

تلوث المياه الجوفية بالمواد المشعة الطبيعية والطرق الآمنة للتخلص منها

عبدالله بن سليمان الحبيب ، قصي بن خلف الجاسم

معهد بحوث الطاقة الذرية، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، ص . ب 6086، الرياض 11442 المملكة العربية السعودية

خلاصة: تعتبر مصادر المياه في الوقت الحاضر من مقومات الشعوب الرئيسية والعنصر الأساسي لاحتياج الكائنات الحية، وتزداد أهمية هذا العنصر مع ندرة المياه في المنطقة، كما وتزداد ندرة المياه تعقيداً وخطورةً بوجود الملوثات الطبيعية والصناعية، كما هو الحال بالنسبة للمياه الجوفية في بعض المناطق القريبة من الخامات الطبيعية والتي تعاني من تلوث مياهها بالمواد المشعة الطبيعية كالراديوم واليورانيوم والثوريوم وبعض النويدات المشعة الطبيعية الأخرى. إن مصدر هذا التلوث غالباً ينتج عن غسل مياه الأمطار والمياه السطحية والجوفية لترسبات خامات اليورانيوم والصخور الحاملة له ناقلة بذلك المواد المشعة الطبيعية المختلفة بصورتها الذاتية إلى الطبقات الحاملة للمياه (المياه الجوفية). تعتبر المياه صالحة للشرب إذا حققت الشروط والمعايير المحلية والدولية ، وتنص لوائح ومواصفات هيئة المواصفات والمقاييس السعودية على وجوب توفر الخصائص الفيزيائية والكيميائية والإشعاعية والبيولوجية للمياه الصالحة للشرب وأن تكون ضمن الحدود المسموح بها. تناقش هذه الورقة نوعية النظائر المشعة التي يمكن أن تتواجد في المياه الجوفية وعن ومصادرها، ومدى تأثيرها على الصحة، كما تلقي الضوء على بعض طرق المعالجة الاقتصادية ذات الفعالية العالية لإزالة المواد المشعة الطبيعية من المياه الجوفية ضمن إطار التنظيمات الوطنية للتخلص الآمن من المواد المشعة الطبيعية.

الكلمات الدالة: التلوث الإشعاعي، مياه الشرب، المياه الجوفية، النظائر المشعة، التحليل الإشعاعي.

مقدمة

تعتبر مصادر المياه العذبة من أهم مقومات الحياة للأمم والشعوب وقيام الحضارات على مر العصور، ونظراً لزيادة التعداد السكاني على كوكبنا تزداد الحاجة للمياه، ولذلك تهتم الدول بتنمية مواردها من المياه العذبة وتحسين جودتها. وتمثل المياه الجوفية أهم مصادر المياه العذبة في الدول التي لا تتمتع بوجود أنهار بها مثل المملكة العربية السعودية ومعظم الدول العربية، حيث تكون جودة المياه الجوفية محل إهتمام كبير بسبب الإعتقاد عليها في الشرب والأغراض المنزلية الأخرى. لذلك يجب تقويم جودة المياه الجوفية قبل إستخدامها، لإمكان تقدير مدى الحاجة لعمليات المعالجة ونوعية المعالجات المطلوبة لكي تصبح المياه صالحة للإستخدام بأمان. وغالباً تهدف عمليات المعالجة في الدول النامية إلى إزالة العوالق وتخفيف عسر الماء والملوثات البكتريولوجية، ونادراً ما يعطى الإهتمام الكافي للملوثات الإشعاعية رغم إحتمال تواجدها بسبب إحتمال ملامسة تلك المياه لصخور قد تحتوي على مواد مشعة عالية السمية الإشعاعية، وهذه الظاهرة أكثر شيوعاً في المناطق التي تحتوي على صخور نارية [5-1] لكن هذا لا ينفي وجودها في مناطق ذات تراكيب جيولوجية أخرى [8-6]. تلقي هذه الورقة بعض الضوء على نوعية النظائر المشعة التي يمكن أن تتواجد في المياه الجوفية ومصادرها ومدى تأثيرها على الصحة العامة، كما تلقي الضوء على بعض طرق المعالجة لإزالة تلك

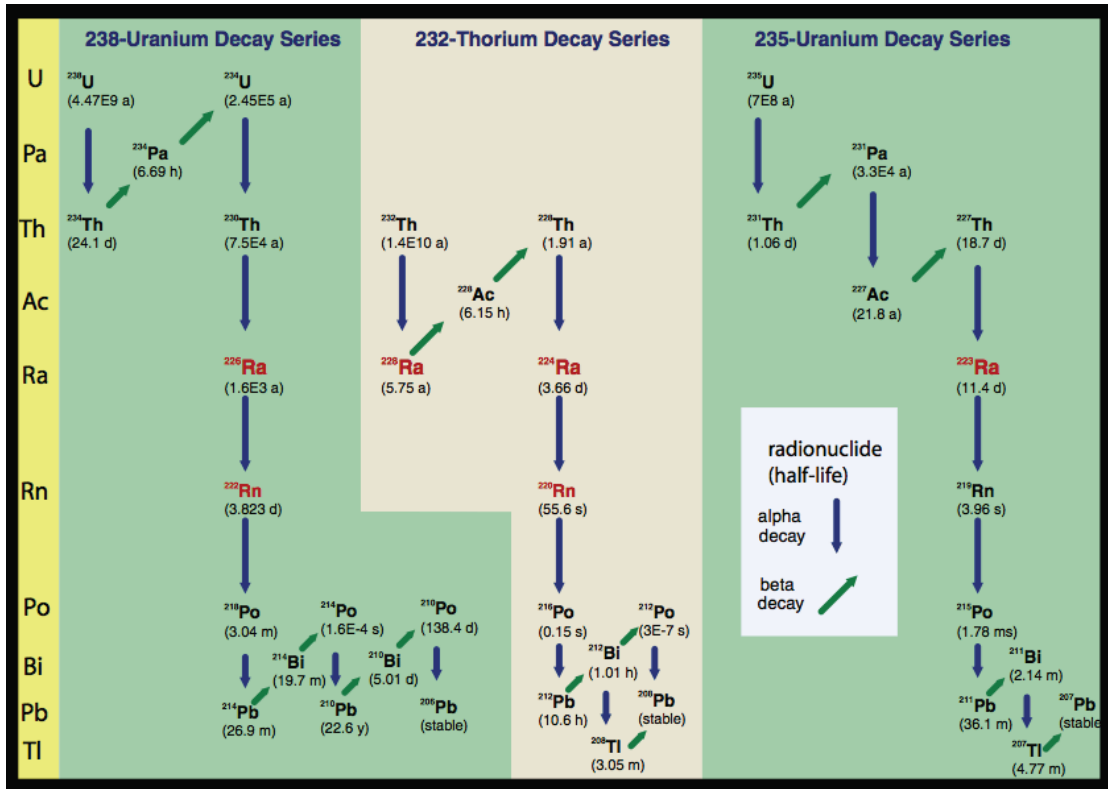
المواد السامة من المياه الجوفية، وعلى كيفية التعامل مع النفايات المشعة الناتجة عن أنشطة المعالجة في إطار التنظيمات الوطنية.

1- النظائر المشعة في الطبيعة

لإلقاء الضوء على كيفية تلوث المياه الجوفية بالمواد المشعة الطبيعية لابد من التعرف على النظائر المشعة الموجودة في الطبيعة والتي تعتبر مصدر التلوث. تتواجد النظائر المشعة الطبيعية في القشرة الأرضية منذ نشأة الأرض، وقد درس العلماء هذه الظاهرة منذ بداية القرن الماضي وقد توصلوا إلى حقيقة أن النظائر المشعة الطبيعية الموجودة في القشرة الأرضية تتولد من ثلاث نظائر مشعة أساسية طويلة عمر النصف، وهي:

- اليورانيوم-238 ذو فترة عمر النصف = $10 \times 4.5 = 45$ سنة.
- الثوريوم-232 ذو فترة عمر النصف = $10 \times 1.4 = 14$ سنة.
- اليورانيوم-235 ذو فترة عمر النصف = $10 \times 7 = 70$ سنة.

وعلى سبيل المثال تسمى النظائر المشعة المتولدة من اليورانيوم-238 بـ "أعضاء سلسلة تفكك اليورانيوم-238" وهكذا لبقية السلاسل، حيث أن كل من هذه النظائر المشعة يتفكك تلقائياً، بمعدل تفكك ثابت، متحولاً إلى نظير مشع لعنصر آخر، وهذا الأخير المشع كذلك، يتحول إلى نظير مشع لعنصر ثالث وهكذا..، مكوناً سلسلة من النظائر المشعة المتولدة، ينتهي بها المطاف لأحد النظائر الثابتة لعنصر الرصاص (شكل 1). يوضح شكل (1) النظائر المشعة التي تحتويها سلاسل تفكك اليورانيوم-238 والثوريوم-232 واليورانيوم-235 وفترة عمر النصف لكل منها. ويعتبر أعضاء تفكك السلسلتين الأولى والثانية هما المصدران الرئيسيان للنظائر المشعة الطبيعية في القشرة الأرضية أما أعضاء سلسلة تفكك اليورانيوم-235 فهي شحيحة جداً في القشرة الأرضية لدرجة يمكن تجاهلها.



شكل 1. سلاسل تفكك اليورانيوم-238 والثوريوم-232 واليورانيوم-235

كما هو واضح من سلاسل التفكك هناك تباين كبير في فترات عمر النصف للنظائر المشعة المختلفة. كما أن هذه النظائر تختلف من حيث طبيعة الإشعاع الصادر فمنها مشع لجسيمات ألفا أو جسيمات ألفا وفوتونات جاما، والبعض الآخر مشع لجسيمات بيتا أو جسيمات بيتا وفوتونات جاما.

2- مصادر تلوث المياه الجوفية بالنظائر المشعة الطبيعية

نتيجة احتواء مكونات القشرة الأرضية على تلك النظائر المشعة الطبيعية ضمن التراكيب الجيولوجية للصخور يمكن أن تتواجد هذه النظائر في المياه الجوفية نتيجة:

❖ ذوبان بعض النظائر المشعة الطبيعية عند ملامسة المياه الجوفية لصخور حاملة لها، حيث أن كل نظير يتصرف طبقاً لخواصه الكيميائية، فربما تكون الظروف صالحة لذوبان نظير دون الآخر، أو مجموعة من النظائر دون الأخرى، وبعد حدوث عملية الذوبان تتولد نظائر مشعة من النظائر المشعة الذائبة والتي لم تسمح لها الظروف بالذوبان من الصخور المحتوية عليها ولكنها وصلت للمياه نتيجة التفكك من النظائر التي قبلها في سلسلة تفككها.

❖ غسيل الأملاح والمواد المشعة من الصخور الحاملة لها بواسطة مياه الأمطار التي تغذي آبار المياه تحت سطحية.

أ- العوامل المؤثرة على ذوبان النظائر المشعة الطبيعية في المياه الجوفية: هناك عوامل كثيرة لها تأثير مباشر على عملية ذوبان المواد المشعة من الصخور الحاملة لها [9] إلى المياه الجوفية ومن أهمها:

- المحتوى الإشعاعي للصخور الحاملة لها.
- التراكيب الجيولوجية لتلك الصخور.
- نوعية النظائر والأملاح الذائبة في المياه الجوفية والطبيعة التأكسدية والاختزالية لتلك المياه.
- طبيعة الأحواض الحاملة للمياه الجوفية
- درجة حموضة تلك المياه.
- درجة حرارة تلك المياه.
- سرعة سريان تلك المياه.
- فترة ملامسة تلك المياه للصخور الحاملة للمواد المشعة.

ب- أهم الملوثات الطبيعية الإشعاعية التي يمكن أن تتواجد في المياه الجوفية: بالنظر إلى نظائر سلسلتي تفكك اليورانيوم-238 والثوريوم-232 (شكل 1) فإن النظائر المسببة للتلوث والمثيرة للاهتمام هي النظائر ذات العمر النصف الطويل، حيث تتواجد عند ذوبانها في المياه بصورة دائمة مسببة مخاطر على الصحة العامة. من أهم هذه النظائر:

- اليورانيوم-238 واليورانيوم-234 والراديوم-226 والرصاص-210 والبولونيوم-210 بالإضافة إلى الرادون-222 الذي يعتبر أهم النظائر المسببة لجرعات تعرض إشعاعي لمستخدمي المياه الملوثة رغم قصر فترة عمر النصف له (3.825 يوم)، ويعزى ذلك لحالته الفيزيائية، فهو من الغازات الحاملة التي تتسرب بسهولة من خلال مسام الصخور لتصل للمياه الجوفية ومنها للإنسان عن طريق الشرب والاستخدامات المنزلية الأخرى، ثم يتسرب للهواء داخل المنزل عند استخدام مياه الصنبور الملوثة مسبباً تعرض إشعاعي آخر للرنين نتيجة إستنشاق الهواء الحامل للغاز. كذلك هناك نظير الثوريوم-230 (75 ألف سنة) وهذا النظير ليس له أهمية كبيرة رغم سميته الإشعاعية العالية وطول فترة عمر النصف له وهذا يرجع لطبيعة أيون الثوريوم (Th^{4+}) في المياه الذي يحمل شحنة موجبة كبيرة تجعل له قابلية إدمصاص عالية على أسطح الصخور الملامسة للمياه تاركاً المياه مرة أخرى [9]، ولذلك يندر وجوده بتركيز عالية في المياه الجوفية. تجدر الإشارة إلى أن الراديوم-226 يعتبر أعلى النظائر المشعة سمية في المياه الجوفية. مع العلم بأن جميع النظائر سالفة الذكر تتبع سلسلة تفكك اليورانيوم-238.

○ أما أهم نظائر سلسلة تفكك الثوريوم-232 كملوث للمياه الجوفية هو نظير الراديوم-228 الذي له فترة عمر النصف مقدارها (5.7 سنة) وله درجة سمية إشعاعية عالية وأملاحه جيدة الذوبان في المياه ويستطيع أن ينتقل لمسافات طويلة في المياه الجوفية، مثله مثل أملاح الراديوم-226 من سلسلة تفكك اليورانيوم-238، أما النظير الأم (الثوريوم-232) فنادرًا تواجد بتركيز عالية في المياه الجوفية كذلك مثل الثوريوم-230 (كما ذكر سابقاً) بسبب طبيعته الكيميائية، فهما نظيران لعنصر واحد بخواص كيميائية واحدة.

3. التشريعات الوطنية للحد من تأثير تلوث المياه الجوفية بالنظائر المشعة على الصحة العامة

تختلف درجة سمية النظائر المشعة باختلاف الإشعاعات الصادرة عنها، واختلاف طاقات تلك الإشعاعات، كما أن اختلاف الخواص الكيميائية لتلك النظائر تتسبب في اختلاف مساراتها في البيئة وكذلك داخل جسم الإنسان عند ابتلاعها مع مياه الشرب، كذلك تتأثر أعضاء الكائنات الحية بدرجات متفاوتة عند التعرض الإشعاعي لنفس التركيز من النظائر المختلفة، وبناءً على هذه الحقائق فقد اقترح العلماء المتخصصين في مجال الحماية الإشعاعية بعض القيم لتراكيز النظائر المشعة المختلفة كحدود قصوى يجب أن لا تتعداها في مياه الشرب. جدول رقم (1) يوضح النظائر المشعة محل الإهتمام ونوعية الإشعاعات الصادرة عنها والأعضاء التي تتأثر بها عند دخولها لجسم الإنسان أثناء الشرب والحدود الوطنية التي شرعت لكل منها بواسطة الهيئة السعودية للمواصفات والمقاييس والجودة [10] للتحكم في جودة مياه الشرب من الناحية الإشعاعية.

جدول 1. النظائر المشعة الهامة والحدود الوطنية القصوى التي شرعت لكل منها

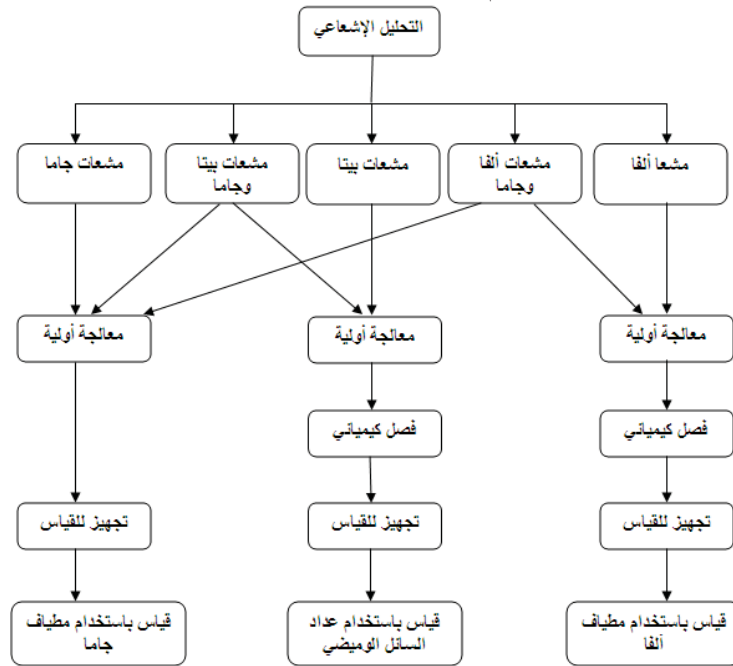
| النظير المشع | فترة عمر النصف | نوع الإشعاع الصادر عنه | العضو المتأثر | الضرر المتوقع | الحدود الوطنية القصوى |
|----------------|----------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------------------------|
| اليورانيوم-238 | 4,5 مليار سنة | جسيمات ألفا | الكليتين | فشل كلوي | 30 ميكروجرام/لتر |
| الراديوم-226 | 1622 سنة | جسيمات ألفا وأشعة جاما | العظام | سرطان العظام | 0,11 بكريل/لتر |
| الراديوم-228 | 5.7 سنة | جسيمات بيتا | العظام | سرطان العظام | (مع الراديوم-226) 0,185 بكريل/لتر |
| الرادون-222 | 3.83 يوم | جسيمات ألفا | الرئتين | سرطان الرئة | 11,11 بكريل/لتر |
| الرصاص-210 | 22.3 سنة | جسيمات بيتا وأشعة جاما | العظام | سرطان العظام | -- |
| البولونيوم-210 | 138 يوم | جسيمات ألفا | الدم | سرطان الدم | -- |

ويجب التذكير هنا أن الحد الأقصى الذي شرع لليورانيوم-238 يعبر عنه بالميكروجرام/لتر كوحدة تركيز كتلية (وليس بالبريل كوحدة تركيز إشعاعية) كما هو موضح في جدول (1) لأن السمية الكيميائية لليورانيوم أعلى من سميتها الإشعاعية. كذلك يجب أن نذكر أن الرصاص-210 والبولونيوم-210 لم تشرع لهما حدود وطنية في مياه الشرب (كما هو واضح في جدول 1) رغم احتمال تواجدهما في المياه الجوفية وسميتهما العالية، ويرجع ذلك لأن المياه التي تحتوي على تراكيز من هذين النظيرين بدرجة تهدد الصحة العامة لا بد أن تحتوي على تراكيز أعلى من الراديوم-226 أو الرادون-222 أو كلاهما بتراكيز تفوق الحدود الوطنية مما يستدعي التدخل للمعالجة بدون الحاجة لتحليل الرصاص-210 أو البولونيوم-210.

- 3- تقييم جودة مياه الشرب:** يتم تقييم نوعية وجودة مياه الشرب من خلال اللون والطعم والرائحة، لكن هذا لا يكفي كدلالة على صلاحية المياه إذ أن بعض الملوثات المختلفة لا تترك أثر محسوس على نوعية المياه الأمر الذي قد يشكل خطورة على صحة الإنسان وسلامته، لذا لا بد من إيجاد طرق تحليلية متقدمة يتم من خلالها التقييم بصورة أشمل بإجراء تحاليل مخبرية بأجهزة عالية الجودة على المياه، ولمراقبة جودة المياه من النواحي الإشعاعية يجب أن يتوفر التالي:
- ❖ المختبرات المتخصصة في مجال التحليل الإشعاعي والمجهزة بالتجهيزات المناسبة.
 - ❖ توطيق طرق القياس ذات الحساسية العالية
 - ❖ توافر الكوادر الفنية الماهرة المتخصصة لإدارة تلك المختبرات، لتستطيع الكشف عن المستويات الإشعاعية المنخفضة بدقة عالية.
 - ❖ تطوير طرق القياس المستخدمة

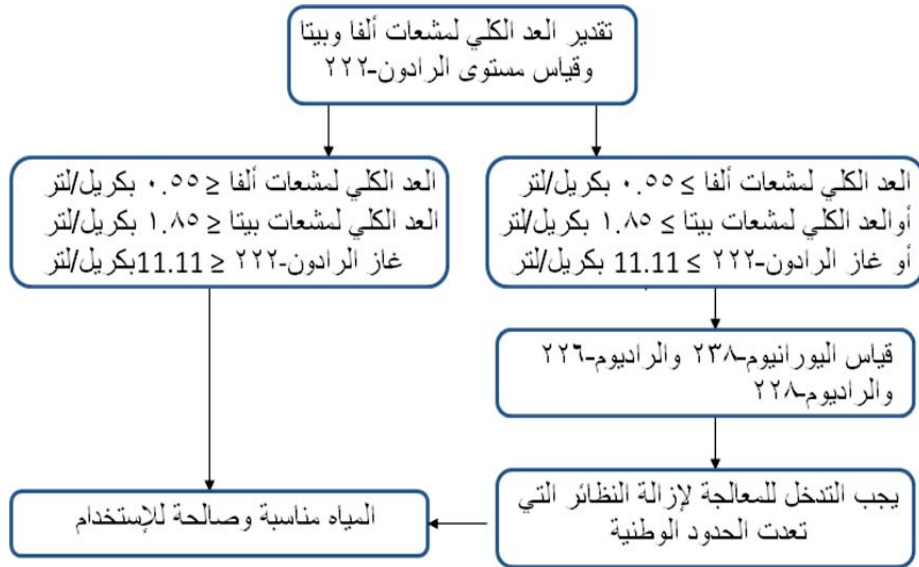
الجدير بالذكر أنه توجد في المملكة العربية السعودية مختبرات متخصصة تتمتع بخبرات عالية في كل من مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية ممثلة بمعهد بحوث الطاقة الذرية وكذلك في بعض الجامعات، حيث يتم التعرف على نوعية هذه النظائر وكمياتها من خصائص الإشعاعات الصادرة عنها ومعدل صدور تلك الإشعاعات. لقد استطاع العلماء

المتخصصون تحديد أنواع وطاقت الإشعاعات الصادرة من جميع النظائر المشعة المختلفة وترتيبها في جداول لتكون دليلاً للمتخصصين في مجال التحليل الإشعاعي للتعرف على أي نظير مشع موجود في المياه، فبتحديد نوع الإشعاع وقياس طاقته يمكن الإستعانة بالجدول في تحديد النظير ، وقياس معدل تفككه أو معدل صدور الإشعاع منه يمكن تعيين تركيزه. وتقدر طاقة الإشعاع بالإلكترون فولت كوحدة طاقة ، ونقاس تراكيز النظائر المشعة بوحدة تسمى "البكريل" (حيث أن البكريل عبارة عن تفكك واحد في الثانية) أو "الكوري" (الكوري يساوي 10×3.7 بكريل). تختلف طرق التحليل من نظير إلى آخر لإختلاف خواصها الكيميائية والإشعاعية. كما تحتاج العينات لمعالجة كيميائية في بعض طرق التحليل لتصبح جاهزة للقياس. يستخدم كل من مطياف ألفا لقياس مشعات ألفا ومطياف جاما لقياس مشعات جاما وعداد السائل الومبضي لقياس مشعات بيتا وبعض مشعات ألفا بعد تجهيزها بالطرق المناسبة. شكل (2) يلخص خطوات أساليب التحاليل الإشعاعية المختلفة لتقويم جودة المياه من الناحية الإشعاعية.



شكل 2. تمثيل شجري يوضح طرق التحاليل الإشعاعية للكشف عن محتوى المياه من النظائر المشعة الطبيعية

تستخدم طرق التحليل لمراقبة الجودة الإشعاعية لمياه الآبار سواء كانت آبار قائمة أو جديدة، حيث يجب فحص مياه تلك الآبار قبل الاستخدام ثم اتخاذ القرار بشأنها ، يبدأ الفحص بفرز أولي وهو قياس التركيز الكلي (العد الكلي) لمشعات ألفا وبيتا [11,12] باستخدام عداد السائل الومبضي، وكذلك قياس مستوى غاز الرادون باستخدام نفس الجهاز [1] ، ومن نتائج تلك القياسات يمكن تحديد الخطوات التالية طبقاً للتمثيل الشجري الموضح في شكل (3).



شكل 3. تمثيل شجري يوضح كيفية إتخاذ القرار بشأن التعامل مع الملوثات الإشعاعية بعد إجراء التحاليل المناسبة.

4- طرق المعالجة: في حالة تجاوز المياه الحدود الوطنية القصوى المحددة بالموصفات والمعايير الفيزيائية والكيميائية

والبيولوجية والإشعاعية فإنها تصبح ملوثة ويجب معالجتها وذلك لاختلال شرط مطابقتها بالموصفات الوطنية، تتكون نظم

معالجة المياه من أربعة أجزاء رئيسية هي كما يلي:

المعالجة الأولية: والتي غالباً ما يستخدم الترشيح في هذه العملية عن طريق امرار المياه من خلال وسط مسامي. وللمرشحات أنواع كثيرة منها:

- المرشحات الرملية.
- المرشحات المصنعة من المواد البوليمرية .
- الفحم النشط.
- ثاني أكسيد التيتانيوم.
- الأغشية الميكرومترية MF
- الأغشية تحت الميكرومترية UF

المعالجات الأساسية: باستخدام الطرق المختلفة مثل :

- ❖ طرق التخرثر أو الترسيب
- ❖ طرق التقطير وللتقطير طرق كثيرة منها :
 - التقطير العادي.
 - التقطير الومضي متعدد المراحل.
 - التقطير بمتعدد المراحل (متعدد التأثير).
 - التقطير باستخدام الطاقة الشمسية.
 - التقطير بطريقة البخار المضغوط.

❖ طرق التيسير

- ❖ تقنيات الحواجز النفاذة النشطة
- ❖ طرق استخدام المبادلات الأيونية
- ❖ تقنية التحلية بالتحلل الكهربائي EDR
- ❖ تحلية المياه بطريقة التجميد
- ❖ المعالجة الحيوية للمياه الملوثة بالمواد المشعة
- ❖ استخدام الأغشية التناضحية:
 - أغشية التناضح العكسي الاسموزي RO
 - الاغشية النانومترية NF

تجدر الإشارة إلى أنه ليس هناك طريقة تكون صالحة تحت جميع الظروف لمعالجة المياه بل أن كل طريقة من هذه الطرق لها مميزاتها وعيوبها، مما يجعلها الأنسب تحت ظروف معينة وغير مناسبة تحت ظروف أخرى، لذلك يتوقف قرار إختيار طريقة المعالجة على عوامل كثيرة مثل :

- نوع النظائر المشعة الموجودة
- مستوياتها ودرجة ملوحة المياه
- محتواها من العوالق
- أنواع الأملاح الذائبة
- معدل إستهلاك المياه المعالجة...إلخ.

ولحسن الحظ فإن معظم عمليات معالجة المياه التي تهدف لتخفيف عسر الماء لها تأثير إيجابي على إزالة المواد المشعة. **المعالجة اللاحقة:** تعتبر هذه المرحلة من المراحل النهائية لمعالجة المياه حيث يتم فيها إضافة بعض المواد المهمة، على سبيل المثال تضاف الصودا لضبط الرقم الهيدروجيني إلى 7.5، وكذلك يضاف الكلور لغرض تعقيم المياه المنتجة وهكذا.

وحدة تركيز النفايات: نتيجة أنشطة معالجة المياه الجوفية لإزالة المواد المشعة تتراكم كميات من النفايات التي تحتوي على مستويات إشعاعية لا يمكن تجاهلها في محيط محطة المعالجة، وتكون مصدراً خطراً للعاملين والبيئة المحيطة بالمحطة، وقد تحتاج تلك النفايات للمعالجة قبل التحفظ عليها بطريقة نظامية لتكون آمنة للعاملين والجمهور والبيئة. علماً بأن مصادر هذه النفايات في محطات تنقية المياه المختلفة متولدة من :

- تركز هذه الملوثات المشعة مع العوالق على المرشحات الرملية.
- رواسب وأحوال التهوية.
- الأملاح الناتجة عن إزالة عسر الماء.
- أملاح مياه الرجيع.
- محاليل تنشيط المبادلات الأيونية.

هناك نفايات يمكن أن تخضع للمعالجات الكيميائية بهدف تقليل حجمها حتى لا تشغل حيزاً كبيراً قبل التحفظ عليها في مكان آمن تم إعداده بطريقة خاصة تحت إشراف متخصصين ليناسب المهمة، وهناك نفايات أخرى يتم التحفظ عليها مباشرة كما هي، إما بسبب ارتفاع تكلفة معالجتها أو عدم مناسبتها للمعالجة الكيميائية.

6. شكر

يشكر الباحثون مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية على الدعم المالي لهذا المشروع.

7. المراجع

- 1- Schonhofer, F. 1992. "Measurement of ^{226}Ra in water and ^{222}Rn in water and air by Liquid Scintillation counting", Radiat. Protec. Dosimetry, 45: 123-125.
- 2- Andrew, J.N. D.J. Ford, N. Hussain, D. Trivedi, M.J. Youngman, 1989. "Natural radioelement solution by circulating groundwater in Stripa granite" Geochimica et Cosmochimica Acta, 53: 1791-1802.
- 3- Lucas, F.O. F.B. Ribeiro, 2006. "Radium content in ground water from a granitic Batholith of the metamorphic basement, eastern Sao Paulo State, Brazil", Appl. Radiat. Isot., 64: 735-749.
- 4- Baeza, A. L.M. Del Rio, A. Jimenez, C. Miro, J.M. Paniagua, 1995. "Factors determining the radioactivity levels of waters in the province of Caceres (Spain)", Appl. Radiat. Isot., 46: 1053-1059.
- 5- Salonen, L. 1994. " ^{238}U series radionuclides as a source of interested radioactivity in ground water originating from Finnish bedrock", Future Groundwater Resources at Risk: Proc. of the Helsinki Conference, June 1994. IAHS Publ. no. 222, 1994.
- 6- Harris, S. A. E.R. Billmeyer, M.A. Robinson, 2006. "Evaluation of repeated measurements of radon-222 concentrations in well water sampled from bedrock aquifers of the Piedmont near Richmond, Virginia, USA: Effect of lithology and well characteristics", Environ. Research, 101: 323-333.
- 7- K. Skeppstrom and B. Olofsson, "Uranium and radon in groundwater; An overview of the problem", EWRA, European Water 17/18: 51-62, 2007, 2007 E.W. Publication.
- 8- P. Pacherova, J. Vlcek, I. Fojtikova and I. Barnet, "The relationship of the radon concentrations in waters and the geological bedrock", Extended Abstracts of ICGG8 (2005) 47-48 © Copernicus GmbH 2005.
- 9- Shabana, E.I. A.S. Al-Hobaib, "Activity concentration of natural radium, thorium and uranium isotopes in ground water of two different regions", Radiochim. Acta, 87 (1999) 41-45.
- 10- Saudi Arabia Standards Organization (SASO), Saudi Standards No. 409, SSA-409, 1984.
- 11- Salonen, L. Proceeding of 2nd Intern. Conf. on Anal. Chem. on Nucl. Technology; Karlsruhe, 1989.
- 12- Sanchez-Cabeza, J.A. in: Liquid Scintillation Spectrometry 1992, ed. J.E. Noakes, F. Schonhofer and H.A. Polach, Radiocarbon, 1993, pp. 43-50.