مجلة جامعة دمشق للعلوم الأساسية
مجلد 40- عدد 4 (2024): 148-162

Damascus University Journal for the Basic Sciences
Vol 40 No.4 (2024): 148-162

تقدير الأخطار الإشعاعية الناجمة عن معالجة المياه المرافقة بتقنية الأراضي الرطبة

لينا خليل كدور*[1]، ماجدة نحيلي[2]، محمد سعيد المصري[3]

[1]طالبة ماجستير في قسم الفيزياء – كلية العلوم– جامعة دمشق– سورية.
[1]أستاذة في قسم الفيزياء– كلية العلوم–جامعة دمشق–سورية.
[1]رئيس قسم الوقاية والأمان– هيئة الطاقة الذرية السورية.

الملخص:

جرى في الدراسة الحاليّة تحديد الجرعة الإشعاعيّة والأخطار الإشعاعيّة الناجمة عن معالجة المياه المرافقة للنفط والتي تحتوي على مواد مشعة طبيعيّة باستعمال تقنية الأراضي الرطبة. وحساب تركيز نشاطية الراديوم-226 (^{226}Ra) المترسب بافتراض أنَّ معدل الطرح اليومي من المياه المرافقة في الأراضي الرطبة هو (0.8×10^{5}) م^{3} وأنَّ تركيز نشاطية ^{226}Ra في المياه قرابة (2) بكرل/ل. وأظهر الحساب أنَّ تركيز النشاطيّة في أحواض المعالجة كان نحو (33.6) بكرل/كغ في سنة واحدة. استعمل برنامج RESRAD لتقييم الجرعة الإشعاعيّة الكليّة، التي يمكن أن يتلقاها العاملون في مشروع الأراضي الرطبة. وأظهرت النتائج في هذه الحالة أنه لن يتلقى أي من العاملين بهذا المشروع جرعة سنوياً أكبر من (1) ميلي سيفرت/سنة، وهي ناجمة بشكل رئيس من التعرض الخارجي للإشعاع. كما تبين أنَّ الجرعة الإشعاعية والخطر الإشعاعي الناجم عن التعرض الداخلي لغاز الرادون والعوالق مهملة هذا وتزداد الجرعة الإشعاعيّة بازدياد تركيز الراديوم-226 في المياه المرافقة والتي يمكن أن تصل إلى (100) بكرل/ل. ونظراً إلى انخفاض تركيز الراديوم-226 المترسب، فإنَّ المخاطر الإشعاعيّة المرافقة للمشروع خلال عملية المعالجة العادية صغيرة يمكن إهمالها.

الكلمات المفتاحيّة: المياه المرافقة، تقنية الأراضي الرطبة، ^{226}Ra، الجرعة الإشعاعيّة، الأخطار الإشعاعيّة.

تاريخ الإيداع: 2022/11/28
تاريخ الموافقة: 2023/2/6

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص **CC BY-NC-SA 04**

ISSN (online): 2789-6366
http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

Estimating the Radiological Risks Resulting from Treating Produced Water by Wetlands Technique

Lina khalil Kaddour*[1], Magedda Nheli[2], Mohammed Said Al-Masri[3]

[1]*Master's Student, Department of physics, Faculty of Science, Damascus University.
[2]Prof. Dr. Department of physics, Faculty of Science, Damascus University, Syria.
[3]Head of Protection and Safety – Atomic Energy Commission.

Received :2022/11/28
Accepted:2023/2/6

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

Abstract:

In the current study, the radiation dose and risk resulting from the treatment of of co-produced water with oil containing naturally occurring radioactive materials were determined using the wetland technique. Calculation of the activity concentration of radium-226 (^{226}Ra) deposited assuming that the daily rate of removal from co-produced water in the wetlands is (0.8×10^5 m^3) and that the activity concentration of ^{226}Ra in the water is approximately (2 Bq/L). The calculation showed that the activity concentration in the treatment ponds was about (33.6 Bq/kg) in one year. The RESRAD program was used to evaluate the total radiation dose that workers in the wetland project might receive. In this case, the results showed that none of the workers in this project would receive an annual dose greater than (1) msv/year, which is mainly caused by external exposure to radiation. It was also found that the radiation dose and the risk resulting from internal exposure to radon gas and plankton are negligible, and the radiation dose increases with the increase in the concentration of radium-226 in the accompanying water, which can reach (100) Bq/L. Given the low concentration of radium-226 deposited, the radioactive risks associated with the project during the normal treatment process are small and can be neglected.

Key Words: Co-Produced Water, Wetland Technology, ^{226}Ra, The Radiological Dose, The Radiological Risks.

1. المقدمة:

يُرافق إنتاج النفط والغاز منتجاً ثانوياً مياه منتجة أو مرافقة (produced water). تحتوي هذه المياه على محاليل ملحيّة طبيعيّة من باطن الأرض، ويمكن أن تختلط بالمياه التي تُحقن في أبار النفط لتعزيز استخلاصه، في عملية تُسمى الغمر بالمياه (water Flooding). في بعض الحالات، تتجاوز كمية هذه المياه، كمية النفط المنتج ذاته. تتم معالجة المياه المرافقة، بإزالة المواد الصلبة وآثار النفط منها، ثمَّ تعاد إلى البئر لإعادة استعمالها [1,2]. ترتبط خصائص المياه المرافقة بطبيعة التشكيلات الجيولوجيّة التي تحتويها، وتشتمل المركبات المنحلة التي توجد في المياه المرافقة بشكل رئيسي: مركبات النفط المنحلة، ومعادن، ومركبات كيميائية ومواد صلبة (مثل: نواتج التآكل والرواسب الحرشفية والبكتيريا والشموع والإسفلت) وغازات. وفضلاً عن ذلك، تحتوي المياه المرافقة على مواد مشعة ذات منشأ طبيعي تسمى Naturally Occurring Radioactive Materials(NORM) تنتج عن تفكك السلسلتين المشعتين^{232}Th و^{238}U [1,2,3]. وفي الوقت الحاضر، تعد المياه المرافقة إحدى أكبر النفايات المشعة الطبيعية حجماً التي ترافق صناعة النفط [1,2,4]. يؤدي التخلص من هذا النوع من النفايات دون ضوابط إلى تلوث بيئي، وتعرض أفراد الجمهور للإشعاع [1,2,5]. تعمل عدة شركات نفط في العالم على تصريف المياه المرافقة في البيئة من خلال بحيرات اصطناعيّة غير مبطنة وتترك لكي تتبخر أو ترمى في البحر [2,4]. ويتراوح النشاط الإشعاعي للراديوم-226 (^{226}Ra) بين -0.002) (1200بكرل/ل وتبلغ نحو(180-0.3) بكرل/ل للنظير ^{228}Ra في آبار مختلفة في العالم [1,2]. دلت الدراسات [2,6] أنَّ الراديوم يكون أكثر وفرة في المياه المرافقة الأكثر ملوحة والغنيّة بشوارد الكلور. وتستعمل حالياً عدة تقنيات لمعالجة المياه المرافقة قبل التخلص منها مثل: التبخير أو التناضح العكسي أو المبادلات الأيونيّة أو التقنيات الحراريّة أو الامتزاز أو استخدام تقنيّة الأراضي الرطبة المصنعة [7,8]. وتعتمد تقنية الأراضي الرطبة في معالجة المياه المرافقة على آليات أيضيّة معينة يقوم بها النبات تؤدي إلى إزالة أو حجز أو تحليل الملوثات.

يهدف البحث الحالي إلى:

- تقدير الجرعة الإشعاعيّة الناجمة عن مشاريع معالجة المياه المرافقة باستعمال تقنية الأراضي الرطبة.
- تقدير الخطورة الإشعاعية الناجمة عن هذه المشاريع.

2. الدراسات المرجعيّة:

هناك دراسات عديدة اهتمت بمعالجة المياه المرافقة في حقول النفط والتخلص الآمن منها أو إعادة استعمالها وتشمل:

- استعمال المياه المرافقة بعد معالجتها في عمليات ري المزروعات التي تتحمل الملوحة [9].
- أو استعمال المياه المرافقة بإنتاج الملح عن طريق التبخير والتبلور واستعماله في عمليات حفر الأبار أو للاستهلاك البشري بعد تنقيته وخفض نسبة الملح بالمياه المرافقة باستعمال طريقة التناضح العكسي [9] أو استعمالها في العمليات الإنتاجية في حقول النفط أو لري المحاصيل، أو غير ذلك.

- كما درست إزالة الراديوم كيميائياً من المياه المرافقة باستعمال مركبات ترتبط معه وتشكل معقدات أو أملاح أو بإضافة موانع تشكل رواسب حرشفية أو إضافة الميتانول لمنع تشكل الماءات حيث يؤدي وجود الميتانول [10]. كما يمكن إزالة الراديوم أيضاً فيزيائياً باستعمال الترسيب الكهربائي.
- أكدَّ [1] إيقاف رمي المياه المرافقة للنفط في حفر التبخير لأنها تسبب في رفع مستوى الخلفية الطبيعية. كما درست إمكانية إزالة 226Ra باستخدام البنتونايت [11] و جرت دراسة لفصل الراديوم من عينات الرواسب الحرشفية NORM الناتجة عن الصناعة النفطية دون التطرق إلى إمكانية اختبارها على المياه المرافقة [12,13].
- وجرى تقدير بعض الأخطار الإشعاعية الناجمة عن استعمال المياه المرافقة لإنتاج الملح [1].

3. المواد المستخدمة والطرائق:

نظراً لتعذر الحصول على أي بيانات تتعلق بحقول النفط في الجمهوريّة العربيّة السوريّة في الوقت الراهن، فقد جرى اعتماد بيانات أحد مشاريع معالجة المياه المرافقة بتقنيّة الأراضي الرطبة المذكورة في المرجعين [14,15]. ويمكن استعمال المنهجية المتبعة في هذا البحث لأي مشروع يجري اقتراحه في حقول النفط.

1.3. موقع المشروع:

اعتمد في هذه الدراسة حقل النفط والغاز التابع لشركة تطوير للنفط والموجود في المنطقة الجنوبيّة الوسطى لمملكة البحرين [14,15]. وتعد هذه المنطقة صحراويّة نائيّة وخالية من الواحات والينابيع ومصادر المياه. في حال جرى تنفيذ المشروع في سورية مستقبلاً، يفترض تنفيذه في أحد حقول النفط التي تقع في مناطق خالية من الأنشطة البشرية قليلة الغطاء النباتي.

2.3. بيانات المشروع:

تبين الفقرات الآتية المعلومات المستخدمة في تقدير الجرعات الإشعاعيّة والخطورة الإشعاعيّة:

1. يبين الجدول1 بيانات المشروع [14,15]:

الجدول 1. بيانات المشروع [14,15].

المساحة الكلية لأراض المشروع $م^2$	مساحة الأراضي الرطبة $م^2$	الحد الأقصى للمياه المرافقة الداخلة $م^3$/يوم
1733790	10^6	0.8×10^5

2. أفترضَ أنَّ مستوى النشاط الإشعاعي للراديوم-226 قرابة 2 بكرل/ل.

3. ووفقاً لتصميم الأراضي الرطبة، فلقد جرى تقسيم حوض المشروع الفعلي المفترض إلى 5 خلايا من الأراضي الرطبة متساوية المساحة حيث يجري تبطين الأراضي وفقاً لما يأتي:

- تبطين سطح الأرض الرطبة بطبقة مانعة للتسرب، تتكون من الطين Clay، وظيفتها خفض تسرب المياه المرافقة نحو باطن الأرض.
- ضغط الطبقة السابقة، بحيث تصبح طبقة عازلة وذات نفاذية منخفضة بمعدل أقل من 10^{-8} م/ثا. و نفترض أنَّ سمك طبقة الطين اللازمة هو 20 سم.
- إضافة طبقة أخرى من التربة بسمك 20 سم فوق الطبقة العازلة ويتم زراعة القصب فيها وتنميته، مما يسهم في تفكك المادة العضويّة.

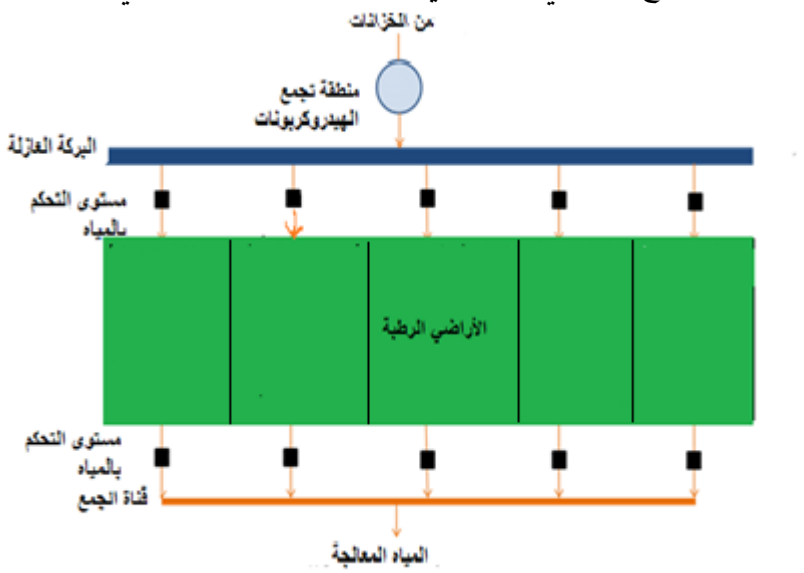
4. الأنواع النباتيّة المقترح زراعتها لمعالجة المياه المرافقة هي: قصب البحر أو السعد الناعم أو جولان أو البوط الدمياطي أو القيصوب الجنوبي.

5. يتم إرسال المياه المرافقة بعد معالجتها بتقنية الأرض الرطبة المزروعة، إلى قناة تجميع خاصة.

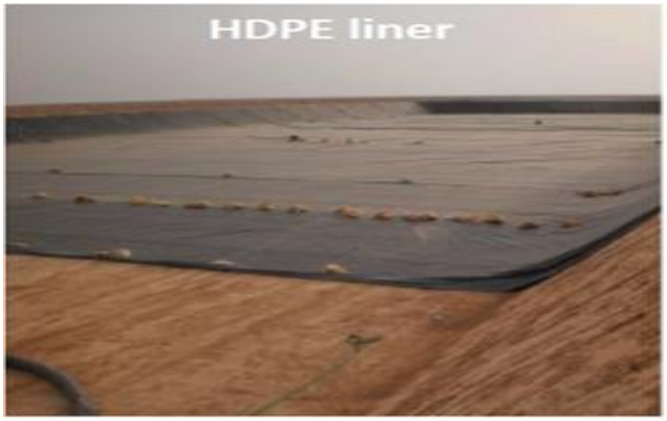
6. يمكن استعمال المياه المعالجة في عملية غمر البئر أو في استعمالات أخرى.

7. تقدر المدة المفترضة لتشغيل المشروع والاستفادة منه بنحو25 سنة.

يقدم الشكل 1 مخططاً مقترحاً لمشروع الأراضي الرطبة ويمثل الشكل 2 بطانة الأراضي الرطبة.



الشكل 1. مخطط مقترح لمشروع الأراضي الرطبة.



الشكل2. بطانة الأراضي الرطبة [15].

4. النتائج والمناقشة:

1.4. توزع الراديوم في مكونات الأراضي الرطبة:

يعد الراديوم Ra^{226} (1620) سنة و Ra^{228} (5.8) سنة، من أهم نظائر الراديوم في صناعة النفط والغاز بينما Ra^{224} (11.4) يوم و Ra^{223} (3.6) يوم، فهما أقل أهمية [12]. وينتمي الراديوم إلى العناصر الترابيّة ويتشابه بسلوكه الكيميائي مع الباريوم والسترونسيوم والكالسيوم، ويمكن أن يُشكل أملاح غير منحلة، خاصةً مع الكبريتات أو الكربونات [1]. يؤدي توفر شوارد SO_4^{-2} والباريوم بتراكيز عالية في المحلول إلى انخفاض تركيز الراديوم في المياه المرافقة للنفط والغاز، وذلك لترسيب كل من الراديوم و$BaSO_4$ [1]. من جهة أخرى لوحظ وجود علاقة إيجابية بين نشاط الراديوم وملوحة المحاليل في حقول النفط حول العالم[4]. ويؤدي وجود شوارد أخرى في المياه، إلى تنافسها مع شوارد Ra في الادمصاص على أكاسيد الطين المحيطة، وبهذا يبقى الراديوم في المحلول ولا يترسب.

وإنَّ الشوارد (Ra^{+2} وBa^{+2}) منحلة في الماء ولا تخضع للأكسدة في مجال قيمة PH من 3 إلى 9، وتعد الشاردة Ra^{+2} هي السائدة في المياه الطبيعيّة. وعند قيمة PH تتجاوز 9، يمكن أن يشكل Ra^{+2} وBa^{+2} رواسب على شكل ماءات $Ba(OH)_2$ و $Ra(OH)_2$. أمّا من أجل القيم الأقل من (PH=3) فإنَّ الراسب السائد هو كبريتات مائيّة. وفقاً لما سبق، فإن الراديوم الموجود في المياه المرافقة للنفط، يمكن أن يترسب في الأراضي الرطبة دائماً مع المركبين $BaSO_4$ و$CaSO_4$. وتتوضع كل هذه الرواسب في قاع الأراضي الرطبة مختلطةً مع بعضها البعض. ووفقاً لبيانات المشروع [14,15]، فإنَّ تراكيز كل من الكالسيوم والباريوم والسترونسيوم والكلور قد وصلت إلى 2900 ملغ/ل و2400 ملغ/ل و11×10^4 ملغ/ل و16×10^3 ملغ/ل على الترتيب في حين بلغت درجة الحموضة PH=6.7.

2.4. ادمصاص الراديوم بواسطة مواد الطين المستعملة كحاجز طبيعي في خلايا الأراضي الرطبة:

يستعمل الطين على نطاق واسع كمادة حاجزة طبيعيّة للنكليدات المشعة وتمنعها من التسرب إلى المياه الجوفيّة. أثبتت بعض الدراسات حدوث ادمصاص Ra^{226}على البنية الطينيّة بمختلف أنواعها، ويزداد ادمصاص Ra^{226} بازدياد قيمة PH.

وتشير بعض المراجع مثل [16] إلى أنَّ نسب ادمصاص هذا النكليد المشع في حالة التوازن، تبلغ نحو 50% عند درجة الحموضة (PH=4)، و75% عند (PH=6) إلى(PH=8)، و90% عند (PH=10). وبناءاً عليه، نتوقع أن يحدث ادمصاص الراديوم على المواد الطينيّة للأراضي الرطبة بنسبة 75% لأن قيمة PH للمياه المرافقة عند دخولها إلى المشروع نحو 6.7 وأقل من 8. ولكن، نظراً لأن تركيز النشاط الإشعاعي ^{226}Ra في المياه المرافقة صغيرة نسبياً مقارنة بالكالسيوم والسترونسيوم والباريوم، فإنَّ كمية الراديوم المدمصة على الطين ستكون ضئيلة. وإنَّ الطبقة العلويّة (التي يبلغ عمقها20 سم)، والتي سيتم فيها زراعة القصب مثلاً وتنميته قد تمنع الحركة العموديّة للراديوم نحو الأسفل باتجاه طبقة الطين، مما يؤدي إلى ادمصاصه في هذه الطبقة. وفضلاً عن ذلك، تعمل التغذية اليوميّة المستمرة بالمياه الداخلة إلى الخلايا، على خفض مدة تماس الراديوم مع طبقات الطين والتربة السفليّة، مما يخفض ادمصاصه عليها. ومع ذلك، بافتراض أنَّ 25% من الراديوم يدمص على التربة و الطين، فيمكن تقدير كمية الراديوم المدمص (بافتراض أنَّ متوسط التركيز 2 بكرل/لتر) على التربة والطين سنويّاً، وأنَّه إذا تمَّ ادمصاص الراديوم على طبقة التربة والطين حجمها: 40سم×100 سم× 100 سم، فتكون كتلتها نحو 435 كغ.

الجدول 2. حساب تركيز نشاطيّة الراديوم المدمص على التربة وطبقة الطين سنويّاً وخلال عمر المشروع.

الحد الأقصى لحجم المياه الداخلة في اليوم (لتر/يوم)	$0.8\times10^5\ m^3/d \times 10^3 = 0.8\times10^8$
الحد الأقصى لحجم المياه الداخلة في السنة (لتر/سنة)	$365\ days \times 0.8\times10^8 = 2.92 \times 10^{10}$
تركيز نشاطيّة (^{226}Ra) في قاع خلايا الأراضي الرطبة سنوياً (بكرل)	$2.92 \times 10^{10} \times 2 = 58.4 \times 10^9$
تركيز نشاطيّة (^{226}Ra) الموزع بشكل منتظم على مساحة الأراضي الرطبة سنوياً (بكرل.م^2)	$\frac{58.4 \times 10^9\ Bq \times 25\%}{10^6} = 14.6 \times 10^3$
تركيز نشاطيّة (^{226}Ra) الموزع بشكل منتظم في طبقة بسمك 40cm سنوياً (بكرل/كغ)	$\frac{14.6 \times 10^3}{435} = 33.6$
تركيز نشاطيّة(^{226}Ra) الموزع بشكل منتظم في طبقة بسمك 40cm خلال عمر المشروع (بكرل/كغ)	$33.6 \times 25 years = 839$

3.4. امتصاص النباتات المقترحة للراديوم:

أظهرت النتائج أن متوسط معامل انتقال ^{226}Ra من التربة الملوثة إلى الأنواع النباتيّة المدروسة كان في حدود (10^{-3}-10^{-2})، وهي نسبة منخفضة نسبياً [17]. كما وُجدَ أنَّ أقل تراكم للراديوم−226 (^{226}Ra) يكون في حالة نبات القصب، وأن أعلى قيمة تكون في حالة عشب الحلبوب. وهكذا، فإن امتصاص الراديوم من المياه المرافقة بواسطة القصب، سيكون منخفضاً للغاية [18].

4.4. غاز الرادون- 222 ووليداته:

يأتي المصدر الأول للرادون في المياه المرافقة من التفكك الإشعاعي للراديوم في طبقة صلبة كالرواسب (مثلاً في التربة والطبقات الطينية لخلايا الأراضي الرطبة)، بالإضافة إلى تلك المنحلة في المياه المرافقة.

يبلغ معامل انتشار الرادون في طبقة صلبة (20-10) سم^2/ثا [1]، وبالتالي، فإنَّ ذرات الرادون المتشكلة في طبقة بسمك (50-30) نانومتر من المحتمل أن تدخل الهواء، أو مسام الماء في الرواسب أو التربة [19]. وإنَّ الرادون الناتج من الراديوم المدمص سوف يتحلل قبل أن يتم إطلاقه من سطح خلايا الأراضي الرطبة بسبب عمق الماء في هذه الخلايا. هذا لن يصبح مشكلة إلا في نهاية عمر الخلايا بعد تبخر الماء. وينتشر جزء من الرادون المتولد في التربة والطين، تبعاً لمعامل الانبعاث، عبر طبقة التربة. ويتحكم سمك طبقة التربة ومعامل الانتشار، في مقدار غاز الرادون المنطلق إلى طبقة المياه التي تعلوها. ويقدر معامل انتشار الرادون في مادة مشبعة بالكامل بنحو (10-5) سم^2/ثا. ويكون تركيز الرادون في الهواء منخفضاً جداً وقريباً من مستويات الخلفية الطبيعيّة، وهذا بسبب انخفاض تركيز Ra^{226} وانخفاض معدل انبثاق الرادون من التربة والمواد الطينيّة [19].

5.4. تقدير الخطورة الإشعاعيّة:

1.5.4. طريقة التقدير:

يتضمن التقدير الكامل للجرعة الإشعاعيّة عدة خطوات. الخطوة الأولى هي تقدير الجرعة الإشعاعيّة المحتملة التي يمكن أن يتلقاها فقط الفرد الذي يقوم بأنشطة في مشروع الأراضي الرطبة في أثناء عملية المعالجة. وجرى في هذا البحث استعمال برنامج RESRAD 7.2 المعروف عالمياً لتقدير الجرعة الإشعاعيّة واحتماليّة حدوث السرطان (المخاطر الصحية) التي يتلقاها المشغلون.

2.5.4. مسارات التعرض:

يمكن أنْ يتعرض العمال للإشعاع، في هذا المشروع وفق سيناريوهين رئيسيين هما: في أثناء الفحوصات الروتينية وبعد إيقاف تشغيل الخلايا. ويمكن أن يحدث تسرب عرضي للمياه المرافقة ويلوث التربة حول أحواض التبخر. ولكن مستوى التلوث سيكون ضئيلًا جداً إذا تمّت ملاحظة الحادث خلال ساعات العمل. وتشمل مسارات التعرض التي تم أخذها في الحسبان، الإشعاع الخارجي والإشعاع الداخلي عن طريق استنشاق الغبار الملوث من التربة والطين المجفف وغاز الرادون مع وليداته. ولم يؤخذ في الحسبان تناول مسار اندخال النويدات المشعة، نظراً لعدم وجود موارد نباتيّة وغذائيّة ومياه شرب في المنطقة. ويستند هذا الافتراض إلى استخدام القصب والنباتات الأخرى للاستهلاك البشري. يبين الجدول 3 مسارات التعرض للإشعاعات المؤينة من مشروع معالجة المياه المنتجة بتقنية الأراضي الرطبة.

الجدول 3. مسارات التعرض للإشعاعات المؤينة من مشروع معالجة المياه المنتجة بتقنية الأراضي الرطبة.

مسارات تعرض العمال	طريقة التعرض	الجرعة الإشعاعية
حول الخلايا أثناء الصيانة الروتينية وفي مباني الإدارة.	الإشعاع الناجم عن وجود ^{226}Ra في الترسبات.	خارجية
	استنشاق الرطوبة الحاوية على الراديوم ووليدات غاز الرادون	داخلية
	استنشاق غاز الرادون	داخلية
في مرحلة إيقاف التشغيل، وإزالة الأنظمة الميكانيكية والكهربائية، وإزالة البطانة الأرضية في نهاية عمر المشروع.	الإشعاع الناجم عن وجود ^{226}Ra في الترسبات.	خارجية
	استنشاق الرطوبة الحاوية على الراديوم ووليدات غاز الرادون.	داخلية
	استنشاق غاز الرادون.	داخلية

3.5.4. الجرعات الإشعاعيّة أثناء التشغيل العادي ومرحلة إيقاف التشغيل:

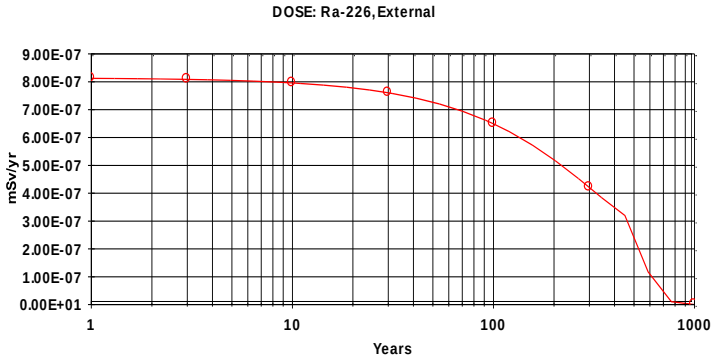
إنَّ الجرعة التي يتلقاها المشغلون على مسافة 100م من خلايا الأراضي الرطبة منخفضة للغاية ويمكن إهمالها الكون مسار الإشعاع الخارجي يعمل على مسافة محدودة للغاية ويتناقص بشكل عكسي مع مربع المسافة من المصدر. أمّا المجموعة الوحيدة من المشغلين التي يمكن أن تحصل على جرعة إضافيّة فهم الذين يعملون بالقرب من هذه الخلايا. استخدمَ برنامج RESRAD لحساب الجرعات الإشعاعيّة التي يمكن أن يتلقاها العاملون بالقرب من الأراضي الرطبة بواسطة التعرض الخارجي والداخلي. كما هو مبين في الجدول 4.

الجدول 4. الافتراضات المعتمدة لحساب الجرعات الإشعاعية التي يمكن أن يتلقاها العاملون بالقرب من الأراضي الرطبة.

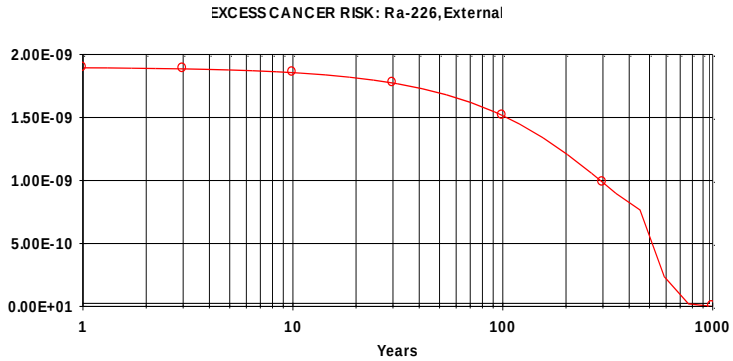
1	قيمة النشاط الإشعاعي للراديوم ^{226}Ra في المياه المرافقة	تبقى ذاتها خلال زمن وجود المشروع (2 بكرل/ل) ويمكن أن تزداد مع ازدياد النشاط الكلي مع الزمن
2	قيمة النشاط النوعي في الأراضي الرطبة (بكرل/كغ)	33.6 في السنة الواحدة
		839 بعد 25 سنة
3	غطاء على الجزء العلوي من الخلايا تم النظر في حالتين	وجود طبقة من الماء بسمك 0.5 م
		عدم جود طبقة من الماء في نهاية عمر المشروع
4	توزيع النشاط الإشعاعي في قعر الأراضي الرطبة	متجانس
5	سمك المنطقة الملوثة (سم)	40
6	المساحة الكلية للمنطقة الملوثة بالراديوم ($م^2$)	10^6
7	مدة التعرض	8 ساعات في اليوم
		(8 x365x24) في السنة
8	التوازن الإشعاعي بين النواة الأم مع وليداته المشعة	متوفر
9	معدل الاستنشاق ($م^3$/سنة)	8400
10	تحميل جماعي للاستنشاق	10^{-4}
11	الشروط البيئية للمنطقة	الحياة النباتية الطبيعية تتألف من نباتات صحراوية وأعشاب ولا يوجد أشجار كبيرة في المنطقة

توضح الأشكال من 3 إلى 12 منحنيات تابعيّة الجرعة الإشعاعية المتوقعة واحتماليّة حدوث السرطان. تظهر نتائج النمذجة أن تركيز النشاط المقدر 839 بكرل/كغ في خلايا الأراضي الرطبة ليس مهماً وليس من المحتمل لأن ذلك لن

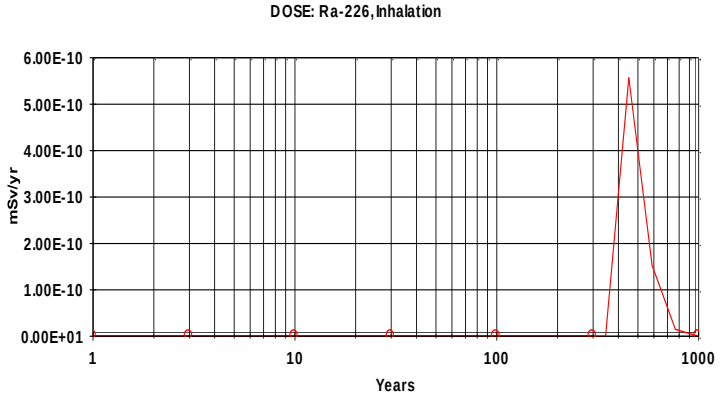
يؤدي إلى تلقي أي عامل من مشغلي المشروع جرعات سنوية تزيد عن الحد الموصى به دولياً هو (1) ميلي سيفرت. المساهم الرئيسي في الجرعة سيكون من الإشعاع الخارجي. يعمل هذا المسار على مسافة محدودة للغاية، ويتناقص بشكل عكسي مع مربع المسافة من المصدر. بالإضافة إلى ذلك، فإن الغطاء المائي (0.5) م كافٍ لتقليل الجرعة إلى مستوى الخلفية للمشغلين ويعمل كدرع. ومع ذلك، إذا كانت هناك أي زيادة في معدل الجرعة خلال المرحلة التشغيلية للمنشأة، يمكن تقييد الإشعاع الخارجي بشكل فعال للغاية عن طريق التحكم في الوصول إلى الخلايا. يجب أن يؤثر هذا المسار فقط على مشغلي الخلايا إذا كانوا يعملون في موقع الخلايا. بالإضافة إلى ذلك، نظراً لوجود مسافة بين الخلايا ومبنى مكاتب المشغل، فإن الجرعة الخارجية لا تكاد تذكر. كما تم التنبؤ بالجرعة الداخلية باستعمال المعلمات ذاتها ووجد أنها قريبة من الصفر وهذا لأن معظم غاز الرادون مع بناته يبقون في الماء ومعظم غاز الرادون المنبعث في الهواء يخفف ويتشتت بفعل الرياح. جرى أيضاً حساب وعرض مخاطر الإصابة بالسرطان. يلاحظ من الأشكال 3-6 أنَّ مخاطر الإشعاع المرتبطة بأنشطة المشروع أثناء التشغيل العادي صغيرةً نوعاً ما.



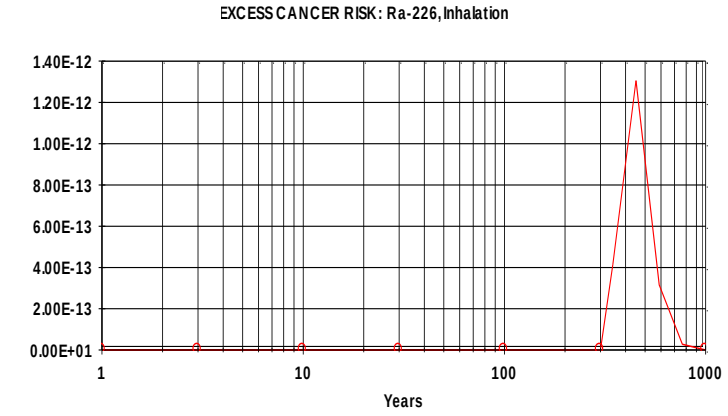
الشكل 3. تابعيّة الجرعة الإشعاعيّة للزمن عند التعرض للإشعاع الخارجي من أجل (نشاط إشعاعي ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي 0.5 م).



الشكل 4. تابعيّة احتماليّة حدوث السرطان للزمن عند التعرض للإشعاع الخارجي من أجل(نشاط إشعاعي ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي 0.5 م).



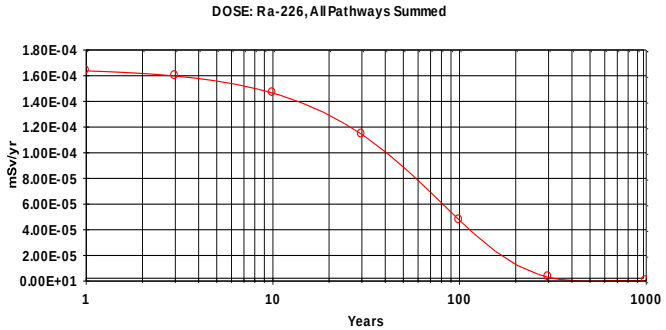
الشكل 5. تابعيّة الجرعة الإشعاعيّة للزمن عند التعرض للاستنشاق من أجل(نشاط إشعاعي ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي 0.5 م).



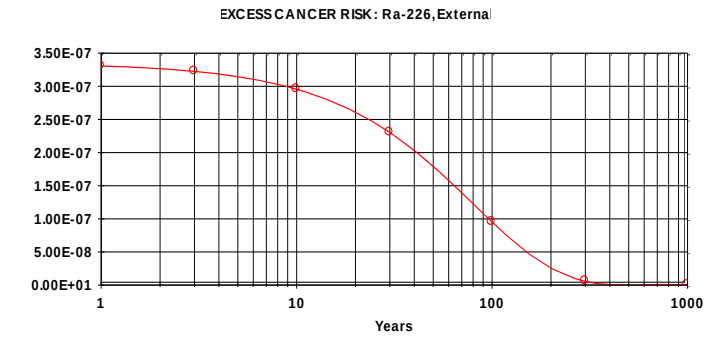
.

الشكل 6. تابعيّة احتماليّة حدوث السرطان للزمن عند التعرض للاستنشاق من أجل(نشاط إشعاعي ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي 0.5 م).

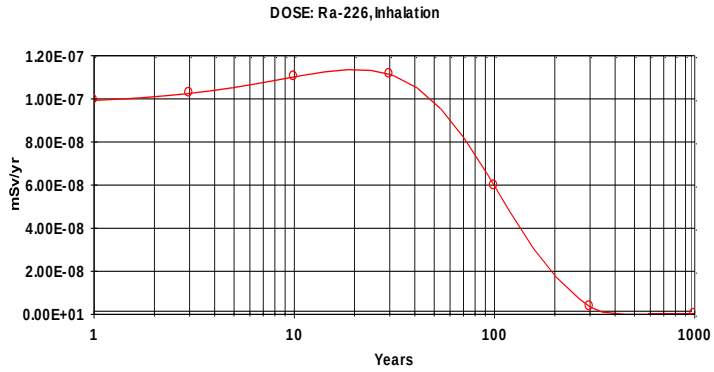
بالنسبة لمرحلة إيقاف التشغيل، تم وضع الافتراضات ذاتها بغطاء صفري(لا يوجد مياه مرافقة). جرى عرض حساب الجرعات والمخاطر في الأشكال من 7 إلى 10 على الرغم من عدم وجود غطاء، فإنَّ مخاطر جرعات الإشعاع المرتبطة بخلايا الأراضي الرطبة الجافة صغيرة نوعاً ما.



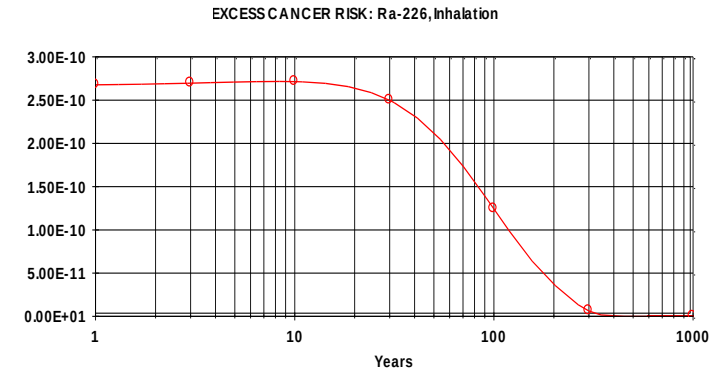
الشكل 7. تابعيّة الجرعة الإشعاعيّة المتوقعة للزمن عند التعرض للإشعاع الخارجي من أجل(نشاط إشعاعي ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي0 م).



الشكل 8. تابعيّة احتماليّة حدوث السرطان لعدد السنوات بواسطة الإشعاع الخارجي من أجل(نشاط إشعاعي للـ ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي0 م).



الشكل 9. تابعيّة احتماليّة الجرعة الإشعاعيّة المتوقعة لعدد السنوات عند التعرض للاستنشاق من أجل(نشاط إشعاعي للـ ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي0 م).



الشكل 10. تابعيّة خطورة حدوث التعرض للسرطان لعدد السنوات عند التعرض للاستنشاق من أجل(نشاط إشعاعي للـ ^{226}Ra 839 بكرل/كغ وغطاء مائي0 م).

أخيراً، افترضت هذه الحسابات أنَّ تركيز النشاط الإشعاعي المقدر في المياه المرافقة كان 2 بكرل/ل ولكن يمكن أن تكون تراكيز الراديوم-226 أعلى بكثير وقد تصل إلى 100 بكرل/ل لأي مشروع أراضي رطبة بعد تحديد النشاط الإشعاعي للمياه المرافقة المستعملة لهذا لابدَّ من إعادة الحساب.

3.5.4. الجرعات الإشعاعيّة في الحالات الطارئة:

إن حالات التشقق التي يمكن أن تحدث لخلايا الأراضي الرطبة أو التسرب من جوانب خلايا الأراضي الرطبة وفيضان المياه المرافقة على الحواف إلى المناطق المحيطة، تؤدي إلى تلوث التربة حول خلايا الأراضي الرطبة ^{226}Ra. وتعتمد درجة التلوث على تركيز نشاط الراديوم في المياه المرافقة وحجم المياه المتدفقة. ومع ذلك، نظراً لأن مشروع الأراضي الرطبة يخضع للمراقبة اليومية من قبل مشغلي المنشأة، يمكن ملاحظة أي حالة طارئة ويمكن اتخاذ الإجراءات. يبين في الجدول 5 نتائج حساب تركيزات النشاط الإشعاعي للحالات الطارئة:

الجدول 5: حساب تركيزات النشاط الإشعاعي للحالات الطارئة.

بافتراض: 10^4م^3 من المياه المرافقة و 2 بكرل/ل من ^{226}Ra	
النشاط الإجمالي ^{226}Ra (بكرل)	$2\ Bq/L \times 10^4\ m^3 \times 10^3 = 2 \times 10^7$
النشاط السطحي لكل 1م^2 حيث تغمر الحواف ويحدث تلوث على منطقة مساحتها (100م × 100م=10^4م^2) (بكرل/م^2)	$\frac{2 \times 10^7}{10^4} = 2 \times 10^3$
النشاط المحدد ^{226}Ra: بافتراض عمق تلوث يبلغ 10cm (وزن التربة المحفورة بحجم 100سم × 100سم × 10سم حوالي108.9 كغ بافتراض الكثافة 1.09 (بكرل/كغ)	$\frac{2 \times 10^3}{108.9} = 18.4$

5. الاستنتاجات:

1. أظهرت نتائج هذا العمل أنَّ تركيز نشاطيّة ^{226}Ra موجود فقط في قاع الأراضي الرطبة حيث يترسب مع كبريتات الكالسيوم والباريوم والتركيز الأعظمي للراديوم–226 بعد 25 عام يبلغ 839 بكرل/كغ بافتراض تركيز نشاط إشعاعي للراديوم-226 في المياه المرافقة هو 2 بكرل/ل وهو ليس خطيراً وليس من المحتمل أن يؤدي إلى تلقي أي عامل من مشغلي المشروع جرعات سنوية تزيد عن الحد الموصى به دولياً(1ميلي سيفرت).

2. أظهر تقدير الجرعات الإشعاعيّة والمخاطر الناجمة عن التشغيل الروتيني لمشروع معالجة المياه المرافقة بتقنية الأراضي الرطبة أنها صغيرة إلى حد ما ويمكن إهمالها. ولكن يمكن أن تزداد بازدياد تركيز الراديوم-226 في المياه المرافقة المستعملة في مشروع الأراضي الرطبة.

التمويل:

هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

المراجع :

1. المصري، م. س.؛ قجيجان، ب، 2020. دراسة الأخطار الإشعاعية الناجمة عن إنتاج الملح من المياه المرافقة للنفط ، هـ ط ذ س، و 1267.
2. المصري، م. س، 2006، تعيين الرواسب الحرشفية في الصناعة النفطية بتعيين المواد المشعة الطبيعية؛ هـ ط ذ س– و/ ت ن ب ع 357.
3. Norwegian Radiation Protection Authority (NRPA). 2004. Natural radioactivity in produced water from the Norwegian oil and gas industry in 2003. Report 005:2.
4. International Association of Oil & Gas Producers (IAOGP). September 2008, Guidelines for the management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) in the oil & gas industry , Report No. 412.
5. Othman, I, Al-Masri, M. S, Disposal Strategy for NORM Waste Generated by the Syrian Oil Industry, Paper presented at the International Symposium on the Disposal of Low Activity Waste, 13-17 December 2004, Cordoba.
6. Swann, C, Matthews, J, Ericksen, R., Kuszmaul, J, 2004, Evaluation of radionuclides of uranium, thorium and radium associated with produced fluids, precipitates and sludges from oil, gas and oilfields brine injections wells in Mississippi. US Department of Energy. DEFG26-02NT.
7. Ebenezer. T, Igunnu and George Z, and Chen, Produced water treatment technologies, International Journal of Low-Carbon Technologies 2012, 9, 157–177.
8. أكبر، م. عبد الصاحب، ا. العنزي، م.، 2014، معالجة مياه الصرف الصحي بتطبيق نظام التدفق السطحي FWS وباستخدام نبات القصب، مجلة أبحاث جامعة البصرة، العدد/40/، الجزءB3.
9. Working Document of the NPC North American Resource Development Study, Made Available September 15, 2011. Paper 2-17, Management of Produced Water From Oil and Gas Wells.
10. المصري، م. س؛ شويكاني. ر؛ جربي. ب؛ عواد. إ؛ 2006؛ مستويات التعرض الإشعاعي لغاز الرادون في بعض محطات الشركة السورية للغاز، هـ ط ذ س، و/ت د ع386.
11. المصري، م. س.؛ العطّار، ل.؛ بدير، ي.؛ الشيّاح، ع.، 2010.، إزالة نظائر الراديوم من المياه المرافقة للنفط باستعمال البنتونايت، هـ ط ذ س، و / ت ن ب ع 452.
12. Al Abdullah, J.; Al Masri, M. S.; Amin, Y.; Awad, I.; Sheaib, Z., 2016a, Chemical Fractionation of Radium-226 in NORM Contaminated Soil from Oilfields, Journal of Environmental Radioactivity, 165, 47-53.
13. Al Abdullah, J.; Al Masri, M. S.; Amin, Y., 2016b., Dissolution of [226-Ra]$BaSO_4$ and Partial Separation of ^{226}Ra from Radium/Barium Sulfate: A New Treatment Method for NORM Waste from Petroleum Industry, Applied Radiation and Isotopes, 107, 37738.
14. Alexandersen, D. K, 2018. Sustainable Produced Water Treatment using Constructed Wetlands for Tatweer Petroleum.BAUER Resources GmbH, Bahrain.

15. Tatweer Petroleum, 2018, Constructed Wetlands for Produced Water Treatment environmental and social impact assessment, 1B74301, Rev 00.
16. Alhajji E., Al-Masri M.S., Khalily H., Naoum B. E., Nashawati A. (2016). A Study on Sorption of ^{226}Ra on Different Clay Matrices, Bull Environ ContamToxico DOI 10.1007/s00128-016-1852-1. 97, 1.
17. Al-Masri M.S., Mukalallati H. Al-Hamwi A. (2014). Transfer factors of ^{226}Ra, ^{210}Pb and ^{210}Po from NORM contaminated oilfield soil to some Atriplex species, Alfalfa and Bermuda grass Radioprotection 49(1), 27-33.
18. Soudek P, E. Podracka M. Vagner, T. Vanek,l P. Petfik, R. Tykval(2004). ^{226}Ra uptake from soils into different plant species, Journal of Radio analytical and nuclear Chemistry, Vol. 6 , 87- 89.
19. Shweikani R, Giddui T.G, Durrani S.A.(1995). The effect of soil parameters on radon concentration values in the environment, Radiat. Meas. 25 (1-4), 481-584.