة الأرضية [17]. حيث سجلت العينة رقم (16) القراءة الأعلى 1009.362081Bq/kg فيما سجلت العينة رقم (14) القراءة الأدنى 164.2232241Bq/kg

بالنسبة للنشاط الإشعاعي للسلاسل الأخرى ^{238}U و ^{232}Th في مستواه الطبيعي المتوقع، حيث سجلت العينة رقم (12) القراءة الأعلى 125.9781849Bq/kg فيما سجلت العينة رقم (9) القراءة الأدنى 65.39264625Bq/kg بالنسبة للـ ^{238}U ، أما بالنسبة للـ ^{232}Th فقد سجلت العينة رقم (15) القراءة الأعلى 62.57740649Bq/kg فيما سجلت العينة رقم (9) القراءة الأدنى 11.49795755Bq/kg. بالنسبة للراديوم ^{226}Ra كان كذلك في مستوى طبيعي بالنسبة لجميع العينات، ونلاحظ عدم وجود فوارق كبيرة في هذا النشاط بين العينات. عدم وجود الراديوم في جميع العينات ليس مستغرباً بالتأكيد لأن التوازن الزمني للسلاسل الإشعاعية لن يكون متساوي في جميع المناطق والمواقع بحيث تظهر كل نظائر السلسلة في عملية الكشف. كما أن نشاطه الإشعاعي يمكن أن يكون أقل من مستوى تحسس المنظومة في العينات التي لم يظهر فيها، العينة (10) والعينة (14) سجلت أعلى نشاط للراديوم 226 ولكنه يبقى ضمن الحدود المعروفة عالمياً أي أقل من 370Bq/kg [15].

أهمية الراديوم تكمن في أنه المصدر الأساسي لغاز الرادون-222، الذي يمثل المكون الرئيسي للإشعاع الطبيعي الذي يتعرض له الإنسان. بالنسبة لمؤشر المكافئ للراديوم R_{aq} هو مؤشر خطر يعطي الجرعة الإجمالية للسلاسل الإشعاعية التي تكافئ جرعة الراديوم ووالداتها وهي ضمن الحدود المسموح بها. الجدول (1) يوضح مقارنة بين هذه الدراسة وبعض الدراسات المماثلة في بعض الدول العربية وإيران والمتوسط العالمي، تعطي الدراسة الحالية متوسط أعلى قليلاً من الدراسات الأخرى، طبعاً تجدر الإشارة أن الدراسات الأخرى شملت مناطق أوسع بكثير من منطقة الدراسة في هذا البحث (الحالية)، وبعض من هذه الدراسات شملت دول كاملة مثل الدراسة الكويتية [18]. عدد كبير جداً من العينات يصل إلى المئات والألاف، كذلك مثلاً في إيران توجد مناطق فيها مستوى إشعاعي عالي جداً، لكن عند أخذ متوسط عدد من المناطق فإن الخلفية الإشعاعية للبلاد أو منطقة واسعة من البلد سوف ينخفض بالتأكيد، لذلك وإن كان الفارق ليس ذو أهمية فإن المقارنة هنا من قبيل مقارنة المعلومة وليس للحكم على الخلفية الإشعاعية لمنطقة الدراسة فهذا يحتاج لمزيد من العينات والدراسات. وحتى لا يتم تفسير أن هذه الزيادة الطفيفة ناتجة من إشعاع غير طبيعي ناتج من حروب أو مشابه فهذا غير ممكن لأننا هنا نتكلم عن إشعاع طبيعي موجود في التربة في كل مكان، وليس أي إشعاع مصنع آخر أو مضاف لطبيعة هذه المنطقة بأي شكل من الأشكال [15].



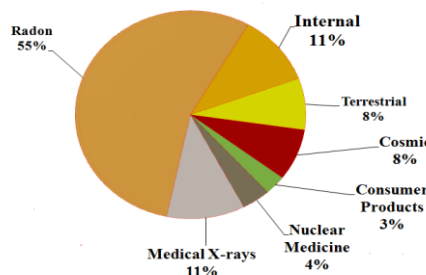
الشكل (4) النشاط الإشعاعي النوعي والنشاط المكافئ للراديوم والجرعة الممتصة للعينات
الجدول (1) يبين ملخص لمتوسط تركيز النشاط المقدر في بعض دول الشرق الأوسط والمتوسط العالمي مع الدراسة الحالية.

U238	Th232	K40	
17	18	320	مصر
28	22	640	إيران
14	7	452	العراق
25	15	188	الأردن
17	14	368	الكويت
30	16	225	عمان
11	23	641	السعودية
15	24	116	سوريا
48	42	939	اليمن
35	30	400	المتوسط العالمي
88.6	36.3	522	الدراسة الحالية

كما أنه من المهم الوضع في الاعتبار أن منطقة سيدي الصيد بترهونة منطقة امتداد جبلي أي ذات طبيعة صخرية وهذا يؤدي إلى أن الزيادة الطفيفة في النشاط الإشعاعي النوعي للسلسلة ^{238}U ليست مستغربة. بالنسبة للجرعة الممتصة والمقصود بها هنا هي كمية الإشعاع الممتص من قبل خلية الكائن الحي، ووحدتها هي الجراي Gray وهي كمية الطاقة لكل وحدة كتلة وهي مسجلة هنا بوحدة nGy/h لكي تكون مثل وحدة الجرعة الفعالة أي الطاقة الممتصة لكل وحدة زمن، لذلك سيتم تفسير نتائج هذه الجرعة ضمن الجرعة الفعالة المكافئة السنوية AEDE في الفقرة التالية (2-3).

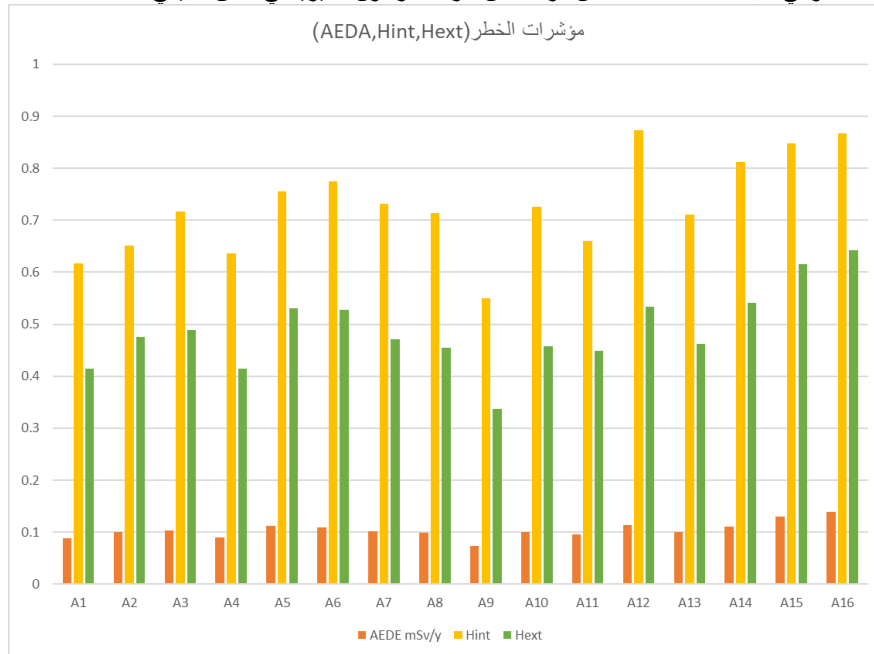
2-3 مؤشرات الخطر الإشعاعية

مؤشرات الخطر الأخرى وهي بداية بالجرعة المكافئة السنوية AEDE وهي تقريبا أهم مؤشر على الإطلاق في قياس الجرعات الإشعاعية التي يتلقاها البشر حيث أن الجرعة السنوية المسموح بها التي وضعت من قبل اللجنة الدولية للوقاية من الإشعاع لعامة الناس مقدرة بهذه الوحدة وهي 1mSv/y (واحد مللي سيفيرت في السنة) مضافة طبعاً للجرعة السنوية التي يتعرض لها معظم البشر من جميع المصادر الطبيعية والصناعية المقدره ب 2.4mSv/y ، والشكل (5) يوضح مصادر تعرض عامة الناس للإشعاع الطبيعي والصناعي حيث أن المصادر الطبيعية (الرادون، الإشعاع الداخلي، الإشعاع الأرضي والإشعاع الفضائي) تمثل 82% من هذه الجرعة، و 18% مصادر صناعية (أشعة x الطبية، الطب النووي والمنتجات الاستهلاكية).



الشكل (5) مصادر تعرض عامة الناس للإشعاع

طبعاً ما يهمننا هنا للمقارنة في هذه الدراسة هو الـ 8% التي تمثلها الجرعة الأرضية (Terrestrial) وكذلك جرعة غاز الرادون والتي تمثل 55%، حيث أن الجرعة الفعالة المكافئة السنوية التي تم حسابها في هذا البحث تمثل الجرعة الأرضية ومتوسطها كان 0.104118993mSv/y أي أن سكان هذه المنطقة يتعرضون لجرعة إشعاعية أرضية مقدارها 0.104118993mSv/y من جرعة اجمالية مقدرة بـ 2.4mSv/y أي بنسبة لا تتجاوز 5% من اجمالي التعرض وأقل من 10% من اجمالي التعرض الناتج عن المصادر الطبيعية، وهي أقل من المعدل العالمي، والذي قيمته تصل إلى 0.192mSv/y . الشكل (6) يوضح مؤشرات الخطر بالإضافة للجرعة المكافئة السنوية مؤشرات الخطر الداخلي والخارجي، حيث مؤشر الخطر الداخلي هو مؤشر تقديري لجرعة الرادون الناتجة من سلسلة ^{238}U و ^{232}Th (الثورون) حيث كان أعلى مؤشر للعينة (12) وهو 0.873894055 وبمتوسط 0.727801425 وهي نسبة طالما كانت أقل من الواحد فإن جرعة الرادون تقديرياً في نطاق طبيعي.



الشكل (6) مؤشرات الخطر الإشعاعية للعينات

من الجدير بالذكر أن غاز الرادون هو المصدر الأكبر لجرعة التعرض السنوي لعامة البشر حيث تمثل نسبته 55% من اجمالي الجرعة الطبيعية، من المفترض أن يتم التركيز عليه في القياسات والدراسات الإشعاعية للمناطق لكن قلة أو انعدام أجهزة رصد هذا الغاز المشع في ليبيا تجعل من عملية رصده غير ممكنة إلا تقديرياً من خلال مثل هذه المعادلات التجريبية التي نسبة الخطأ فيها واردة جداً، لكن الخبر الجيد في الموضوع هو أن خطورة هذا الغاز تقل أو تنعدم في الأماكن المفتوحة، وتزداد في الأماكن المغلقة، لذلك فإن جرعة الرادون في الهواء الطلق مساهمتها ضئيلة في مجموع النسبة المذكورة (55%)، ولكن الجرعة الأهم هي داخل الأماكن المغلقة والتي هي خارج نطاق هذا البحث. بالعموم النتائج المتحصل عليه بالنسبة لهذا المؤشر مطمئنة جداً، وهي في حدود المستويات الطبيعية. تركيزات ^{226}Ra في التربة السطحية مهمة بشكل واضح في تحديد معدلات الرادون المتسربة من مسام التربة للهواء ولاحقاً في الغلاف الجوي. يعتمد تركيز الرادون بشكل مباشر على التوزيع الجيولوجي للرادون (^{226}Ra) وعلى نفاذية التربة، مع أنه من الصعب اعتماد تعميمات معينة لتوزيع تركيزات الرادون، ولكن من المعروف أن مستوى تواجد الرادون في حجر الجرانيت عالي نسبياً، ومتوسط في الصخور الرسوبية ولا يميل للتواجد في محتويات الحجر الجيري [15].

(طبعاً تأكيد نوعية صخور هذه المنطقة يحتاج لتوسيع أفاق هذا البحث ليشمل التحاليل الجيولوجية)، ومنها نلاحظ الارتباط الأعلى بين مؤشر النشاط المكافئ للرادون Ra_{eq} ومؤشر الخطر الداخلي Hint في العينة رقم (16).

مؤشر الخطر الخارجي H_{ext} هو مؤشر لتقدير جرعة أشعة جاما الصادرة عن الإشعاع الأرضي وقد سجلت أعلى قيمة في العينة (16) وهي 0.641937279 وبمتوسط عام 0.488279722 وهو معدل طبيعي لمثل هكذا منطقة ولا تمثل أي قلق صحي أو بيئي. في الجدول (2) مقارنة مؤشرات الخطر الداخلي والخارجي والجرعة الفعالة المكافئة السنوية للدراسة الحالية والمتوسط العالمي، كما وضحنا في الفقرة السابقة (2-4) فإن تسجيل بعض الزيادة في هذه الدراسة مثلاً في مؤشر AEDE يرجع بالتأكيد أن منطقة أخذ العينات ليست شاسعة كما أن طبيعتها الصخرية عامل مهم في زيادة الجرعة الناتجة عن إشعاع سلسلة اليورانيوم ^{238}U خاصة إذا كانت نوعية الصخور جرانيتية [15]. من الملاحظ أن مؤشري الخطر الداخلي والخارجي على المستوى العالمي غير متوفر بالعموم ولكن بصفة عامة لا يتجاوز الواحد الصحيح باستثناء بعض المناطق المعروفة على مستوى العالم خاصة في بعض الدول مثل إيران والبرازيل والهند.

الجدول (2) مقارنة مؤشرات الخطر الداخلي والخارجي والجرعة الفعالة المكافئة السنوية للدراسة الحالية والمتوسط العالمي.

الخطر الخارجي	الخطر الداخلي	مكافئ الرادون	الجرعة الفعالة المكافئة السنوية (AEDE) $\mu\text{Sv/y}$	الجرعة الممتصة
Hext	Hint	Bq/kg		nGy/h
NA	N.A	370	70	57
NA	NA	NA	NA	18-98
0.488	0.727	180.75	0.104	84.64
غير متاح-NA				

4. الاستنتاج

من الواضح أن النشاط الإشعاعي للعينات الستة عشر ومؤشرات الخطر التجريبية المحسوبة على أساس هذا النشاط تقع في نطاق المستوى الطبيعي لمثل هذه المناطق ولا يمثل أي قلق صحي أو بيئي. الأهمية الأساسية من خلال هذه البحوث هي الحصول على معلومات حول النشاط الإشعاعي للمناطق داخل الدولة الليبية، مما يساعد في رسم خريطة إشعاعية عامة للدولة. بالرغم من العدد القليل للعينات، وهو راجع بالأساس إلى قلة مراكز التحليل والكشف الإشعاعي، فإن هذا البحث يعتبر محاولة جادة للمساهمة في وضع لبنة بسيطة نحو إنشاء خريطة إشعاعية للدولة الليبية.

5. التوصيات

- (1) قياس النشاط الإشعاعي لكامل الأراضي الليبية، وإجراء دراسات دورية لمراقبة التلوث الإشعاعي البيئي.
- (2) تشجيع الباحثين وتزويد المؤسسات التعليمية والبحثية بأحدث المعدات والأدوات اللازمة لقياس النشاط الإشعاعي.
- (3) توفير سجلات مرجعية إلكترونية للمعلومات البيئية، ونشر الأبحاث الليبية الخاصة بالنشاط الإشعاعي.
- (4) عمل مطويات ومجلات ونشرات توعوية تبين مدى خطورة التلوث الإشعاعي.
- (5) يجب ان لا تتجاوز الجرعة المكافئة للحدود التي أوصت بها اللجنة الدولية للوقاية الإشعاعية.

المراجع

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). "Sources and Effects of Ionizing Radiation." Annex C. New York: United Nations., 2023.
- [2] S. Peter and R. Adam. *Environmental radiation measurements at the former Soviet Union's Semipalatinsk nuclear test site and surrounding villages*. Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy, 201 Varick street, NY 10014-4811. 1996.
- [3] A. Essiett. *Journal of Science and Engineering Technology*, 4 (2) .041-050. 1997.
- [4] E. Udo and J. Ogunwole. *Laboratory Manual for analysis of soil, plant and water samples*, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria, pp 11-30. 1978.
- [5] Nuclear Energy: The Good, the Bad, and the Debatable. https://www.niehs.nih.gov/health/assets/docs_f_o/nuclear_energy_the_good_the_bad_and_the_debatable_508.pdf.
- [6] A List of Radioactive Elements - ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/list-of-radioactive-elements-608644>.
- [7] DOE Explains...Nucleosynthesis | Department of Energy. <https://www.energy.gov/science/doe-explainsnucleosynthesis>.
- [8] <https://www.epa.gov/radiation/radioactive-decay>.
- [9] E. Udo and J. Ogunwole. *Laboratory Manual for analysis of soil, plant and water samples*, University of Ibadan, Ibadan, Nigeria, pp 11-30. 1978.
- [10] World Health Organization. "Radon." <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon>. Accessed November 5, 2023.
- [11] International Commission on Radiological Protection (ICRP). "ICRP Publication 103: The Recommendations of the International Commission on Radiological Protection." Ann. ICRP 37(2-3):1-332, 2007.
- [12] C. Dovlete and P. Povinec. *Quantification of uncertainty in gamma spectrometric analysis of environmental samples*, IAEA-TECDOC-1401. Int. At. Energy Agency, Austria 103e126. 2004.
- [13] UNSCEAR Report. *Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (Report to the General Assembly, with Annexe). 1988.
- [14] J. Beretka and P. Mathew. *Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and byproducts*. Health Physics, 48, pp 87-95. 1985.
- [15] UNSCEAR Report. *Sources, effects and risks of ionizing radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation* (Report to the General Assembly, with Annexes). 2000.
- [16] Svoukis, E., & Tsertos, H. *Indoor and outdoor in situ higher resolution gamma radiation measurements in urban areas of Cyprus*. Radiation Protection Dosimetry, 123(3), pp 384-390. 2007.
- [17] I. McAulay. And D. Moran. *Natural Radioactivity in Soil in the -Republic of Ireland Radiation*. Port. Dosi J., 24,47-49. 1988.
- [18] A. Bajoga, N. Alazemi, H. Shams, P. Regan and D. Bradley. *Radiation Physics and Chemistry-Evaluation of naturally occurring radioactivity across the State of Kuwait using high-resolution gamma-ray spectrometry*,137, pp 203-209. 2017.