القرار IG.22/9

المبادئ التوجيهية لأفضل الممارسات البيئية (BEP) المتعلقة بالإدارة السليمة بيئيًا (ESM) للمواقع الملوثة بالزئبق

إنّ الاجتماع التاسع عشر للأطراف المتعاقدة في اتفاقية حماية البيئة البحرية والمناطق الساحلية للبحر الأبيض المتوسط، المُشَار إليها فيما يلي باسم اتفاقية برشلونة،

مع التذكير بالمواد 4، و5، و15 من بروتوكول حماية البحر الأبيض المتوسط من التلوث من مصادر وأنشطة برية، تلك المواد التي تنص على التزامات مُلزِمة قانونيًا باتخاذ التدابير الضرورية لإزالة التلوث الناجم عن مصادر برية والتخلص منه تدريجيًا،

و مع التذكير أيضًا بالتزامات الخطة الإقليمية للحدِّ من مدخلات الزئبق والتي اعتُمِدَت في القرار 20/8.1 الصادر عن الجلسة السابعة عشرة لمؤتمر الأطراف (في باريس، فرنسا، شباط/فبراير 2012)، التي تنص على برامج تدابير وجداول زمنية؛ لمنع الآثار الضارة للزئبق والحدِّ من تلك الآثار على صحة الإنسان والبيئة البحرية والساحلية في منطقة البحر الأبيض المتوسط، والمُشَار إليها فيما يلي بالخطة الإقليمية،

واستنادًا إلى المادة 4، الفقرة 5 من الخطة الإقليمية التي تنص على موافقة الأطراف المتعاقدة في المبادئ التوجيهية على أفضل الممارسات البيئية والإدارة السليمة بيئيًا للمواقع الملوثة بالزئبق،

ومع الأخذ في الاعتبار مفعول اتفاقية ميناماتا بشأن الزئبق وبالأخص فيما يتعلق بأفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية،

وبعد النظر في تقرير اجتماع مراكز التنسيق في برنامج مِدْبول (MED POL) الذي عُقِدَ في مالتا في حزيران/يونيو 2015،

1. يعتمد المبادئ التوجيهية لأفضل الممارسات البيئية لإدارة المواقع الملوثة بالزئبق، والمُشَار إليها فيما يلي بالمبادئ التوجيهية، والواردة في المرفق بهذا القرار،

2. يحث الأطراف المتعاقدة على اتخاذ التدابير اللازمة؛ لضمان تماشي الإدارة السليمة بيئيًا للمواقع الملوثة بالزئبق، والتي تتضمَّن على الأقل المناجم القديمة ومصانع الكلور والقلويات التي تم إيقاف تشغيلها، مع المبادئ التوجيهية،

3. يحث الأطراف المتعاقدة على رفع تقرير عن تنفيذ الخطة الإقليمية، بما في ذلك التدابير المتعلقة بالمبادئ التوجيهية، بنهاية عام 2016؛ كي يراجعها المجتمعون في الجلسة العشرين لمؤتمر الأطراف وفق المنصوص عليه في المادة 6 من الخطة الإقليمية،

4. يشجع كل الأطراف المتعاقدة على التصديق على اتفاقية ميناماتا بشأن الزئبق لمزيدٍ من التدليل على التزام منطقة البحر الأبيض المتوسط بمنع مدخلات ونفايات الزئبق والحدِّ والتخلص منها وإدارتها بطريقة سليمة بيئيًا،

5. يكلّف الأمانة (برنامج مِدْبول (MED POL) ومركز الأنشطة الإقليمي للإنتاج والاستهلاك المُستَدامين (SCP/RAC))، تيسير عمل الأطراف المتعاقدة بخصوص تنفيذ المبادئ التوجيهية، وذلك ببذل الجهود اللازمة لتحقيق التآزر مع الأعمال ذات الصلة في إطار اتفاقية ميناماتا بشأن الزئبق، والتعاون مع مبادرة أفق 2020 التي طرحها الاتحاد من أجل المتوسط (UfM).

المرفق
المبادئ التوجيهية لأفضل الممارسات البيئية (BEP)
المتعلقة بالإدارة السليمة بيئيًا (ESM) للمواقع الملوثة بالزئبق

جدول المحتويات

المبادئ التوجيهية لأفضل الممارسات البيئية (BEP) 445

المتعلقة بالإدارة السليمة بيئيًا (ESM) للمواقع الملوثة بالزئبق 445

المرفق 446

المبادئ التوجيهية لأفضل الممارسات البيئية (BEP) 446

1- مقدمة 448

2- التشريع الدولي 448

3- تحديد المواقع الملوثة بالزئبق 451

4- تحديد الآثار البيئية 454

5- توصيف الخصائص البيئية للمواقع الملوثة بالزئبق 454

6- تحضير العينة والإجراءات التحليلية 461

7- تقييم المخاطر 463

8- معالجة المواقع الملوثة بالزئبق 466

الملحق الأول: دراسات الحالة 481

دراسة الحالة 4: تثبيت التربة الملوثة بمعادن ثقيلة باستخدام أكسيد مغنيسيوم منخفض المرتبة الحرارية 509

1- مقدمة

1- بشكلٍ عام، الموقع الملوث هو مكان تتراكم به مواد أو مخلفات ملوثة من شأنها التأثير على التربة، والمياه الجوفية، والرواسب، وفي حالة الزئبق، يكون التأثير حتى على الهواء إلى مستويات تُشكِّل خطرًا على البيئة أو صحة الإنسان أو تتجاوز الحدود الآمنة الموصى بها لاستخدامات معينة.

2- الزئبق المعدني يكون سائلاً في درجة حرارة الغرفة، وهو المعدن الوحيد الذي له هذه الخاصية، كما أنه يتبخر في درجة حرارة الغرفة. والزئبق هو أحد المواد السامة الأكثر إشكالية التي يمكن العثور عليها في المواقع الملوثة: فالزئبق له خصائص فيزيائية وكيميائية خاصة تفرض تحديًا أمام إدارة المواقع الملوثة بالزئبق، وبالأخص عندما يتعلق الأمر بمعالجة المواقع الصناعية الكبيرة ومواقع مناجم الزئبق. وحالما يدخل الزئبق في البيئة، وبسبب خواصه، يبقى بها متخذًا أشكالاً فيزيائية وكيميائية مختلفة تصل إلى جميع الأجزاء البيئية إلى حدٍ ما: الهواء، والتربة، والمياه، والرواسب وحتى البنايات المستخدمة للنشاط.

3- يمكن أن يتحول الزئبق غير العضوي بواسطة البكتيريا إلى ميثيل الزئبق في الرواسب والتربة، وذلك بمعدل يعتمد على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للتربة. وميثيل الزئبق (CH3Hg+) هو شكل متوفر بيولوجيًا وعالي السُّمِّية من أشكال الزئبق العضوي الذي يتراكم على امتداد السلسلة الغذائية. لقد كان استهلاك السمك والمحار الذي تسمم نتيجة قيام أحد مصانع المواد الكيميائية في خليج مينماتا (في اليابان) بالإلقاء المباشر لميثيل الزئبق في مياه الصرف خلال عدة عقود، هو السبب في واحدة من أسوأ كوارث التلوث الكيميائي في القرن الماضي.

4- الأشكال الرئيسية الثلاثة (الانتواع) التي يمكن أن تُوجد في البيئة هي:

- الزئبق المعدني (Hg°)، في حالة اتزان بين السائل والغاز حسب درجة الحرارة.
- الزئبق غير العضوي (Hg^{2+}، HgO، $HgCl_2$، HgCl…) [1]
- الزئبق العضوي (CH_3-Hg-CH_3، CH_3-Hg-NH_2، CH_3-Hg-SH…)

5- لقد سُجِّل في التاريخ تسبُّب العديد من الأنشطة في تلوث عدة مواقع بالزئبق بشكلٍ عام ونتيجة للافتقار إلى القواعد البيئية، واستخدام التكنولوجيات المسببة للتلوث واتِّباع ممارسات سيئة لإدارة النفايات. وتشتمل هذه الأنشطة بصورة رئيسية على: عمليات استخراج الزئبق من المناجم والمحاجر2، وصناعة الكلور والقلويات، ومحطات توليد الطاقة التي تعمل بالفحم، وصناعة الأسمنت، وإنتاج الحديد الخام، والصلب والفلزات غير الحديدية، وقطاع النفايات، وإنتاج المواد الكيميائية، والأسمدة الكيميائية، والمستحضرات الصيدلانية والمحفزات، والبطاريات والمصابيح الفلورية.

6- يتمثل أهم مصدر حاليًا لانبعاث الزئبق بمنطقة البحر الأبيض المتوسط، في محطات توليد الطاقة التي تعمل بالفحم3.

7- معالجة الموقع الملوث هو إجراء تصحيحي؛ للتخفيف من التلوث أو التخلص منه. وتتمثل الخطوة الأولى باتجاه تحقيق هذه المعالجة في إجراء دراسة شاملة لمصدر التلوث ومداه ونوعه وكمية التلوث الموجودة. وحالما تتحدد هذه البارامترات، ننتقل إلى الخطوة التالية وهي تحديد كيفية تأثر البيئة وصحة الإنسان بالتلوث وإلى أي مدى. وأخيرًا، وبعد التحقق من الجوانب التي سبق ذكرها، ينبغي أن يتم اقتراح وإقرار تدابير تصحيحية لمعالجة الأضرار البيئية بأمان والحدِّ أو التخلص من مخاطر التلوث التي تهدد الاتجاهات البيئية وصحة الإنسان.

2- التشريع الدولي

2-1 اتفاقية مينماتا بشأن الزئبق[4]

---

[1] يمكن أن يُغيِّر الزئبق من حالته الكيميائية بسهولة في البيئة؛ بسبب الجهد القياسي المنخفض للزئبق $Hg^{\circ}/Hg2+$، مما يتسبب في حدوث تغييرات جذرية في تحركيته وسُمِّيته.

[2] الشكل الخام الأكثر شيوعًا للزئبق هو الزنجفر (HgS). ولقد كان يُستخدم في منطقة البحر الأبيض المتوسط وبالتحديد في إسبانيا وكذلك في الجزائر، وسلوفينيا، وتركيا، وإيطاليا.

[3] "تشخيص الزئبق في بلدان البحر الأبيض المتوسط". CP/RAC, 2010.

[4] فُتِح باب التوقيع عليها في عام 2013، وتدخل حيز التنفيذ في 2018

8- تنص اتفاقية ميناماتا بشأن الزئبق على مراقبة استخدام الزئبق وخفض نسبته عبر مجموعة من المنتجات، والعمليات والصناعات التي يُستخدم فيها، أو يُطلق منها أو ينبعث منها.

9- فيما يتعلق بالمواقع الملوثة، ينبغي أن تقر الاتفاقية العالمية بشأن الزئبق توجيهًا حول إدارة المواقع الملوثة، ولكن دون أن تفرض التزامًا بمعالجة المواقع الملوثة.

10- نشجع الأطراف على التعاون في صياغة الاستراتيجيات وتنفيذ الأنشطة لتحديد التدابير اللازمة، وتصنيف المواقع الملوثة حسب الأولويات، وإدارتها ومعالجتها، حسبما هو مناسب.

2-2 اتفاقية حماية البيئة البحرية والمناطق الساحلية للبحر الأبيض المتوسط (اتفاقية برشلونة)

2-2-1 **التدابير الشائعة**، التي تم إقرارها في مؤتمر الأطراف الخامس (1987) لاتفاقية برشلونة.

- أقصى تركيز للزئبق في النفايات السائلة قبل التخفيف في البحر الأبيض المتوسط هو 50 ميكروغرام/لتر.
- ينبغي تصميم وبناء المنافذ الجديدة للنفايات السائلة المحتوية على الزئبق في البحر الأبيض المتوسط، بحيث تمنع أي زيادة في تركيز الزئبق في الكائنات الحية والرواسب أعلى من 50٪ من مستوى التركيز في مساحة نصف قُطرها 5 كم من نقطة التفريغ.

2-2-2 الخطة الإقليمية للحدِّ من مدخلات الزئبق (2012).

11- في إطار تنفيذ المادة 15 من بروتوكول المصادر البرية للتلوث، أقرت خطة عمل البحر الأبيض المتوسط (MAP) من اتفاقية برشلونة عام 2012، نصًّا مُلزمًا قانونيًا للحدِّ من التلوث بالزئبق، حيث بموجبه للأطراف وضع حدود للانبعاثات (القيمة الحدية للانبعاث) لمختلف القطاعات الصناعية، وذلك ضمن تدابير أخرى.

12- **تتعين إحالة أي قائمة جرد بمواقع ملوثة** - بما في ذلك مناجم الزئبق ومصانع الكلور والقلويات التي تستخدم أو استخدمت في الماضي خلايا زئبقية، إلى أمانة اتفاقية برشلونة. كما يتعين أيضًا على البلدان **تحديد التدابير المناسبة لهذه المواقع** ووضع تصور لها.

3-2 تشريع الاتحاد الأوروبي

2-3-1 <u>المياه السطحية والمياه الجوفية</u>

2-1-3-1 **توجيه المجلس 98/83/CE** بتاريخ 3 تشرين الثاني/نوفمبر 1998، بشأن جودة المياه المخصصة للاستهلاك البشري. يُعيَّن حدًّا للزئبق 1 ميكروغرام لكل لتر.

2-1-3-2 **التوجيه 2006/118/EC** بتاريخ 12 كانون الأول/ديسمبر 2006، بشأن حماية المياه الجوفية من التلوث والفساد.

- يحدد معايير تقييم الحالة الكيميائية الجيدة للمياه الجوفية.
- تُعيَّن قِيَم الحد الأقصى والبارامترات التحليلية.
- الزئبق مشمول في قائمة الحد الأدنى للملوثات أو مجموعات الملوثات ومؤشرات التلوث التي ينبغي أن تضعها الدول الأعضاء.

2-3-2 التربة

1-2-3-2 **توجيه المجلس 86/278/EEC** بتاريخ 12 حزيران/يونيو 1986 بشأن حماية البيئة، وبالأخص بيئة التربة عند استخدام حمأة مياه المجارير في الزراعة.

2-2-3-2 **توجيه المجلس 91/156/EEC** بتاريخ 18 آذار/مارس 1991 ينص على التزام بوضع قوائم جرد للمواقع الملوثة.

3-2-3-2 الاستراتيجية المواضيعية لحماية التربة، الاتصالات **COM[2006]231-final**، تتضمن مفاهيمَ مثل:

- إنشاء إطار قانوني لحماية التربة واستخدامها بطريقة مستدامة،
- دمج سياسات الحماية،
- تحديد المناطق المُعرَّضة للخطر
- قائمة جرد بالأراضي والمنشآت الملوثة
- إصلاح التربة المتدهورة.

4-2-3-2 تم توضيح تنفيذ الاستراتيجية والأنشطة المستمرة منذ عام 2006 في الوثيقة **COM (2012) 46 final**.

5-2-3-2 **التوجيه 2010/75/EU** بشأن الانبعاثات الصناعية (IPPC). سيتعين على الأنشطة الصناعية التي تتعامل مع مواد خطرة تقديم تقرير أساسي يحدد حالة التربة والمياه الجوفية قبل بدء الأنشطة وبعد توقفها.

6-2-3-2 **التوجيه 99/31** بشأن مطمر النفايات. يتحمل المشغل المسؤولية عن الصيانة، والرصد والمراقبة في مرحلة العناية اللاحقة طوال الفترة التي تطلبها السلطة المختصة، مع الوضع في الاعتبار الفترة الزمنية التي يمكن أن ينطوي المطمر خلالها على مخاطر. وفي بعض البلدان لا تقل هذه الفترة عن 30 عامًا.

3-3-2 كل الوسائط

1-3-3-2 **النظام EC no.166/2006**، بشأن وضع السجل الأوروبي لإطلاق الملوثات ونقلها (E-PRTR) الموضوع باعتباره أمرًا إلزاميًا للإعلام بأي انبعاثات تتجاوز الحدود المعينة في الهواء والماء والتربة.

4-3-2 الصحة والسلامة في العمل

1-4-3-2 **توجيه اللجنة 2009/161/EU** الذي يضع قائمة بالقِيَم الإرشادية لحد التعرض المهني.

5-3-2 نقل النفايات الخطرة

1-5-3-2 **الاتفاق الأوروبي** المتعلق بالنقل الدولي للبضائع الخطرة بالطرق البرية (ADR)

2-5-3-2 **النظام EC 1013/2006** بشأن عمليات شحن النفايات حيث يحدد إجراءات مراقبة شحنات النفايات؛ لتحسين حماية البيئة.

3-5-3-2 **التوجيه 2008/98** بشأن النفايات (توجيه إطاري)، يتضمن شروط نقل النفايات، بما في ذلك الحد الأدنى لمعايير متعهدي النقل.

3- تحديد المواقع الملوثة بالزئبق

13- تتمثل الخطوة الأولى في عمل تعداد للمواقع الصناعية الحالية والسابقة التي استضافت أنشطة صناعية يُحتَمل أنها استخدمت - بقصدٍ أو دون قصد - الزئبق في عملياتها أو أنها أطلقته أو دفنته في البيئة (راجع قائمة الأنشطة في المقدمة). ويمكن إضافة مواقع إلى هذه القائمة متى أظهرت التحليلات والتشخيصات وجود شذوذ واضح لوجود الزئبق في التربة، والهواء، والماء، والرواسب فيها. ولاكتشاف حالات الشذوذ هذه، من الضروري مقارنة النتائج المُكتشَفة في الموقع بتلك النتائج الأساسية الجيولوجية الطبيعية أو الصناعية.

14- يُعدّ إجراء الدراسات على الموقع لتوصيف التلوث من حيث اتساعه ونطاقه، مرحلة مهمة لتحديد الإجراءات اللازم اتخاذها لأنشطة التنظيف لاحقًا.

15- لتوصيف التلوث ينبغي إثبات ما يلي:
- ما أشكال الزئبق الموجودة (زئبق معدني، ميثيل الزئبق ...)،
- كمية الزئبق،
- ما الأجزاء البيئية المتأثرة،
- ما مدى المنطقة الملوثة،
- سلوك الزئبق في الأجزاء البيئية،
- ما الآثار الناجمة عن التلوث، داخل الموقع وخارجه.

16- يمكن تنفيذ عدة أدوات على الموقع:
- قد تساعد الدراسات التاريخية والأدب واستعادة ذكريات العمال، في تشكيل الممارسات الصناعية والبيئية في الموقع؛ لاستهداف المناطق المحتمل تلوثها ونوع الملوثات المحتمل وجودها،
- ستُظهِر الدراسات الهيدروجيولوجية خصائص التربة (الحبيبات، وتكوين التربة، والصخور، ومناطق التشظي..) والشبكات الهيدرولوجية الجوفية (اتجاه تدفق الماء، والعلاقة بين مناسيب المياه الجوفية، والعمق، وتفاوت مستويات منسوب المياه الجوفية..). ويساعد هذا في تحديد الانتقال ومدى التلوث المحتملَين.

17- ستسهم عملية جمع المعلومات أيضًا في تحديد مشكلات الحماية في الموقع، وإذا كان التلوث قد خرج من الموقع أم لا: السكان المحليون، واستخدامات البيئة (البساتين، وصيد الأسماك، واستهلاك المياه، ومناطق السباحة، ومناطق المشي...)، والتعرض للوسائط، وحماية الموارد الطبيعية.

18- يحدد برنامج التحقيقات الذي يُجرَى في الموقع، الأجزاء البيئية وعينات الدراسة المطلوب أخذها لوضع التخطيط المفاهيمي للموقع في نهاية المطاف. حيث يرسم هذا التخطيط العلاقات بين مصادر التلوث، ووسائط النقل المختلفة ومشكلات الحماية.

19- الأجزاء البيئية المطلوب دراستها هي المياه (السطحية والجوفية)، والكائنات الحية (السمك، والنباتات، ..)؛ والتربة وغاز التربة والرواسب والهواء.

20- يجب تنفيذ عملية أخذ العينات والتحليلات وفقًا للبروتوكولات والمعايير. في حالة تلوث الزئبق، من الملائم ربط كل عملية أخذ عينات بمجموعة من المشاهدات الميدانية وقياسات البارامترات؛ للتمكن من ربط المؤشرات المنحرفة بالنتائج. وهذه المشاهدات أو البارامترات التي ينبغي وضعها في الاعتبار قد تكون:

- في الهواء: درجة الحرارة والضغط الداخلي، ودرجة الحرارة وضغط الهواء الخارجي،

- في التربة: البيئة في منطقة أخذ العينات (الصفيحة الفرعية، أو التربة العارية، أوالأرضية المعشبة، أوالتربة القريبة من أشجار...)، ونوع التربة (طبيعية، أو ردم، أو صخرية، أو متجانسة الخواص/متغايرة الخواص، أو حبيبات، أو رطوبة.... إلخ) ودرجة حرارة التربة، ودرجة حرارة الهواء المحيط، ودرجة الحموضة، وجهد الأكسدة والاختزال، والأكسجين المذاب، والمحتوى العضوي (إجمالي الكربون العضوي "TOC")، والحديد، والكبريت، والعنصر الرئيسي و/أو الآثار التي تتميز الخلفية الجيوكيميائية، والمذيبات المكلورة (المركبات العضوية عالية التطاير "HVOC" أو المركبات العطرية المكلورة أحادية الحلقة، أو الهيدروكربونات الكلية..... إلخ)، وأنواع البكتيريا الموجودة في التربة (الهوائية، أو اللاهوائية...)،

- غاز التربة: درجة الحرارة وضغط التربة، درجة الحرارة وضغط الهواء بالخارج،

- في الماء: درجة الحموضة، وجهد الأكسدة والاختزال، والأكسجين المذاب، ومتقبلات الإلكترونات (النترات، كبريتات النتريتات، والحديد والمنغنيز)، ومحتوى الكلوريدات، وطلب الأكسجين الكيميائي (COD)،

- في الرواسب: درجة الحموضة، وجهد الأكسدة والاختزال، والكبريتيدات/والكبريتات، وإجمالي الكربون العضوي (TOC)، والحبيبات.

21- إذا كانت هناك قطرات من الزئبق في التربة أو الرواسب، فربما تكون النتائج منحرفة بحسب إذا كانت القطرة أُخذت أو لم تُؤخذ في العينة، وبالأخص إذا كان وزن العينة صغيرًا جدًا. وفي هذه الحالة ينبغي الانتباه بدقة إلى أحجام العينات للحدِّ من هذه المخاطرة. ومن تدابير الأمان الجيدة للتحقق من النتائج، أن يتم أيضًا تضمين عينات لغاز التربة وقياسات له.

22- أثناء تحليل الزئبق في العينة، من الضروري إجراء انتواع (اصطفاء نوعي) للزئبق، والذي سيسمح بعمل تقييم دقيق للسمِّية، وقابلية التغيير، والمخاطر المرتبطة به. وستعمل عملية الانتواع على تمييز أشكال الزئبق المختلفة الموجودة: إجمالي الزئبق، الزئبق الأوَّلِي المُذَاب، والزئبق التفاعلي المُذَاب، والزئبق الغازي "Hg^0"، والزئبق الجسيمي والغروي.

23- مع الوضع في الاعتبار أن الزئبق المعدني هو الشكل الأكثر تواجدًا (بنسبة 99٪) في الهواء وغاز التربة، ويُفضَّل أن تتم عملية الانتواع في العينات في المياه - الجوفية والسطحية - والتربة والرواسب.

24- يتم تناول أخذ العينات بمزيدٍ من التفاصيل في الفصل الخامس.

1-3 المرحلة الأولى: تقرير أوَّلِي عن الوضع

25- ينبغي أن يحتوي التقرير الأوَّلِي على النموذج النظري للموقع الملوث بالزئبق الذي يستخدم جميع المعلومات المعروفة في السابق. سيتم تجميع بيانات عن الجوانب التالية أثناء هذه المرحلة:

- ✓ الموقع، ومساحة السطح، وتفاصيل المنطقة الطوبوغرافية للموقع،
- ✓ السجلات التاريخية للموقع والمنطقة المحيطة به (الدراسات المناخية.... إلخ)،
- ✓ الاستخدامات الماضية، والحالية والمستقبلية للمكان،
- ✓ البيانات التحليلية من دراسات سابقة،
- ✓ عمل مسح للموقع والمنطقة القريبة له.

26- من الأدوات المهمة التي تساعد على التعرف على التلوث وتحديد كميته وتوصيفه، عمل قائمة بالأنشطة والعمليات التي حدثت في الموقع، وترتبط باستخدام الزئبق إلى جانب الكمية المُقدَّرة للنفايات التي تحتوي على زئبق.

27- حالما يتم تحديد هذه العوامل، ينبغي تنفيذ المرحلة الثانية. تتضمن هذه المرحلة صياغة تقرير إضافي أكثر تفصيلاً لتقييم درجة التلوث بالزئبق.

2-3 المرحلة الثانية: التقرير الإضافي

28- سيحتوي هذا التقرير على المعلومات المطلوبة لاستخلاص النتائج، وتحديد إذا كانت هناك حاجة إلى إجراء تحليل أكثر تعمقًا أم لا.

29- يُنصح بإجراء فحص أَوَّلِي للموقع؛ لتحقيق ثلاثة أهداف محددة: أ) وصف الموقع، و ب) فحص نوع التلوث الناتج عن الزئبق، و جـ) تحديد آليات انتقال الزئبق ونقاط التعرض له.
30- إذا دعت الحاجة إلى إجراء دراسات تفصيلية للموقع، فسيتم تنفيذ مرحلة التوصيف البيئي (الفصل الخامس).

31- يتم تناول الأهداف الثلاثة المحددة بتفاصيل أكثر أدناه.

1-2-3 وصف الموقع

32- ينبغي أن يشتمل هذا على عموميات حول مكان الموقع، وعلم المناخ، وعلم المياه، وعلم الجيولوجيا المائية، وديموغرافية المنطقة (الحجم والمسافة من أقرب تجمع سكاني)، والتأثر البيئي المحتمل.

33- ينبغي أن يشتمل التقرير على البيانات التالية على الأقل:

- **الموقع**. وصف كامل للموقع وكيفية الوصول إليه. والمعلومات الجغرافية للموقع. والحركة المحتملة للمواد المترسبة فيه، وعمليات الإنتاج التي يتم تنفيذها، ومصدر نفايات الزئبق، وكمية الزئبق، وغير ذلك،

- **شكل وبنية أي مرافق**. الخصائص الهندسية، ونظام البناء والتسلسل، وتقييم حجم المادة، وحدود الموقع والاستخدامات في المنطقة المجاورة مباشرة،

- **علم المناخ**. وصف كامل للمناخ باستخدام كل البيانات المتاحة، ومتوسط درجة الحرارة الموسمية، ومعدل سقوط الأمطار السنوية وتوزيعها، والحد الأقصى للترسيب، والاتجاه السائد للرياح وأنماط الرياح الموسمية،

- **جيولوجيا المنطقة**، لاكتشاف التكوينات الجيولوجية والصخور الموجودة في الموقع، إلى جانب خصائصها،

- **الإيدافولوجيا واستخدامات الأرض**. وصف كامل لأنواع التربة في الموقع، إلى جانب خصائص التربة واستخدامات الأرض: الصناعية، والزراعية، وتربية الماشية، والحراجة، وأنواع المحاصيل.... إلخ،

- **شبكة الصرف السطحي**. وصف للتدفق النهري طوال العام، والأنهار الدائمة أو الموسمية،

- **الجوانب الاجتماعية والاقتصادية**. التركيبة السكانية والاقتصاد في المنطقة.

2-2-3 نوع التلوث

34- إذا لم يتم عمل التحليلات الكيميائية، فسيصعب تحديد الملوثات الموجودة في الموقع بدقة. ولكن أثناء زيارة الموقع، يمكن تحديد نوع التلوث بالزئبق الذي حدث بوضوح كافٍ. ولتحقيق هذا، يلزم معرفة معلومات حول الأنشطة والعمليات الجارية في المنطقة محل الاهتمام، وذلك من خلال إجراء مقابلات مع السلطات المحلية ومع السكان في المنطقة المحيطة. ويجب تلخيص وترشيح المعلومات التي يتم جمعها بهذه الطريقة دائمًا، وبالأخص إذا كان النشاط المسبب للتلوث قد تم إيقافه منذ فترة طويلة.
وينبغي وصف الموقع بالتفصيل بقدر الإمكان فيما يتعلق بالخصائص الهندسية والفيزيائية للبنية أو البِنى المحتمل إنتاجها للتلوث.

3-2-3 تحديد آليات انتقال الزئبق ونقاط التعرض له

35- سيتيح لنا وصف الموقع ونوع التلوث، التنبؤ بآليات انتقال الزئبق والأجزاء البيئية الملوثة به حيثما يقتضي الحال. ومن المهم جدًا تحديد نقاط التعرض بدقة، حيث ينبغي أن تكون العينات البيئية شاملة.

36- أثناء أول زيارة للموقع، ينبغي أيضًا للمتخصص المسؤول عن الدراسة تحديد المناطق التي لا يوجد بها أي دليل على تلوثها. فهذه المناطق سوف تُستخدم لأخذ عينات مرجعية، وهو ما سيساعد على تحديد المستوى الطبيعي للزئبق ومستوى تركيزه في منطقة الدراسة.

37- يمكن اتخاذ قرار احترازي مبدئي لتقييد الوصول إلى المنطقة المحتمل تلوثها وتقييد استخداماتها وذلك إذا خلصت معرفة نقاط التعرض التي اكتُشِفت في هذه الزيارة الأولى إلى استنتاج مفاده احتمال أن ينطوي التلوث على خطورة على الأشخاص أو الحيوانات إذا تعرضوا له. ويجب إخبار السلطات المحلية المعنية بهذا القرار. ويمكن مراجعة مدى صواب الإجراء لاحقًا بعد ظهور نتائج التحليلات.

4- تحديد الآثار البيئية

38- ينبغي اتباع المعايير الوطنية للسلامة والحماية البيئيتين كمرجعٍ لتحديد الآثار البيئية في الموقع الملوث.

39- وإذا لم تُوجد لوائح تنظيمية محددة، ينبغي النظر في مبدأ الحيطة عند دراسة الموقع الملوث بالزئبق. وفي هذه الحالة، ينبغي استخدام البيانات والتوصيات والمبادئ التوجيهية الدولية المنشورة والمعمول بها كمرجع. وستسمح النتائج التي يُتوصَّل إليها بهذه الطريقة إلى جانب قرارات السلطات المعنية بتقييم أي إجراءات مستقبلية.

40- نظرًا لإمكانية تحرك الزئبق، ينبغي تقييم الآثار البيئية في الأجزاء البيئية المختلفة لتحديد المخاطر التالية.

<u>الخطر الهيدرولوجي:</u>
- التغيرات في الصرف السطحي الطبيعي وتلوث قيعان الأنهار؛ بسبب الجريان السطحي وما يترشح من الموقع الملوث،
- تغيرات في مسارات التيارات المجاورة للموقع بفعل تراكم أو تجمُّع المواد في القيعان، والتي قد تتسبب في قطع التدفق الطبيعي أو قد تُجْرَف في فيضان وتلوث مجرى النهر.

<u>المخاطر الجوية:</u>
- إعادة تعليق أو إطلاق جزيئات الغبار من جديد من الموقع الملوث بالزئبق بحيث تحملها الرياح،
- إعادة تغويز الزئبق الموجود في المواد المتراكمة أو الملوثة وإطلاقه، بفعل التغيرات الموسمية في درجة الحرارة.

<u>التغيرات في التربة:</u>
- الإشغال بتراكم المواد،
- تأثر التربة المجاورة بتشتت المواد من الموقع الملوث، وترسب الغبار أو الجريان السطحي لمياه الأمطار.

<u>التأثير على النباتات والأحياء البرية:</u>
- تأثر أنواع النباتات من المنطقة وانتقال الأحياء البرية إلى موائل قريبة.

<u>الطابع المورفولوجي والمناظر الطبيعية:</u>
- التأثير البصري على الأحواض الرئيسية في المناظر الطبيعية؛ بسبب تأثير تراكم المواد، أو الافتقار إلى النباتات أو تغيرات الألوان.

5- توصيف الخصائص البيئية للمواقع الملوثة بالزئبق

41- سيعتمد تحديد الأجزاء البيئية التي ينبغي أخذ عينات منها على خصائص الموقع الملوث: كل موقع يختلف عن الآخر؛ ولذلك فإن المعايير التي تنطبق على موقع قد لا تنطبق على الآخر. وفي بعض الأماكن، ينبغي أخذ عينات من المياه السطحية والرواسب، وفي أماكن أخرى قد يكفي أخذ عينات من التربة، وفي البعض الآخر ينبغي قياس الانبعاثات فيها إلى جانب أخذ عينات من التربة والمياه السطحية والمياه الجوفية.

42- أخذ العينات والتحليلات عناصر ضرورية في تقييم المواقع الملوثة بالزئبق: فسوف تحدد مدى تلوث التربة مع الأضرار البيئية، والحدود الدقيقة للمناطق الملوثة.

43- عند اكتشاف تلوث بالزئبق في موقعٍ ما، ينبغي التحقق منه أيضًا في المنطقة المحيطة. وينبغي أخذ العينات من "داخل" و"خارج" الموقع على حدٍ سواء؛ وذلك لتقييم إمكانية تأثر المناطق المحيطة بالتلوث.

44- في كل الحالات، يلزم الحصول على عينة مرجعية لتحديد مستويات تركيز الزئبق. وإذا كان الموقع في منطقة مناجم، يجب أخذ قدر كبير من الحذر عند تحديد المستوى المرجعي. وقد تنتشر الرواسب المعدنية وتتجاوز حدود المنجم؛ وذلك بسبب استمرار التكوين الجيولوجي الذي يحتوي على الرواسب. وبالتالي، قد تكون النتائج عالية المحتوى المعدني ولا يرجع السبب في ذلك مطلقًا إلى نشاط التعدين. وفي هذه الحالات، ينبغي إيلاء اهتمام خاص بالتربة والمياه الجوفية.

أخذ العينات

45- ينبغي تنفيذ مهام أخذ العينات والتحليل والرصد بواسطة محترفين مؤهلين، ووفقًا لخطة مدروسة جيدًا، وباستخدام طرق معتمدة على نطاق واسع. وينبغي استخدام الطرق نفسها في كل نواحي البرنامج.

46- ينبغي التأكيد على أهمية أخذ العينات لمشروعات إزالة التلوث. فقد تتسبب أخطاء العينات أو أي انحراف عن إجراءات التشغيل الموحدة في إنتاج بيانات مضرة للبرنامج، وهو ما يفسِّر وجوب أن تكون العينات ممثلة لحقيقة الوضع، وأن تكون متوافقة مع مستويات الموثوقية المنشودة. وينبغي الاحتفاظ بالعينات وتخزينها لأقصر فترة زمنية ممكنة بعد تجميعها. فالفترة التي تنقضي بين وقت أخذ العينات ووقت تحضيرها للتحليل ينبغي أن تكون أقل ما يمكن، كما يُوصى بالاحتفاظ بالعينات مُبرَّدة إلى أن يتم تسليمها للمختبر.

47- إضافة إلى ذلك، ينبغي تطبيق تدابير صارمة؛ لضمان الجودة والرقابة.

48- قد يكون أخذ العينات انتقائيًا، ومنهجيًا وعشوائيًا، وشاملاً لكل المصفوفات (التربة، والرواسب، والمياه):

- أخذ العينات الانتقائي
يتم تحديد نقاط تجميع العينات من خلال خبرة مستخرج العينات، والتي عادةً ما تتضمن عواملَ مثل رؤية منطقة بها انسكاب مواد كيميائية، أو تغيرات في لون التربة، أو مناطق تعرضت في السابق لاضطراب فيزيائي أو مناطق لا توجد بها نباتات أو بها نباتات ميتة. وفي الدراسات البيئية، غالبًا ما تُشكِّل عملية أخذ العينات الانتقائي أساسًا للتحقيقات الاستكشافية.

- أخذ العينات المنهجي
إنها طريقة مفيدة في المواقع التي بها انسكابات كيميائية أو ترسيب جوي من الملوثات، حيث يمكن الاستفادة منها في توثيق تدرجات التركيز المحتملة وغالبًا ما تُستخدم في برامج الرصد. ويمكن أن تشكل نقاط أخذ العينات أنماطًا متنوعة في التربة: متعرجة، وقطرية، وشبكة، ومتموجة.... إلخ. كذلك ينبغي أخذ عينات فرعية عند كل ذروة يتغير عندها اتجاه النمط.

- أخذ العينات العشوائي
يسمح بتحديد كل تركيبة ممكنة من وحدات العينة، ويكون عدد التركيبات الممكنة محدودًا فقط بحجم العينة.

التحليلات

49- للحصول على نتائج مفيدة ومقبولة، ينبغي أن يكون مختبر التحليل مجهزًا بالبنية الأساسية اللازمة ومعروفًا بخبرته الموثوقة بخصوص مصفوفة العينة ونوع الزئبق المطلوب تحليله. ومن الطرق الممتازة للتحقق من صلاحية النتائج هي المشاركة في برنامج للمقارنة بين المختبرات.

50- إضافة إلى ذلك، ينبغي وضع إجراءات مثل معايير تجانس وقبول للتعامل مع العينات وتحضيرها في المختبر. ويتناول الفصل السادس تحضير العينات والاعتبارات التحليلية. لمزيدٍ من الاعتبارات بخصوص المعالجة الأولية للعينات، راجع المعيار NEN-EN-16179: لعام 2012 "الحمأة، والنفايات البيولوجية المعالجة والتربة: توجيه للمعالجة الأولية للعينات"

51- يمكن لطرق تحليل مصفوفات الزئبق المتنوعة أن تُقيّم محتوى الزئبق الكلي أو انتواع الزئبق. ولقد تم تحديد بعضها من قِبَل المنظمة الدولية لتوحيد المقاييس (ISO) واللجنة الأوروبية لتوحيد المقاييس (CEN). وهناك طرق وطنية أخرى تم وضعها، مثل تلك الخاصة بالولايات المتحدة (وكالة حماية البيئة "EPA") أو اليابان.

52- يجب الوفاء بالمعايير التالية للحصول على نتائج عالية الجودة:

أ) تحديد مواصفات تقنية التحليل،
ب) تقديم التقارير، وفقًا لإجراءات الجودة المقررة،
جـ) صيانة أجهزة التحليل،
د) التحقق من سلامة جميع الطرق المستخدمة (بما في ذلك الطرق الخاصة بالمختبر)،
هـ) تدريب فريق المختبر.

53- إضافة إلى ذلك، ينبغي وضع إجراءات مثل معايير تجانس وقبول للتعامل مع العينات وتحضيرها في المختبر.

1-5 توصيف خصائص المياه السطحية والمياه الجوفية

54- عادةً يتم تحليل عينات المياه في المختبر بدلاً من الميدان. ومع ذلك يمكن إجراء بعض الاختبارات الميدانية. ويُوصى باستخدام زجاجات التِفْلون المغسولة بحمض الهيدروكلوريك (HCI) بوصفها وسيلة جيدة لمنع انتقال التلوث. كما ينبغي التأكد من خلو الحمض المستخدم من الزئبق، فقد تكون الأحماض بمثابة مصدر لملوثات عديدة، مثل الزئبق.

55- الانتواع في المياه موضوع مهم لفهم سلوك الزئبق في البيئة وإمكانية معالجة المياه الملوثة بالزئبق. ينبغي التمييز بين أشكال الزئبق العديدة التي تنشأ من وسائل المعالجة المختلفة لعينة المياه (على سبيل المثال، ترشيح العينة ومعالجتها باستخدام كلوريد البروم (BrCl) يمنحنا المعلومات HgD = Hg°+ HgR + HgC؛ ولكن الهضم الحمضي متبوعًا بالتحليل يمنحنا المعلومات (HgT = HgP+HgD):

- Hg_T = الإجمالي
- Hg_P = الزئبق الجسيمي
- Hg_D = الزئبق المُذَاب
- Hg_R= الزئبق التفاعلي
- Hg^o = الزئبق الغازي
- Hg_C = الغروي/الفضالة

يمكن إجراء تحليل عينات مياه لميثيل الزئبق باستخدام العناصر الاستشفافية النظائرية وتحليل GC-ICP-MS.

1-1-5 المياه السطحية

56- ينبغي دراسة محتوى الزئبق في المياه السطحية والموقع الملوث وفي المنطقة المحيطة، فقد تعمل المياه ممرًا لانتشار التلوث بترشحه من الموقع.

57- لتحديد تأثير الموقع الملوث على المياه السطحية، سيتم إجراء تحليل عند منبع المصدر الثابت للزئبق المفترض وعند مصب جميع نقاط التعرض المحتملة. وينبغي أن يركز هذا التحليل على النقاط التي تُستخدم عندها المياه للاستهلاك الآدمي، أو الاستجمام، أو تنظيف الملابس.... إلخ.

58- تُستخدم العينات غير المرشحة بشكلٍ عام لتحليل المياه السطحية. إضافةً إلى ذلك، يجب تنفيذ عملية أخذ عينات الزئبق في **كل المواسم**، أي في فترات الأمطار، والجفاف، والحرارة والبرودة.

59- في أي وقت يتم فيه تحليل كمية من المياه السطحية، ينبغي تجميع معلومات عن الرواسب. ولهذا الغرض، ينبغي أخذ عينات سطحية وبسيطة (0-5 سم) من الأماكن الموجودة عند منبع ومصب المصدر الثابت للتلوث.

60- في المناطق التي يوجد بها تلوث في المياه، من المهم معرفة إذا كانت الحيوانات المائية يتم اصطيادها لاستخدامها كغذاء؛ وذلك لتقييم احتمالية فرض قيود على صيد السمك فيها.

61- حالما يتم تحديد شبكة الصرف في التقرير الإضافي، ينبغي تخطيط حملة لأخذ عينات من السوائل والمواد الصلبة (الرواسب). الهدف هو تقييم:

1- جودة المياه في المنطقة المحيطة بالموقع،
2- نوعية الرواسب في قيعان المجاري المائية في المنطقة،
3- إذا كانت الرواسب قد تأثرت بالمواد الملوِّثة أو بالملوثات نفسها التي تنقلها المياه.

62- ينبغي تنفيذ المهام التالية لتخطيط حملة أخذ العينات:

- قائمة جرد بمراكز المياه السطحية،
- مسح ميداني لجميع أنواع مراكز المياه،
- تحديد نقاط أخذ العينات والفترة (أو الفترات) الأنسب للقيام بأخذ العينات، حسب حالة المناخ،
- تحديد مستويات تركيز الزئبق في المنطقة. وينبغي تحديد نقاط أخذ العينات عند منبع منطقة الدراسة؛ لتقييم مستويات الزئبق الموجود قبل وصول المياه للمنطقة الملوثة.

63- من المفترض أن تكون مستويات الزئبق في المياه السطحية الأعلى من الحدود المقررة للمياه المخصصة للاستهلاك الآدمي (1 ميكروغرام/لتر) كافية عمومًا لتستحق إجراء تحليل متعمق للمصدر. فمثل تلك المستويات يمكن أن تكون دليلاً على التلوث أو بفعل الإثراء الطبيعي.

2-1-5 المياه الجوفية

64- تُعدّ المياه الجوفية واحدة من الوسائط الأكثر عُرضة للتلوث في المواقع الخطرة؛ ولذلك، ينبغي مراقبتها ليس فقط عن طريق الآبار التي هي من صُنع الإنسان، ولكن أيضًا عن طريق جمع عينات من الينابيع ومصادر المياه الجوفية الطبيعية الأخرى.

65- ينبغي إجراء الدراسات الهيدروجيولوجية في منطقة الدراسة، وينبغي أن تتضمن بعضًا من الأنشطة التالية:

أ- تصميم المخطط الأوَّلِي للظروف الهيدروجيولوجية في المنطقة، مثل إنشاء قائمة جرد لمراكز المياه (نقاط مستجمعات المياه والينابيع في المنطقة)،
ب- مسح ميداني لجميع مراكز المياه. ينبغي تجميع البيانات التالية: خصائص البناء، وسعة الاستخلاص، والمستوى البيزومتري والخصائص الفيزيائية الكيميائية للمياه،
ج- تحديد نقاط أخذ العينات والفترة أو الفترات الأنسب للقيام بأخذ العينات، حسب حالة المناخ،

قد يستدعي حجم الموقف وتعقيده تجميع معلومات إضافية من خلال الأنشطة التالية:

د- اختبار ثقوب في أنحاء الموقع من خلال البِنى والتكوينات ذات الأهمية الهيدروجيولوجية والهيدروكيميائية. وسيكشف هذا عن التغييرات في المستوى البيزومتري، ويسمح باكتشاف التدرجات الرأسية،
ه- اختبارات الخصائص الهيدروليكية في المناطق التي لم تخضع لاختبار الثقوب؛ لتحديد نفاذية البِنى الرئيسية في المنطقة خلال الصخور المختلفة،
و- أخذ العينات الهيدروكيميائية إلى جانب اختبار الثقوب بسدِّ الامتدادات لاكتشاف الخصائص الكيميائية لتدفق المياه الجوفية على أعماق مختلفة عند منبع ومصب المصدر الثابت للتلوث.

66- بسبب التغيرية الطبيعية في المياه الجوفية، ينبغي تحليلها ثلاث مرات على الأقل كل عام، وذلك حسب المناخ المحلي.

67- ينبغي قياس البارامترات التالية في المياه:

- البارامترات المقاسة في الموقع:
  - درجة الحرارة
  - الموصلية (الملوحة)
  - درجة الحموضة (الحموضة)
  - الأكسجين المُذَاب
  - جهد الأكسدة والاختزال

- تركيزات المعادن:
  - الزئبق
  - الزرنيخ
  - الباريوم
  - الكروم
  - الحديد
  - النيكل

68- بالإضافة إلى هذه التحديدات التحليلية، يمكن إجراء اختبارات أخرى وفقًا لنوع عملية الإنتاج التي نجم عنها ترسب الزئبق، والتركيب المتوقع للمصدر الثابت للتلوث.

69- بالمثل، يمكن اتخاذ تدابير أخرى لتحديد وجود الأنيونات مثل الكبريتات، والنترات، والنتريتات، والكربونات والأمونيوم.

70- لا يمكن مقارنة مستويات الزئبق في المياه الجوفية مع القيم المرجعية (على سبيل المثال، تلك الخاصة بوكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة (US-EPA)، إلا إذا كانت العينات المحللة لم يتم ترشيحها. كذلك ينبغي أن يشتمل التحليل على عينات من الصنابير المنزلية؛ لأن تركيز الملوثات في الصنابير قد يختلف عن القيم الموجودة في الآبار أو الينابيع.

71- في كل الحالات، ينبغي تحليل مستويات الزئبق الأعلى من المستويات المرجعية المقررة للاستهلاك البشري (1 ميكروغرام/لتر)؛ وذلك لتحديد مصدرها.

2-5 التربة والرواسب

72- قبل تخطيط حملة أخذ العينات من التربة، ينبغي إجراء مسح للموقع؛ لوضع عدة عوامل في الاعتبار، منها:

- شكل أرض الموقع.
- الخصائص الطبوغرافية والجيولوجية، واستخدامات الأرض، وتحديد الجُرْف، والمنحدرات، وسفوح التلال شديدة الانحدار، والمناطق غير المستقرة.... إلخ.
- إمكانية الوصول إلى الموقع ومناطق أخذ العينات.
- تحديد المناطق المُتشكِّلة من أرض طبيعية، والمناطق المُتشكِّلة من ردم ناتج عن حركة المواد المترسبة. وهذه النقطة لها أهمية خاصة في عملية أخذ العينات من المناطق الحضرية، فمن المهم تحديد إذا كانت التربة قد تمت إزالتها أو تم خلطها جراء أعمال تطوير حضرية.
- يستخدم الموقع التاريخي (العمليات الصناعية، والخزانات، وخطوط الأنابيب، وتخزين النفايات، ومناطق طمر النفايات...)

73- على أساس هذه المعلومات والبيانات من التقرير الإضافي، سيتم وضع المبادئ التوجيهية لحملة أخذ العينات. ويُنثر التلوث أساسًا بفعل الرياح، ومن خلال إعادة تعليق وترسيب المواد الدقيقة (عادةً ما يُحدد التوزيع باتجاهات الرياح الرئيسية في المنطقة)، وبواسطة المياه السطحية.

74- مع الأخذ بعين الاعتبار توزيع الرياح والمياه السطحية التي تتدفق عبر الموقع، ينبغي إنشاء شبكة أخذ عينات على شكل مُعيَّن قياس جوانبه 50 × 50 مترًا. وينبغي أن تكون الشبكة متماثلة حول اتجاه الرياح السائدة، حيث يُعد بديهيًا أن هذه الرياح ستحوي أقصى

تركيز من الجسيمات العالقة في تدرج التلوث. وإضافةً إلى الشبكة السابق ذكرها، ينبغي أخذ عينات لسلسلةٍ من النقاط منتظمة التباعد بنمط متحد المركز حول حدود الموقع الملوث؛ لمقارنة وتقييم تأثير الرياح غير السائدة على حركة الجسيمات الصلبة.

75- ستتم عملية أخذ العينات من التربة السطحية عن طريق إزالة طبقة رقيقة من الأرض ثم أخذ العينة باستخدام مِلْوَق نظيف. وسيتم أخذ عينة التربة العميقة من النقطة نفسها التي تُؤخذ منها العينة السطحية باستخدام أداة أخذ العينات المناسبة (بريمة حفر).

76- بالنسبة إلى التربة/ الرواسب على وجه الخصوص، ينبغي استخدام أسطوانة مستخرج العينات، ولأنها لا تسمح بتغيُّر العينة يمكن رؤية شكل التلوث وعمقه.
77- يمكن استخدام اختبار حفر الثقوب الهيدروجيولوجي لأخذ العينات، والذي ينبغي من باب التفضيل أن يكون استعادة مستمرة للُبِّ.

78- يمكن أن تزن كل عينة كيلو غرام واحد تقريبًا؛ وذلك لضمان أن تكون العينة ممثلة للواقع، تلك العينة التي سيُؤخذ منها لاحقًا في المختبر جزءًا متجانسًا يبلغ حوالي 100 مللي لتحليله. وسيتم الاحتفاظ بالجزء المتبقي من العينة باعتباره مرجعًا، وسيتم تخزينه لأي اختبارات مستقبلية يلزم إجراؤها. وبالنسبة إلى عينة الرواسب، يمكن أن يكون الوزن أقل من ذلك وفقًا للتحليلات المطلوبة.

79- في حالة أنشطة التعدين، ينبغي أخذ عينات التربة من ثلاثة مستويات: عينة سطحية بسيطة (0-5 سم)، على عُمق 0.5 م، ومن عينات الصخور المأخوذة من اختبار حفر الثقوب، إن وُجِدَت. ويتمثل الهدف من أخذ العينات من أول مستويين في اكتشاف التفاوت المحتمل بين التربة السطحية والتربة العميقة بفعل الإثراء بالزئبق الناجم عن الانتقال من التربة، والتركيز في سطح التلامس مع القاع. ويمكن أخذ عينات الشبكة المتعمقة من نصف النقاط وبالتناوب بينها.

3-5 توصيف خصائص الهواء والغذاء

1-3-5 الهواء

80- ينبغي دراسة مستويات الزئبق في الهواء المحيط؛ نظرًا لأن هذا المعدن يتشتت بسرعة ويتبخر بسهولة. وكما ذكرنا سابقًا، ينبغي أن تراعي نقاط أخذ العينات الأنشطة الصناعية داخل الموقع وخارجه، إلى جانب الظروف الجوية.

81- قد توجد مصادر عديدة للزئبق في الهواء المحيط. بل إن المستويات العالية تشير بطبيعة الحال إلى وجود الزئبق في المنطقة. ويُعدُّ قياس تركيز الزئبق في الهواء طريقة سريعة لتأكيد وجود المعدن. وهذا لأن الملوثات تتشتت عادةً في الهواء، ولكنها لا تبقى فيه. ونتيجة لذلك، تنخفض المستويات حالما يتم التخلص أو الحد من مصدر التلوث.

82- في مبادئها التوجيهية لنوعية الهواء الخاصة بأوروبا، وضعت منظمة الصحة العالمية (WHO) قيمة توجيهية تبلغ 1000 نانوغرام/م3 (1 ميكروغرام/م3) باعتبارها معدلاً سنويًا لوجود الزئبق في الهواء المحيط.

83- حددت وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة (EPA) قيمة مرجعية لتركيز الزئبق تبلغ 300 نانوغرام/م3 للتعرض له في المناطق السكنية.

84- يضع التوجيه الأوروبي 2009/161/EU قيمة قصوى لحد التعرض المهني (8 ساعات كل يوم) عند 20,000 نانوغرام/م3.

85- يمكن إجراء عملية نمذجة لتحديد مصادر التلوث الثابتة الأكثر احتمالاً (ينبغي دائمًا أخذ عينات من الهواء المحيط). ويمكن تجميع عينات الهواء في فترات على مدار 24 ساعة وفقًا لجدول زمني يراعي الظروف الجوية على مدار العام.

86- ينبغي الاحتفاظ بسجل مفصل عن الظروف الجوية وجميع الأنشطة التي يجري تنفيذها في المنطقة في وقت كل عملية أخذ عينات.

2-3-5 الغذاء

87- ينبغي تحديد محتوى الزئبق في العينات النباتية والحيوانية للأغذية التي يتم إنتاجها في المنطقة وأي أغذية أخرى يكثر استهلاكها بين السكان. وينبغي تضمين الأغذية الناتجة عن الصيد البحري والبري، إلى جانب تلك التي تنتج من مصادر زراعية.

عندما تتلوث الرواسب، ينبغي أن يشتمل أخذ العينات على الأنواع التي تتغذى من القاع في الأنهار، والمجاري المائية، والبحيرات. وليس من المهم تضمين السمك الذي يتغذى في العمود المائي.

88- وفقًا لمبدأ الوقاية، ينبغي عدم تجاوز مستويات الجرعات الموضحة في توصيات منظمة الصحة العالمية (WHO). في عام 2008، نشرت منظمة الصحة العالمية وثيقة توجيهية http://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/mercury/en/ لتوفير معلومات حول التأثير المحتمل للتعرض للزئبق، وللمساعدة بقدر الإمكان في تحديد السكان المعرضين للخطر.

89- في الوثيقة التوجيهية، تشير منظمة الصحة العالمية إلى أن هناك مجموعتين معرضتين بشكلٍ خاص لآثار الزئبق. فالأجنَّة لديها حساسية خاصة لآثار الزئبق. وتتعرض الأجنَّة داخل الرحم لميثيل الزئبق؛ نتيجة استهلاك الأم للسمك (وبالأخص سمك التونة، وأبو سيف، والقرش..) أو ربما تؤدي الأغذية البحرية إلى إتلاف خلايا مخ الطفل وجهازه العصبي. وأخطر ما يترتب على التعرض لميثيل الزئبق هو حدوث اضطرابات محتملة في نمو الجهاز العصبي. ونتيجة لذلك، فقد يؤثر التعرض لهذه المادة أثناء المرحلة الجنينية على القدرة الإدراكية للطفل، وذاكرته، وقدرته على التركيز، ولغته، ومهاراته الحركية الدقيقة والمهارات المكانية والبصرية. ولذلك ينبغي إيلاء اهتمام خاص للنساء الحوامل، والمرضعات، والنساء في سن الإنجاب.

90- المجموعة الثانية هي الأشخاص الذين يتعرضون بانتظام لمستويات عالية من الزئبق (تعرُّض مزمن). وتشتمل هذه المجموعة على الأشخاص الذين يأكلون السمك باعتباره مصدرًا أساسيًا للغذاء (صيد السمك الكفافي)، أو أولئك الأشخاص الذين يتعرضون له بحُكم مهنتهم.

91- نظرًا لأن العادات الغذائية للسكان قد تعني أن جرعة الزئبق التي يمتصونها تقترب من الحدود المقررة، يُنصَح بتقييد الوصول إلى الأغذية الملوثة، وبتنظيم استخدام الأراضي وأنواع المحاصيل التي يمكن أن تنمو في المنطقة الملوثة؛ وذلك لضمان حماية صحة السكان المحيطين بالمنطقة.

6- تحضير العينة والإجراءات التحليلية

92- موضح بالقسم التالي منهجية جيدة المقارنة، مع الوضع في الاعتبار إمكانية استخدام تقنيات أخرى اعتمادًا على كل حالة على حدى، وخبرة المحللين والوسائل التقنية المتوفرة.

أ- تحضير العينة

أ- التربة المُشبَّعة بالمياه والرواسب

فيما يلي توضيح لاثنين من الإجراءات البديلة، وهي تجفيف العينة في درجة حرارة الغرفة والتجفيد.

أ-1 التجفيف في درجة حرارة الغرفة (بحد أقصى 20-22 درجة مئوية)

1- إذا كانت العينة مُشبَّعة بالمياه، ينبغي ترشيحها لفصل مرحلة السيولة. وإذا كانت العينة الأصلية جافة بما فيه الكفاية، ينبغي المتابعة مباشرةً مع مرحلة التجانس (النقطة 3). وفي جميع الحالات، ينبغي تحديد محتوى الرطوبة من عينة فرعية بالتوازي في فرن أو في ميزان حراري (انظر الحاشية السفلية [6]).

2- يُوضع الجزء الصلب فوق ورقة ماصَّة في درجة حرارة غرفة خاضعة للتحكم (لا تتجاوز 20-22 درجة مئوية)، ويتم وزنه بصورة دورية حتى يُصبح الوزن ثابتًا.

3- تجانس العينة.

4- إذا لم تتوفر معلومات سابقة عن التركيز التقريبي للزئبق، يمكن بدلاً من ذلك إجراء تحليل إشكا (ESCHKA)[5] للاسترشاد به حول أنسب تقنية لتحديد محتوى الزئبق في العينة.

5- إجراء التحليل اعتمادًا على التركيز المتوقع، مع الاسترشاد المُعطَى لاحقًا في النقطة "ب". وبالنسبة إلى هذا، وباستثناء استخدام تقنية الانحلال الحراري، سيلزم إجراء انحلال مسبق للعينة. والإجراء الأكثر شيوعًا هو هجوم الماء الملكي، إلا أن هناك طرق أخرى بديلة حسب خصائص العينة.

- ISO 11466.3 (الماء الملكي)
- EPA 3050B ($HCl-H_2O_2HNO_3$-).
- الهضم الحمضي بمساعدة الموجات المتناهية القصر EPA 3015، 3051، SW 846

6- إعطاء النتيجة بالإشارة إلى المادة الجافة، مع صيغة تصحيح الرطوبة (انظر الملاحظة[6])

---

[5] تعتمد طريقة إشكا على عملية ملغمة الزئبق على صفيحة ذهبية. حيث يتم إدخال عينة التربة في بوتقة خزفية وتُغطَّى أولاً بطبقة من برادة الحديد ثم بطبقةٍ من أكسيد الزنك. بعد ذلك تُغطَّى البوتقة الخزفية بصفيحة من الذهب. بعد ذلك، تخضع البوتقة لعملية تكليس تؤدي إلى تكوين الزئبق الغازي الذي يلتصق بصفيحة الذهب. ويسمح لنا الفرق في وزن صفيحة الذهب تحديد كمية الزئبق الموجودة في عينة التربة. ويمكن أن يتراوح نطاق الزئبق المَقيس من حوالي 0.2٪ إلى أكثر من 30٪.

[6] تصحيح الرطوبة: نتيجة تركيز الزئبق في العينة الأصلية، المُعبَّر عنها في العينة الجافة ستكون:

$$\square = \frac{\square}{1000} \cdot \frac{\square . \square}{\square} \cdot \frac{100}{100 - \square}$$

R: تركيز الزئبق في العينة الصلبة الجافة ملغم/كغم (جزء في المليون)
L: تركيز الزئبق في المحلول المحلل (ميكروغرام/لتر)
b: حجم الهضم النهائي بالملليلتر.
F: عامل التخفيف في عملية الهضم، إن وُجِدَ
M: وزن العينة الصلبة الأصلية المهضومة، بالغرام.
H: قيمة الفقدان عند درجة حرارة 105 درجات مئوية، بنسبة مئوية (٪) من العينة الأصلية.

أ-2 التجفيد

93- التجفيد (التجفيف بالتجميد) هو طريقة تقلل من فقدان المكونات المتطايرة، مثل الزئبق، في عملية تجفيف العينات التي بها رطوبة، كما أنه ملائم جدًا للأنسجة العضوية (السمك، والمحار، والطحالب.... إلخ). وينتج عن هذه الطريقة عينة محتوى الرطوبة فيها منخفض جدًا بحيث يمكن تحليلها مباشرةً. وطريقة التجفيد ملائمة على وجه الخصوص للكميات الصغيرة من العينات.

جهاز تجفيد في المختبر

ب- عينة التربة الجافة

1- تذويب العينة، عادةً في ماء ملكي، إلا عند استخدام تقنية الانحلال الحراري.
2- إجراء التحليلات المطابقة.
3- تطبيق النتائج على عينة فرعية تم تجفيفها في درجة حرارة 105 مئوية، كما هو موضح أعلاه.

ج- تحديد الزئبق في العينات السائلة

94- لتحليل الزئبق في العينات السائلة، يتم القياس مباشرةً (قبل الترشيح الهوائي بمرشح بحجم 0.20 ميكرون) حسب النطاق المتوقع للزئبق (انظر النقطة ب).

ب- الإجراءات التحليلية الأكثر شيوعًا

1- بالنسبة للعينات الصلبة التي تزيد تركيزات الزئبق فيها عن 300 جزء في المليون، يمكن تحديد التركيز الدقيق للزئبق مباشرةً باتباع طريقة ESCHKA (انظر الحاشية رقم [5])

2- بالنسبة للعينات الصلبة التي يتراوح تركيز الزئبق فيها بين 20 و300 جزء في المليون، يمكن تحديد التركيز الدقيق للزئبق مباشرةً عن طريق الانحلال الحراري للعينة (أي أن الأداة المُلحقة RP-91C من إنتاج شركة LUMEX مخصصة لحلِّ العينة واختزال الزئبق من الحالة المترابطة إلى حالة ذرّية باستخدام تقنية الانحلال الحراري) وتحليلها لاحقًا باستخدام مقياس الطيف الضوئي للامتصاص الذرّي.

3- بالنسبة للعينات التي يتراوح تركيز الزئبق فيها بين 0.05 و20 جزء في المليون، يمكن تحديد التركيز الدقيق للزئبق بواسطة ICP-AES (قياس طيف الانبعاث الذري-البلازمي بالتقارن الحثي)، المشار إليه أيضًا باسم قياس طيف الانبعاث الضوئي البلازمي بالتقارن الحثي (ICP-OES)، حيث يتم إجراء هضم أَوَّلِي للعينة في خليط حمضي.

4- بدلاً من ذلك، بالنسبة للتركيز بمعدل 1 جزء في المليون من الزئبق، يمكن استخدام تقنية نظام البخار البارد (CVAAS) مع القياس لاحقًا باستخدام قياس طيف الامتصاص الذري (بناءً على المعيار ISO 12846:2012)، وهو الأكثر انتشارًا في المختبرات، أو ما يعادله FIAS وFIMS. والمشاكل التي قد تنشأ هي أن مركبات الزئبق العضوية لن تستجيب إلى تقنية الامتصاص الذري بالبخار البارد وقد تظهر تداخلات محتملة مع الكلوريدات واليوديدات والكبريتيدات والنحاس والمركبات

العضوية المتطايرة. فمن المستحسن أولاً إزالة الروابط العضوية مع الماء الملكي في العينات الصلبة ومع الهضم بحمض النيتريك في العينات السائلة، تعقبه أكسدة كل الزئبق إلى حالته ثنائية التكافؤ باستخدام برمنجنات أو ثنائي كرومات، وفي النهاية اختزاله إلى حالته العادية باستخدام بوروهيدريد أو كلوريد قصديري. والخيار الآمن هو استخدام طريقة الإضافات القياسية لتأكيد النتائج، أو لتغيير التقنية إذا استمرت المشاكل.

5- بالنسبة للعينات الصلبة التي يكون تركيزها أقل من 0.05 جزء في المليون من الزئبق - بالرغم من أنه يمكن أن تُستخدم لتركيزات أعلى من ذلك - يمكن تحليلها مباشرةً دون تذويبها من العينة الصلبة الأصلية عن طريق الحلِّ الحراري (أي أن الأداة الملحقة RP-91C من إنتاج شركة LUMEX مخصصة لحلِّ العينة واختزال الزئبق من الحالة المترابطة إلى حالة ذرّية باستخدام تقنية الانحلال الحراري)، ثم ملغمتها باستخدام قياس طيف الامتصاص الذرّي (أي الجهاز AMA-254). وتعتمد هذه الطريقة على المعيار EPA 7473 SW 846.

على أي حال، عند استخدام عملية الانحلال الحراري والاشتباه في أن الزئبق مرتبط بالسيليكات أو مصفوفات أخرى قد لا تتحلل بالحرارة، ينبغي تأكيد التحقق من صحة التحليل المباشر للمادة الصلبة باستخدام هضم حمضي كامل بطريقة مناسبة (مثل طريقة EPA 3052)، يعقبها التحليل باستخدام AMA-254 أو ما يعادلها من تقنيات تحليل الزئبق الأخرى.

7- تقييم المخاطر

95- سيساعد تقييم المخاطر البيئية في الإجابة عن الأسئلة التالية:

- هل يمثل الموقع خطرًا حقيقيًا أو محتملاً على البشر و/أو على الكائنات الحية؟
- ما حجم المخاطر؟
- هل ينبغي إصلاح الموقع للحدِّ من المخاطر؟
- إذا لم يتم إصلاح الموقع، هل يمكن أن تزداد و/أو تتمدد المخاطر؟

96- تقييم المخاطر البيئية هو عبارة عن عملية تحدد درجاتٍ واحتمالاتٍ للآثار السلبية للتلوث. وبناءً على ذلك، فهو أداة يمكن أن تساعد في تحديد إذا كان ينبغي تنفيذ تدابير بيئية في الموقع الملوث أم لا. ويمكن أن يحدد تقييم المخاطر مدى الحاجة المُلِحَّة لاتخاذ الإجراءات: كلما زادت مخاطر التلوث التي تؤثر على الكائنات الحية، زادت الحاجة إلى تنفيذ برامج إصلاح المواقع الملوثة.

97- يمكن أن يُستخدم تقييم المخاطر لتحديد أهداف المعالجة للموقع، التي قد تكون للوصول إلى (أ) الحدود القصوى المقبولة التي تحددها التشريعات السارية أو السلطات المختصة أو (ب) الحدود الخاصة المحددة للموقع على أساس التقييم.

98- يُشكِّل تقييم المخاطر البيئية وسيلةً لتحديد إذا كان ينبغي القيام بإجراءات تصحيحية في الموقع الملوث أم لا، ولتحديد هدف المعالجة النهائي، وبالتالي اختيار أفضل استراتيجيات التنظيف. والهدف المثالي هو إصلاح الموقع واستخداماته لتصل التركيزات إلى المستويات الموجودة في البيئة قبل التلوث وذلك باستخدام التقنيات الموضحة في النقطة 7.1. ومع ذلك، قد لا يكون ذلك مجديًا من الناحية الاقتصادية وينبغي النظر في خيارات أخرى، على النحو الوارد في تلك النقطة.

99- إن تحديد المستوى المُستهدَف للتنظيف على أساس تقييم المخاطر يعني أنه سيتم خفض التلوث إلى أقصى مستوى مقبول، والذي قد لا يكون بالضرورة مستوى الصفر (انتواع الزئبق وقابليته للتغير وجاهزيته الحيوية هي بارامترات يُمكن أن تؤخذ بعين الاعتبار). وبالتالي، في نهاية المطاف، لن يُشكل التركيز المتبقي من المادة الملوثة أي خطر على البشر والكائنات الحية.

100- يمكن إجراء تقييم المخاطر من أربع مراحل واضحة المعالم وذات أهداف محددة:

1- تحديد ما هو عُرضة للخطر وتوصيفه. ومن المفترض أن تساعد كل عمليات التحليل لهذه الخصائص في تقييم المخاطر على صحة الإنسان وعلى النُظُم الإيكولوجية.

2- تحليل مستوى المخاطر والسُمِّية. والهدف من هذه المرحلة هو تحديد العناصر أو المكونات التي قد تكون حاسمة؛ لتوصيف نوع الآثار التي قد تنطوي عليها، وتقييم العلاقات بين الجرعة والأثر؛ من أجل التنبؤ بالاستجابة للملوثات لمجموعة كبيرة من الجرعات. ويستند هذا التحليل إلى بيانات الملوثات وخصائصها، مشيرًا إلى سلوكها البيئي والسُمِّي.

3- تحليل التعرض. والهدف منه تقدير معدل التعرض للملوثات المحددة. ويستند هذا التحليل إلى وصف سيناريوهات التعرض، وكذلك توصيف طبيعة التلوث ومداه.

4- تحليل المخاطر. يتم دمج نتائج المراحل السابقة للوصول إلى تقدير موضوعي لاحتمال حدوث الآثار السلبية على العناصر المحمية في ظل الظروف المحددة للموقع.

101- هناك ملوثات أخرى بجانب الزئبق قد يكون لها تأثير أيضًا. ولهذا، إذا كان هناك دليل على وجود ملوثات أخرى في الموقع، يجب على المسؤول عن العملية اتخاذ القرار اللازم لتضمينها في الدراسة والتقييم.

1-7 توصيف الآثار السُمِّية

102- يتناول هذا القسم من تقييم المخاطر تقييم ووصف آثار الملوثات الخطيرة (الزئبق) على المستقبلات التي تم تحديدها من خلال مسارات التعرض المختلفة.

103- ومستقبلات التلوث التي غالبًا ما تكون عُرضة للخطر في المواقع الملوثة بالزئبق هي:

1-1-7 البشر

104- تتفاوت، في البشر وبعض الحيوانات، الآثار المحتملة للتسمم بالزئبق وأعراضه وذلك حسب الشكل الكيميائي للزئبق ومسار التعرض (الاستنشاق أو البلع) وجرعة التعرض، بما في ذلك زمن التعرض وتركيز الزئبق.

105- بالنسبة لكل سكان المنطقة التي يوجد فيها موقع ملوث بالزئبق، تكون مسارات التعرض الرئيسية المحتملة على النحو التالي:

- تنفس الزئبق و/أو الغبار (الامتصاص عن طريق الاستنشاق).
- الأكل (الامتصاص عن طريق البلع). يُعتَبر الزئبق الذي يُبتلَع في الطعام، أنه على الأغلب في شكل ميثيل الزئبق (مركب عضوي من الزئبق).
- ملامسة الجلد.

2-1-7 الحيوانات البرية

بوجه عام، فإن أعراض التسمم المسجلة في الحيوانات لحالات التسمم بالزئبق ليست محددة وتعتمد على مسار التعرض، كما هو الحال في البشر.

3-1-7 الكائنات الحية المائية

106- هناك عوامل عديدة تؤثر على السُمِّية المحتملة للزئبق في الكائنات الحية المائية. ومن بينها شكل الزئبق ومرحلة تطور الكائنات الحية المتأثرة وكيمياء الماء.

107- تؤدي التغيرات في درجة حرارة الماء وملوحته وعُسْره إلى تغير أيضًا في درجة سمية الزئبق على الكائنات الحية.

108- من المُسلَّم به على نطاق واسع أن شكل الزئبق الأكثر سُمِّية هو **ميثيل الزئبق**. ولكي تحدث المَثْيَلة، هناك حاجة إلى توفر ظروف الاختزال (وهي تركيز منخفض من الأكسجين). ومن المعروف جيدًا أن الفعل الجرثومي يعزز المَثْيَلة، وهي العملية الرئيسية المسؤولة عن تحول الزئبق غير العضوي إلى صيغة عضوية قادرة على الدخول من خلال السلسلة الغذائية.

109- في النظم المائية، تعتبر الأسماك هي المستقبلات الرئيسية للزئبق عن طريق البلع؛ لأنها معرضة للزئبق في كلٍّ من الماء ومن خلال بلع النباتات واللافقاريات الكبيرة.

110- يمكن أيضًا للأسماك واللافقاريات الكبيرة مثل المحار أن تمتص الزئبق من خلال الخياشيم.

111- قد تكون اللافقاريات الكبيرة معرضة أيضًا للزئبق الموجود في الرواسب، وكذلك أنواع الأسماك التي تتغذى على المواد المترسبة على الجزء العلوي من الرواسب. ونظرًا لوضعها في قمة السلسلة الغذائية في النظم المائية، فمن المفترض أن يكون لدى الأسماك أعلى تركيز من الزئبق من كل أنواع الكائنات الحية المائية.

4-1-7 النباتات

112- النباتات بوجه عام غير حساسة لأشكال الزئبق غير العضوية (أي الزئبق الأوَّلِي والزئبق الأيوني)، ربما بسبب المستوى المرتفع من امتصاص المعادن بواسطة جسيمات التربة. ويمنع هذا إلى حدٍ كبيرٍ امتصاص الزئبق والسُّمِّية في النباتات، التي عادةً لا تتركز فيها معادن ثقيلة[7]، لكنها تُظهر فرص الحصول على أشكال الزئبق العضوية، مثل ميثيل الزئبق، أكثر منه إلى الأشكال غير العضوية.

2-7 تقييم التعرض

113- في هذه المرحلة، نحن على علم بمسارات التعرض والمستقبلات والتركيزات والسُّمِّية.

114- يتمثل تقييم التعرض في دمج نتائج تقييمات المخاطر الخاصة بالبشر والنظم الإيكولوجية مع دراسات التشتت لتقييم درجة حركية الملوثات وتحليل تركيزاتها في الوسائط المختلفة التي تتعرض للتأثر.

115- مصادر التعرض التي ينبغي النظر فيها في الموقع الملوث بالزئبق هي الوسائط التي تم تحليلها في التوصيف البيئي، وهي: الجسيمات المعلقة، والانبعاثات الغازية، والمياه السطحية، والمياه الجوفية، والتربة، والرواسب.

3-7 توصيف المخاطر

116-توصيف المخاطر هو المرحلة الأخيرة في عملية تقييم المخاطر. خلال هذه المرحلة، يتم تقييم احتمال حدوث الآثار السلبية بسبب التعرض للزئبق، ووضع الأسس اللازمة للإجراءات المستقبلية.

117-بالإضافة إلى ذلك، يتم تحليل البيانات والاستنتاجات المأخوذة من المراحل التي تم فيها استعراض الخصائص السُّمِّية وآثار الملوثات الخطيرة، علاوةً على تقييم التعرض. ويتم دمج كل هذه البيانات مع الأساس المنطقي وراء النموذج المفاهيمي المقترح.

118-بالنسبة لصحة الإنسان، تتم مقارنة جرعة الملوثات التي يتعرض لها الفرد (تُحسَب على أساس توصيف سيناريو التعرض) بالقيم المرجعية السُّمِّية المحددة لهذه المادة وطبقات السكان.

119- ينبغي الحصول على النتائج التالية:

أ- استنتاجات بشأن المخاطر الحقيقية للتلوث في الموقع على المستقبلات من البشر والنظم الإيكولوجية، علاوةً على مخاطر التشتت (المخاطر المستقبلية).
ب- تقدير مستوى عدم اليقين في تحليل المخاطر؛ من أجل التقييم الدقيق لاستنتاجات التوصيف.

120- يمكن إجراء هذه المرحلة بمساعدة برنامج معتمد لتبسيط العمليات الحسابية، مع الأخذ بعين الاعتبار أنه ينبغي إثبات ملاءمته للخصائص المحددة وظروف الموقع. وخلاف ذلك ينبغي استخدام طريقة أخرى لإجراء العمليات الحسابية. وإذا تم استخدام ذلك البرنامج، فعندئذٍ ينبغي تقديم لقطات من العملية؛ لتأكيد القيم التي تم إدخالها والاستنتاجات المتوصل إليها.

121- تم وضع نُهُج مختلفة لمرحلة توصيف المخاطر، كل نهج منها متوفر له البرنامج التجاري المخصص له، مثل:

[7] التدابير الوقائية ضد تلوث البيئة بالزئبق وآثاره على الصحة. جمعية الصحة العامة باليابان، 2002.

- الإجراءات التصحيحية على أساس المخاطر
- تقييم المخاطر المحتملة
- تقييم السُّمِّية المباشرة على أساس التكنولوجيا الحيوية

8- معالجة المواقع الملوثة بالزئبق

122- تعتمد تدابير المعالجة للمناطق الملوثة بالزئبق على عوامل مختلفة ترتبط أساسًا بالموقع نفسه وبالتأثير المحتمل على البيئة وصحة الإنسان.

123- يمكن النظر في استخدام تكنولوجيا واحدة أو أكثر من تكنولوجيات المعالجة، مع الأخذ بعين الاعتبار نتائج دراسة الموقع، ومستويات التنظيف المستهدفة، وقدرة تكنولوجيات المعالجة المتاحة، والاستخدام المستهدف للموقع في المستقبل.

124- فيما يلي العوامل الرئيسية التي تؤثر على اختيار مجموعة أولية من تكنولوجيات المعالجة:

أ- المستقبلات (المياه السطحية و/أو المياه الجوفية أو التربة أو الهواء أو الكائنات الحية أو البشر...).
ب- الحركية (المحتملة) للزئبق في النظام الهيدرولوجي.
ج- إمكانية ارتشاح الزئبق من التربة أو الرواسب.
د- المصدر الثابت للتلوث.
ه- تركيزات الزئبق في المستقبلات من البشر والحيوانات والنباتات، التي تشير إلى مستويات التعرض.
و- الحالات الكيميائية للزئبق في الموقع الملوث.
ز- التوافر البيولوجي في الكائنات الحية المائية واللافقاريات والنباتات الصالحة للأكل.
ح- كمية الزئبق المنبعثة أثناء العمليات.
ط- إمكانية مَثْيَلة الزئبق.
ي- التلوث الأساسي بالزئبق وترسب الزئبق في الغلاف الجوي الإقليمي غير المرتبط بالمصادر المحلية.
ك- لوائح التنظيف المحلية/الوطنية للمياه والتربة/الرواسب والهواء.
ل- في حالة عمليات التعدين، من المهم أن نعرف بدقة التكوينات الجيولوجية التي أدت إلى استخلاص الزئبق؛ من أجل عدم تضمينها باعتبارها تربة ملوثة بسبب أنشطة التعدين.

125- بمجرد تقييم هذه العوامل، يمكن البدء في تحليل أكثر شمولاً لتقنيات المعالجة المناسبة.

126- تبعًا لخطورة التلوث بالزئبق والملوثات الأخرى وحجم ذلك التلوث ودرجته ونوعه وتبعًا للمستقبلات، من المحتمل أن تشتمل خطة الإصلاح على العديد من تقنيات أو تدابير المعالجة لاحتواء أو الحد من مقدار أو سُمِّية التلوث بشكل فعال وبكفاءة قدر الإمكان.

127- فيما يلي بيان لبعض خيارات المعالجة للوسائط الملوثة بالزئبق. ويمكن استخدام هذه التقنيات - منفردةً أو مجتمعةً - في معالجة الموقع الملوث. وبوجه عام، يكمن الهدف من التقنيات المُدْرَجة فيما يلي، في إصلاح المنطقة عن طريق إزالة الزئبق.

128- كما ورد في النقطة 3.2.3، هناك احتمال لتقييد استخدام المنطقة الملوثة والحد من الوصول إليها، على الأقل حتى يمكن بدء العمل على إصلاح الموقع.

129- بدلاً من ذلك، يمكن احتواء الموقع عن طريق إحكام إغلاقه باستخدام مواد طبيعية مثل الطين أو مواد جيوصناعية مثل أوراق البوليثين عالي الكثافة؛ وذلك لمنع تبخر الزئبق وارتشاحه.

130- بالإضافة إلى ذلك، يمكن نقل النفايات لتخزينها بشكل آمن في المدافن المصممة لهذا الغرض.

131- ثمة خيار آخر وهو اقتراح وسائل معالجة مختلفة لكل منطقة أو منتج في المنطقة الملوثة بالزئبق.

8- 1 معالجة النفايات السائلة أو التربة الملوثة بالزئبق[8]

132- يمكن استخدام تقنيات متعددة لمعالجة النفايات السائلة الملوثة بالزئبق. وبعض هذه العمليات مجرد عمليات فيزيائية (الترسب)، وبعضها فيزيائية كيميائية (التخثر والتندف، الامتزاز.... إلخ)، وبعضها الآخر كيميائية (الأكسدة والاختزال، الترسيب.... إلخ). ويعتمد الاختيار المناسب على عوامل مختلفة، وعلى رأسها انتواع العنصر ووجود عوامل أخرى.

133- تتناول النقطة 8-1-1 بشكل محدد معالجة المياه الجوفية والمياه السطحية

أ- الترسيب

134- يُعد ترسيب الزئبق في شكل أملاح غير قابلة للذوبان من الممارسات الأكثر شيوعًا في معالجة النفايات السائلة.

135- المُرسِّب الرئيسي هو الكبريتيد. ويُعد كبريتيد الزئبق واحدًا من أكثر الأملاح غير القابلة للذوبان، وهو الشكل الذي يوجد فيه معظم الزئبق الموجود في القشرة الأرضية (الزنجفر).

136- درجة الحموضة المثلى للتفاعل هي 7. ويتم بعد ذلك تعريض الراسب المتكون إلى عملية ترسب، التي يمكن أن يساهم في إنجازها إضافة عوامل التندف إليها. وتتراوح قيم تركيز الزئبق بعد ترسيب الكبريتيد بين 10 و100 ميكروغرام/لتر.

137- تنطوي هذه العملية على بعض المساوئ، مثل تكوُّن كميات كبيرة من الحمأة التي تتطلب معالجة لاحقة، وتكوُّن أنواع قابلة للذوبان؛ بسبب زيادة وجود الكبريتيد. ولهذا ليست هذه العملية هي المعالجة الأكثر ملاءمةً للنفايات السائلة الملوثة بالزئبق.

ب- الامتزاز

138- تؤدي عمليات المعالجة التي تتضمن الامتزاز إلى إنتاج تركيز زئبق بمستويات أقل من تلك التي يتم الحصول عليها عن طريق الترسيب. وكلما ازداد تركيز المازَّة، انخفضت مستويات الزئبق المتبقي. وهناك عوامل أخرى تؤثر على هذه العملية، وهي درجة الحموضة وانتواع الزئبق.

المازَّة الأكثر استخدامًا هي الكربون المنشط. وتكون عادةً في شكل كربون منشط حُبيبي، ويكون فيها حجم جسيمات الكربون كبيرًا نسبيًا ويمكن استخدامه لتعبئة الأعمدة.

ج- التبادل الأيوني

139- هذه الوسيلة هي إحدى وسائل المعالجة الرئيسية للنفايات السائلة المحتوية على الزئبق. ويمكن لمجموعة كبيرة من الراتنجات التقاط أنواع الزئبق المختلفة. وهذه التكنولوجيا مصممة في المقام الأول لربط الزئبق الأيوني. وهي غير فعالة كثيرًا لمركبات الزئبق العضوية أو الزئبق الأوَّلي.

140- وتُجرَى هذه العملية في الأعمدة أو الخزانات المملوءة بالراتنج المطابق والمجهزة بنظم لإدخال وإخراج النفايات السائلة، وكذلك مياه نظيفة للشطف، وإعادة إنتاج المحلول.

141- تنطوي نظم التبادل الأيوني على العديد من المزايا، وهي أنها تعمل حسب الحاجة، وغير حساسة نسبيًا للتغيرات التي تحدث في النفايات السائلة، وأنها يمكن أن تحقق قيم تركيز تصل إلى الصفر، علاوةً على توفر مجموعة كبيرة من الراتنجات. أما المساوئ فتشتمل

[8] (المصدر: وكالة حماية البيئة 1997)

على الاستنفاد المفاجئ للسعة، وهو ما يعني أنه يجب رصد العملية بشكل مستمر، وتوليد نفايات مائية مالحة تحتوي على الزئبق، التي يجب معالجتها، علاوةً على المشاكل المحتملة عند استخدام هذه العملية مع مياه تحتوي على مستوى عالٍ من المواد الصلبة المذابة.

د- الأكسدة والاختزال

142- في بعض الحالات، تُستخدم عمليتا الأكسدة والاختزال لتغيير حالة أكسدة الزئبق، وبالتالي تعزيز إذابته أو تصفيقه.

143- تُستخدم الأكسدة في النفايات السائلة التي تحتوي على الزئبق المعدني أو المركبات العضوية المعدنية لتحويلها إلى الشكل الأيوني أو لتذويبها لتكون هاليد زئبق. ويمكن أن تتم العملية في مفاعلات ذات تدفق على دفعات أو كُتَلي. ويتم فصل أملاح الزئبق عن مصفوفات مواد النفايات، ومن ثم يتم إرسالها لمزيدٍ من المعالجة، على سبيل المثال استخلاص الأحماض أو الترسيب.

144- المؤكسِدات الأكثر شيوعًا هي هيبوكلوريت الصوديوم، والأوزون، وبيروكسيد الهيدروجين، وثاني أكسيد الكلور، وغاز الكلور. يُستخدم الاختزال كوسيلة لإزالة الزئبق الموجود في المحلول في شكل زئبق معدني، ومن ثم لترسيبه أو ترشيحه أو نبذه، على سبيل المثال. وعوامل الاختزال الأكثر شيوعًا هي الألومنيوم، والحديد، والزنك، والهيدرازين، والكلوريد القصديري، وبوروهيدريد الصوديوم.

145- معدل إزالة التلوث مرتفع في عمليات الاختزال عندما يكون تركيز الزئبق مرتفعًا نسبيًا (حتى 2 غم/لتر). ومع ذلك، تقل فعالية العملية عندما تكون مستويات الزئبق منخفضة. وفي هذه الحالة، تكون هناك حاجة إلى معالجة إضافية.

ه-أخرى

146- حققت طرق أخرى لمعالجة النفايات السائلة الملوثة بالزئبق نتائج جيدة مثل عمليات الفصل الغشائي (مثل الترشيح الفائق والتناضح العكسي).

147- هذه الوسائل الأخرى _بعضها في مرحلة التجربة_ عبارة عن وسائل معالجة بيولوجية (كائنات حية دقيقة يمكن أن تمتص الزئبق أو تختزله)، والاستخلاص الغشائي للمستحلبات السائلة، والتحفيز الضوئي الشمسي بثنائي أكسيد التيتانيوم.

1-1-8 تكنولوجيا معالجة المياه الجوفية والمياه السطحية (بيستر، 2013)

148- في الكثير من الحالات، قد لا تكون إزالة الملوثات ممكنة، وقد يكون الاحتواء الهيدرولي ضروريًا لحماية البيئة المحيطة. وفي هذه الحالات، تُعد تكنولوجيا الضخ والمعالجة هي التكنولوجيا الأكثر استخدامًا حاليًا لمعالجة المياه الجوفية والمياه السطحية. وتشتمل نظم الضخ والمعالجة _في الأساس_ على تركيب آبار الاستخلاص تحت مستوى المياه الجوفية داخل منطقة التلوث أو بانحدار قليلٍ تحتها. ونظرًا لبقاء كتلة التلوث في باطن الأرض، يجب تشغيل نظم الضخ والمعالجة بشكل دائم؛ لمنع انتقالها خارج الموقع. ونظرًا لوجوب معالجة المياه المستخلصة على السطح، ينبغي اختيار معدل التنسيب والضخ الجيد؛ لضمان استخلاص المياه الجوفية الملوثة والحد من استخلاص المياه النظيفة. ويجب تركيب آبار الرصد حول عمود الملوثات لتقييم الملوثات وتقييم الظروف الهيدروجيوكيميائية.

149- بالنسبة لتركيزات الزئبق العالية، تكون تكنولوجيات المعالجة مشابهة لعمليات استخلاص الزئبق من النفايات السائلة الصناعية على النحو المبين من قبل (محلول ملحي زئبقي من مياه صرف كلورية قلوية.... إلخ). وتشتمل معالجة كميات كبيرة من المياه الملوثة التي تتيح الوصول إلى تركيزات أقل من أهداف المعالجة، على العديد من خطوات المعالجة التي قد تتضمن على سبيل المثال: الكبرتة والاختزال الكيميائي (الهيدرازين)، والترسيب المشترك والامتزاز والتبادل الأيوني. وهذه التكنولوجيات فعالة للتركيزات العالية (أكبر من 1 ملغ/لتر) ومعدل التدفق المنخفض (أقل من 10 م3/ساعة). وغالبًا ما تُستخدم في وحدات المعالجة على دفعات. ولا بد من مراعاة أن هذه المعالجة ذات معدل التدفق المنخفض قد تحد من قدرة الضخ على التقاط عمود التلوث.

150- بالنسبة للتركيزات المنخفضة (< 10 ميكروغرام زئبق/لتر)، فإن تقنية المعالجة الأكثر استحسانًا هي ترشيح المياه الجوفية باستخدام الكربون الحُبيبي المنشط بالكبريت (انظر الجدول التالي).

151- تكنولوجيات الترشيح الأكثر استخدامًا لإزالة الزئبق من المياه (HPC AG فرايبورغ، 2011):

	الكربون الحُبيبي المنشط المعدل	**الكربون المنشط الحُبيبي المُشرَّب بالكبريت**	**راتنجات التبادل الأيوني (على سبيل المثال أمبوليت)**
مصدر المعلومات	المُوَرّد	المُوَرّد	المُوَرّد
المبدأ	الامتصاص أو الامتزاز	التبادل الأيوني والامتصاص أو الامتزاز الكبريتي	التبادل الأيوني على مجموعة ثيول (-SH)
الكفاءة (ميكروغرام زئبق/لتر)	< 1	< 1	< 1
سعة الامتزاز (غم زئبق/كغم من وسائط الترشيح)	4 (5-3)	8 (10-5)	50
التكاليف (يورو/كغم من وسائط الترشيح)	3,6	4,5	40
التكلفة النوعية (يورو/غم زئبق)	0,9 (1,2-0,7)	0,56 (0,9-0,45)	0,8

152- يبين الجدول أعلاه سعة الترشيح المنخفضة وسعة الامتزاز الخاصة بالكربون المنشط الحُبيبي. وعلاوةً على ذلك، تتسم حركية الامتصاص أو الامتزاز في الكربون المنشط الحُبيبي بأنها منخفضة، وبالتالي ينخفض معدل التدفق للحصول على ترشيح فعال وإزالة الزئبق من الماء. ويجب أن يؤخذ بعين الاعتبار أيضًا أن الزئبق غالبًا ما يكون مرتبطًا بمركبات عضوية و/أو غير عضوية أخرى في مصفوفة مياه معقدة (عالية أو منخفضة الحموضة، عالية الملوحة) مما يسبب امتصاص أو امتزاز تفضيلي وانخفاض حاد في كفاءة الترشيح التقليدي باستخدام الكربون المنشط الحُبيبي.

153- يتسبب انخفاض الحركية وسعة الامتزاز المصحوب بارتفاع التكلفة النوعية، في ارتفاع التكاليف الرأسمالية والتشغيل والصيانة لعملية المعالجة التقليدية باستخدام تكنولوجيات التبادل الأيوني والكربون المنشط الحُبيبي.

154- على أي حال، يتم إنتاج نفايات زئبقية مثل الطين والمرشحات والكربون الحُبيبي المُشبَّع، التي يجب معالجتها على غرار نفايات الزئبق.

2-8 معالجة النفايات الصلبة الملوثة بالزئبق [9]

155- لقد تم تصنيف معالجات النفايات الصلبة الملوثة بالزئبق إلى أربع فئات:

أ- المعالجات الحرارية (التقطير بالمعوجة أو التحميص، من بين معالجات أخرى)

ب) التصليب/التثبيت (بما في ذلك الملغمة)

أ- الغسل/استخلاص الأحماض

ب- التزجيج

أ- **المعالجات الحرارية** الامتزاز الحراري والتقطير بالمعوجة وسيلتان شائعتان للمعالجة الحرارية الكاملة للنفايات الملوثة بالزئبق ولمعالجة التربة والرواسب.

156- وتؤدي هذه المعالجات إلى تطاير الزئبق عن طريق الانتقال الحراري منخفض الضغط، الذي يعقبه التكثيف على سطح بارد.

157- إن الزئبق الأوَّلِي الذي يتم تجميعه بهذه الطريقة يمكن إعادة استخدامه في العمليات أو تخزينه. وينبغي معالجة الانبعاثات الغازية؛ لتجنب انبعاثات الزئبق أو غيره من المكونات.

أ-1 التقطير بالمعوجة/التحميص (المصدر: مجلس TRC 1998I)

158- يتم إرسال النفايات التي عُولِجَت معالجةً أولية إلى وحدة امتزاز أو تقطير بالمعوجة، حيث يتم تسخينها في ضغط منخفض لتبخير الزئبق. وقد يكون التسخين مباشرًا من خلال الاحتكاك بغازات الاحتراق أو غير مباشر من خلال جدار معدني (على سبيل المثال التسخين الكهربائي).

159- عندما تكون وحدات الامتزاز قيد التشغيل، يتم تحريك النفايات داخلها بشكل مستمر. وتؤدي هذه الحركة إلى زيادة الانتقال الحراري والكُتَلي، مما يؤدي إلى ارتفاع معدلات التبخر. في المقابل، تتسم النفايات الموجودة في وحدات التقطير بالمعوجة والتحميص بأنها ثابتة.

160- وحدات الامتزاز الأكثر شيوعًا عبارة عن أفران دائرية ذات تسخين مباشر ونُظُم لولبية ذات تسخين غير مباشر.

161- تتطلب نظم المباشر التسخين كميات كبيرة من غازات الاحتراق عند معالجة كمية كبيرة من النفايات. وبناءً على ذلك، ثمة حاجة لنظم مراقبة معقدة، كما يجب معالجة الانبعاثات الغازية. وفي هذه الحالات، قد تكون تكاليف الاستثمار والتشغيل أعلى منها في نظام التسخين غير المباشر، الذي لا يختلط فيه غاز الاحتراق بالنفايات الخطرة.

أ-2 معالجة الغاز

162-يتم ترشيح الغازات من نظام التقطير بالمعوجة من خلال مرشحات قماشية لإزالة الجسيمات. بعد ذلك، يتم تبريد الغاز في مُكثِّف لتحويل الزئبق الغازي إلى سائل. ومن ثم تتم معالجة الغاز في نُظُم تحكم تتألف من مرشحات كربون منشط ومؤكسِدات حفازة؛ لالتقاط أي تسرب لبخار الزئبق والمواد العضوية المتطايرة.

ب- **التصليب/تثبيت التصليب** والتثبيت عمليتان فيزيائيتان كيميائيتان تؤديان إلى خفض حركية الزئبق إلى حد معين من خلال تغليفه فيزيائيًا (التصليب) أو تكوين روابط كيميائية معه (التثبيت). وتُعد الملغمة، وهي تكوُّن خليط صلب أو شبه صلب من الزئبق مع معادن أخرى، شكلاً من أشكال التصليب.

163- هناك نوعان رئيسيان من عمليات التصليب:

[9] المصدر: تكنولوجيات معالجة الزئبق في التربة والنفايات والمياه، وكالة حماية البيئة 2007

- الكبسلة الدقيقة: يتم سكب مادة التغليف على كتلة النفايات وحولها.
- الكبسلة الدقيقة: يتم خلط النفايات بمادة التغليف قبل حدوث التصليب.

ب-1 التثبيت باستخدام الكبريت

164- تتألف هذه العملية من تحويل الزئبق السائل إلى كبريتيد الزئبق (HgS)، وهو الشكل الأكثر غير القابل للذوبان، والأكثر شيوعًا في الطبيعة.

165- هناك شكلان بلوريان من كبريتيد الزئبق: كبريتيد الزئبق ألفا وكبريتيد الزئبق بيتا، وكلاهما غير قابل للذوبان عمليًا، ولهما قابلية للذوبان في الماء متشابهة جدًا بينهما.

166- إذا كانت النفايات تحتوي على زئبق أوَّلي، يتم خلط الزئبق مع الكبريتيد في درجة حرارة الغرفة وتحريكهما بسرعة. وتكون الطاقة الناتجة عن الخلط كافية لإحداث التنشيط. وبدلاً من ذلك، يمكن إجراء تفاعل بين بخار الزئبق والكبريتيد داخل وحدة الخلط مع جوٍ خامل؛ لمنع تكوُّن أكسيد الزئبق.

167- ينبغي تجنب أكسدة الزئبق وتحوله إلى أكسيد الزئبق؛ لأن هذا النوع يُعد أكثر قابلية للذوبان من الكبريت. ولذلك، يُنصح بالعمل في جو خامل وإضافة مضادات الأكسدة (Na2S).

ب-2 التثبيت بالكبريت والبوليمر

168- هذا تعديل لعملية المعالجة بالكبريت. وهو يتمثل في تركيز الزئبق من خلال تفاعل مع الكبريت، يعقبه تصليب/كبسلة دقيقة في مصفوفة من البوليمر.

169-يتم تنفيذه في خطوتين:

1- التثبيت: التفاعل بين الزئبق الأوَّلي وأسمنت الكبريت والبوليمر، (وهو خليط من 95٪ كبريت و5٪ بولي سيكلو بنتادين).

2- التصليب (والكبسلة الدقيقة): التسخين حتى 135 درجة مئوية.

170- هناك العديد من المزايا لهذه العملية، وهي أن الناتج الذي يتم الحصول عليه أحادي الليثية وله مساحة سطحية محددة منخفضة. وبالتالي يكون أقل تطايرًا ويقل احتمال الارتشاح.

ب-3 الملغمة

171- تتمثل هذه العملية في تكوُّن خليط من الزئبق مع معادن أخرى (الملغمة). كلما زاد تركيز المعدن، أصبح الخليط المملغم أكثر صلابةً. والمعادن الأكثر استخدامًا هي: النحاس، والسيلينيوم، والنيكل، والزنك، والقصدير. ولتسريع العملية، تُضاف حُبيبات دقيقة من المعادن إلى الزئبق.

ب-4 عوامل التثبيت - عوامل التصليب الأخرى

172- المواد الأخرى التي تُستخدم وسيطًا في هذه العمليات هي: الأسمنت، ومتعدد كبريتيد الكالسيوم، وفوسفات السيراميك المترابط كيميائيًا، والفوسفات، والبلاتين، وراتنجات البوليستر، وغيرها.

173- من بين المصفوفات المختلفة المستخدمة في عمليات التصليب، يمكننا التمييز بين تلك التي تتطلب تثبيتًا سابقًا للمادة الخام، وتلك التي لا تتطلب ذلك. ويعتمد هذا التمييز على قوة المادة؛ لضمان عدم انبعاث الزئبق.

ج- **الغسل/الاستخلاص** تُستخدم عملية غسل التربة واستخلاص الأحماض للمعالجة خارج الموقع للتربة والرواسب الملوثة بالزئبق.

174- غسل التربة عملية قائمة على الماء تستخدم مزيجًا من الفصل الفيزيائي لحجم الجسيمات والفصل الكيميائي المائي لخفض تركيزات الملوثات في التربة. وتعتمد هذه العملية على المفهوم القائل بأن معظم الملوثات تميل إلى الارتباط بجسيمات أصغر في التربة (الطين والطمي)، بدلاً من الجسيمات الأكبر (الرمل والحصى). ويُمكن استخدام طرق فيزيائية لفصل الجسيمات الكبيرة النظيفة نسبيًا من الجسيمات الصغيرة؛ لأن الجسيمات الصغيرة مرتبطة بالجسيمات الكبيرة من خلال عمليات فيزيائية (الانضغاط والالتصاق). وبالتالي تقوم هذه العملية بتجميع التلوث المرتبط بالجسيمات الصغيرة؛ لإخضاعه لمعالجة إضافية.

175- تشمل الوسائل الشائع استخدامها لمعالجة المياه المستعملة، التبادل الأيوني والاستخلاص بالمذيبات.

176- تستخدم عملية استخلاص الأحماض، مادة كيميائية مستخلِصة مثل حمض الهيدروكلوريك أو حمض الكبريتيك لاستخلاص الملوثات من مصفوفة صلبة عن طريق تذويبها في الحمض. ويتم بعد ذلك فصل المرحلتين الصلبة والسائلة باستخدام فرَّازات مخروطية مائية، ويتم نقل المواد الصلبة إلى نظام شطف، حيث يتم شطفها بالماء لإزالة الأحماض والملوثات التي سُحِبَت معها.

177- قد تحتاج المواد الصلبة المترسبة إلى معالجة إضافية، أو ربما يتم التخلص منها في مطمر للنفايات، وبعد ذلك تتم معالجة سائل استخلاص الأحماض ومياه الشطف لإزالة المعادن الثقيلة.

178- الميزة الرئيسية لغسل التربة /استخلاص الأحماض، هي أنه يتم فصل الملوثات الخطرة من التربة والرواسب، مما يقلل من حجم النفايات الخطرة المقرر معالجتها/التخلص منها. تعتمد عملية غسل التربة وقابليتها للتطبيق على عوامل، مثل نوع التربة وتكوينها وتجانسها وتوزع حجم الجسيمات والكربون العضوي الكلي الموجود فيها. علاوةً على ذلك، يمكن لتركيبات الملوثات المعقدة وغير المتجانسة أن تجعل من الصعب إعداد محلول غسل بسيط، مما يتطلب استخدام عمليات غسل متعددة ومتتالية لإزالة الملوثات.

د- تستخدم عملية **التزجيج** تيارًا كهربائيًا لتسخين مادة المعالجة المستخدمة وتذويبها وتزجيجها، وبالتالي دمجها في المنتج النهائي المُزجَّج، الذي يتسم بأنه ثابت كيميائيًا ومقاوم للارتشاح. ويتم نقل التيار الكهربائي إلى التربة عن طريق إدخال مجموعة من الأقطاب الكهربائية عموديًا في سطح المنطقة الملوثة.

179- يمكن أن تصل درجة حرارة التربة الملوثة إلى ما بين 1.600 و2.000 درجة مئوية. ويمكن لكل مادة معالجة ذائبة واحدة أن تعالج منطقة يصل حجمها إلى 1.000 طن.

180- يُستخدم التزجيج لمعالجة النفايات حتى عمق 6 أمتار. وتُعالَج المناطق الملوثة الكبيرة في كتل متعددة تلتحم مع بعضها لتُكوّن منطقة معالَجَة كبيرة واحدة.

181- يجب تجميع الغازات الناتجة وإرسالها إلى وحدة معالجة. وقد تتكوَّن أيضًا مواد الديوكسين والفوران عند وجود كميات زائدة من الكلوريدات ودخولها إلى نظام معالجة الغازات المنبعثة.

182- قد يكون من الصعب معالجة الزئبق؛ بسبب ارتفاع قابليته للتطاير وانخفاض قابليته للذوبان في الزجاج (أقل من 0.1 في المائة)، لكن قد يُعالَج بشكل فعال في التركيزات المنخفضة.

183- عادةً ستتبخر الكلوريدات التي يزيد وزنها عن 0.5 في المائة وتدخل الانبعاثات الغازية. وإذا تركَّزت الكلوريدات بشكل مفرط، فقد تتراكم أملاح المعادن القلوية والأرضية القلوية والثقيلة في المخلفات الصلبة التي يتم تجميعها بواسطة معالجة الانبعاثات الغازية. ولذلك قد يكون من الضروري فصل أملاح الكلوريد عن المخلفات، إذا كان يتم إعادة المخلفات إلى العملية للمعالجة.

يقدم الجدول التالي ملخصًا لإيجابيات وسلبيات أكثر الاستراتيجيات والعلاجات المعتادة:

التكنولوجيا	المبدأ	المزايا الرئيسية	العيوب الرئيسية	الزئبق المستهدف	الحالة
إزالة المصدر بالحفر	حفر المواد الملوثة في المنطقة الملوثة بالكامل أو بالأخص في النقاط الساخنة التي تتركز فيها كتل الزئبق	توفير علاج كامل، جذري مع عدم تبقي أي تركيزات لإدارتها إذا كانت المنطقة بكاملها محفورة	قد تكون مكلفة؛ بسبب القيود الصحية وقيود السلامة المتعلقة بالعاملين والمحيطين. خطر إعادة تحرك الزئبق الأوَّلي غير المستقر. القيود الجيوتقنية؛ بسبب مستوى المياه الجوفية أو البنى الأساسية نقل التربة الملوثة إلى مدن النفايات ضرورة وجود مطمر نفايات مصمم هندسيًا لنفايات الزئبق في حالة إزالة البقع الساخنة فقط، إدارة التربة غير المحفورة المتبقية بتكنولوجيات أخرى.	الزئبق غير المستقر الكلي	تكنولوجيا موثوقة ولكنها تنطوي على صعوبات ملازمة لظهور الزئبق
الاحتواء في الموقع باستخدام الحواجز الرأسية والتغطية	عزل المناطق الملوثة الموجودة في الطبقة تحت السطحية عن البيئة المحيطة غير الملوثة	- بسيطة نسبيًا وسريعة التنفيذ - تستخدم معدات البناء العادية - يمكن أن تكون أكثر توفيرًا من الحفر وإزالة النفايات، والمعالجة الحرارية - يمكن تطبيقها على مناطق كبيرة أو كميات كبيرة من النفايات - تتجنب استخدام الفراغ أحادي الخلية والمخاطر المرتبطة بالإزالة والنقل - توفر معالجة تامة لكل الزئبق الموجود في المنطقة المستهدفة - توفر نظامًا سلبيًا بشكل نسبي لا يعتمد على الإدارة الإيجابية	يبقى الزئبق في الموقع ولا يحدث انخفاض في السُّمِّية والكميات، وهذا ينطوي على خطورة محتملة حال فشل عملية الاحتواء أو تدهورها القيود الجيوتقنية؛ بسبب البنى الأساسية الموجودة الحواجز الرأسية مقيدة بعمق أقل من 20 مترًا؛ بسبب زيادة تكاليف رأس المال. المعالجة بالأبخرة عبر تغطية صرف الغاز	الزئبق غير المستقر الكلي	سهولة توفر مجموعة متنوعة من مواد الحواجز

التكنولوجيا	المبدأ	المزايا الرئيسية	العيوب الرئيسية	الزئبق المستهدف	الحالة
غسل التربة بالمعالجة الأولية (فصل ميكانيكي)	تقنية خارج الموقع يتم من خلالها غسل التربة والمواد الملوثة، عادةً بالمياه أو بمحاليل حمضية تأكسدية. يمكن معالجة وإعادة تدوير مياه ومحاليل الغسل	إمكانية إعادة استخدام المواد المعالجة في الموقع للطمر. تقليل النفايات المطلوب معالجتها/دفنها	- مطلوب إزالة المصدر - قد تتطلب إجراء معالجة أولية للمواد مع الفصل الفيزيائي، والفرز، والطحن - تزداد الصعوبة التقنية حسب نوع التربة والملوثات - لا يمكن تطبيق الوسائل التكنولوجية إلا مع معالجة الأحجام المهمة؛ وذلك بسبب التكاليف.		
شل حركته في الموقع: التثبيت والتصليب، والملغمة مع التخلص في الموقع أو خارج الموقع	تفاعل كيميائي (تثبيت) وتغليف فيزيائي (تصليب) للحد من المخاطر المحتملة للمواد الملوَّثة بتحويل الملوِّثات إلى أشكال أقل قابلية للذوبان، أو أقل قابلية للتطاير، أو أقل قابلية للتحرك، أو أقل سُمِّية. التخلص في الموقع أو خارج الموقع في مدافن نفايات مصممة بطريقة هندسية خاصة ومرخَّص لها باستقبال نفايات الزئبق.	- خفض تصنيف النفايات بالوصول إلى معايير القبول المتعلقة بالارتشاح، - الحدّ من المخاطر أثناء النقل - السماح بالاحتواء في مدافن نفايات مصممة بطريقة هندسية خاصة (أحادية الخلية).	- تتطلب الحفر - تتطلب إجراء اختبارات خاصة بالموقع في المختبر والتطبيق على نطاق تجريبي قبل التطبيق على نطاق واسع - إمكانية تخميل الزئبق الأولي أثناء الخلط وعدم كفاءة المعالجة عندما يتقطر الزئبق الغازي (Hg°) (محتوى الزئبق الأوَّلي عالٍ) - زيادة إجمالي حجم النفايات - ثبات الوسائط المستقرة لفترة طويلة غير مؤكد أو لم يتم تقييمه مع المواد الكاشفة - أثر الكربون عند نقل النفايات خارج الموقع - زيادة تكاليف كميات النفايات الضخمة (من 800 إلى 1000 يورو لكل طن) - تتطلب الرصد لفترات طويلة	الزئبق غير المستقر الكلي، وبالأخص الزئبق الغازي (Hg°)	

التكنولوجيا	المبدأ	المزايا الرئيسية	العيوب الرئيسية	الزئبق المستهدف	الحالة
الامتزاز الحراري في الموقع (ISTD)	تسخين التربة الملوثة في الموقع لإحداث تطيير مباشر – إزالة المنتجات المتطايرة من خلال استخلاص بخار التربة.	- لا تتطلب حفرًا - استخلاص انتقائي للزئبق غير المستقر (الذي يمثل مشكلة بيئية) - مدة العملية قصيرة	- قد تكون مكلفة وصعبة التطبيق من الناحية الفنية - تتطلب شبكات ثقوب حفر مجمعة كثيفة لاستخلاص بخار التربة + التسخين - تجب معالجة الزئبق المتجمع في نظام معالجة الأبخرة، - يجب التحكم في انبعاثات بخار الزئبق المتطايرة، - ستكون المعالجة الثانوية لمجاري مياه الصرف من المياه المتكثفة معقدة - استهلاك كبير للطاقة	الزئبق الغازي (Hg°) والزئبق غير العضوي	انتشر الامتزاز الحراري في الموقع (ISTD) تجاريًا على نطاق واسع فيما يتعلق بمعالجة المركبات العضوية التي لها نقطة غليان عالية.
الامتزاز الحراري خارج الموقع (ESTD)	الامتزاز الحراري خارج الموقع هو عملية مستمرة تُجرَى عادة في الأفران الدوَّارة (أو ما يكافئها)	- استعادة الزئبق وفصله عن المواد التي يمكن إعادة استخدامها للطمر في الموقع - كفاءة عالية في الحد من التلوث	- تتطلب الحفر التخزين المؤقت - ستتطلب إعادة المعالجة - استهلاك كبير للطاقة - يجب التحكم في انبعاثات بخار الزئبق المتطايرة - تجب معالجة الزئبق المتجمع في نظام معالجة الأبخرة - ستكون المعالجة الثانوية لمجاري مياه الصرف من المياه المتكثفة معقدة	الزئبق الغازي (Hg°) والزئبق غير العضوي	انتشر الامتزاز الحراري خارج الموقع (ESTD) تجاريًا على نطاق واسع فيما يتعلق بمعالجة الزئبق فقط مع التركيزات المنخفضة (< 10 ملغم زئبق/كغم).

التكنولوجيا	المبدأ	المزايا الرئيسية	العيوب الرئيسية	الزئبق المستهدف	الحالة
التقطير بالمعوجة على دفعات	عملية خارج الموقع يتم فيها تسخين التربة الملوثة بطريقة مُتحكَّم بها – تطيير المُلوِّثات (مثل الزئبق) والتي تتم استعادتها بعد ذلك من الغازات المنبعثة.	- الامتزاز الحراري في ظروف محكومة - استعادة الزئبق وفصله عن المواد التي يمكن إعادة استخدامها للطمر في الموقع - كفاءة عالية في الحد من التلوث	- تتطلب الحفر التخزين المؤقت - محدودة بسعات المعالجة التي تتراوح من طن واحد إلى خمسة أطنان في اليوم - مكلفة، وتستهلك طاقة كبيرة، وتحتاج إلى معالجة للأبخرة، وجهد مناولة كبير وفترات معالجة طويلة (من سنة واحدة إلى 10 سنوات استنادًا إلى السعة 5 أطنان في اليوم)	الزئبق الغازي (Hg^0) والزئبق غير العضوي	انتشرت تجاريًا على نطاق واسع مع الكميات الصغيرة للمواد الملوثة بدرجة كبيرة
التزجيج في الموقع (ISV)	عملية حرارة عالية تشل حركة المُلوّثات بدمجها في مصفوفة مزججة متينة ومقاومة للارتشاح	- كفاءة عالية في الحد من التلوث، - لا تتطلب حفرًا	- على الأرجح صعوبة وتكلفة التشغيل والصيانة من الناحية التقنية - تتطلب إجراء اختبارات خاصة بالموقع على نطاق تجريبي قبل التطبيق على نطاق واسع - تتطلب شبكات ثقوب حفر مجمعة كثيفة لاستخلاص بخار التربة + التسخين - تجب معالجة الزئبق المتجمع في نظام معالجة الأبخرة. ويجب التحكم في انبعاثات بخار الزئبق المتطايرة - ستكون المعالجة الثانوية لمجاري مياه الصرف من المياه المتكثفة معقدة - استهلاك كبير للطاقة - ثبات الوسائط مشلولة الحركة في الموقع لفترة طويلة غير مؤكد أو لم يتم تقييمه (الاستقرار المؤقت للمادة الزجاجية)	جميع أشكال وتكوينات الزئبق	إفادة بتطبيق واحد على نطاق واسع مع معالجة خارج الموقع في الولايات المتحدة الأمريكية بخصوص نفايات الزئبق.

3-8 تدابير السلامة. الوقاية من المخاطر المهنية أثناء أعمال التنظيف

184- قد تؤدي مهام المعالجة إلى التعرض للزئبق وجميع المخاطر التي ينطوي عليها ذلك، إضافةً إلى كل المخاطر المعتادة المرتبطة بالنشاط نفسه. ولتجنب المخاطر، يلزم معرفة مستويات الزئبق التي يتعرض لها العاملون.

185- الرصد البيئي لتركيز التكسين في الهواء هو الوسيلة الرئيسية في الوقاية من المخاطر المهنية المرتبطة بالصحة عمومًا، والمتعلقة بالزئبق على وجه الخصوص. وهناك شكلان للرصد البيئي. الأول يتضمن أخذ عينات للهواء في منطقة العمل. والثاني يركز على العاملين ويتضمن أخذ عينات لمستوى تعرض العاملين أثناء يوم عملهم، حيث يتحرك العاملون في المعتاد من مكان لآخر أثناء اليوم.

186- هناك وسيلة مراقبة أخرى لكل عامل يتعرض للتلوث على حدى، وهي الرصد البيولوجي. ويقيس إجراء الصحة المهنية هذا التكسين المحتمل، وهو في هذه الحالة الزئبق، ويقيس مستقلباته أو تأثيره الكيميائي غير المرغوب فيه في عينة بيولوجية؛ وذلك بغرض تقييم تعرض الأفراد.

187- تُعرَف هذه القياسات بالمؤشرات البيولوجية للتعرض لمواد كيميائية أو الواسمات البيولوجية. ويقيس الرصد البيولوجي كمية المادة التي تم امتصاصها، بغض النظر عن المسار. وهو يضع في الاعتبار مسارات القضاء على التلوث، وخصائص سُمِّية مادة التلوث وديناميات سُمِّيتها. وكتدبير وقائي، ينبغي إجراء الرصد البيولوجي بصورة منتظمة ومتكررة، ولكن ينبغي عدم الخلط بينه وبين إجراءات تشخيص الأمراض المهنية.

188- وقيم حد التعرض البيئي اليومي للزئبق ومركبات الزئبق غير العضوية ثنائية التكافؤ، بما في ذلك أكسيد الزئبق وكلوريد الزئبق (مَقيسة في الزئبق)، هي 0.02 ملغم/م3، حيث يتم قياسها أو حسابها لفترة مرجعية قدرها 8 ساعات. وتأتي هذه القيم وفقًا لتوجيه اللجنة 2009/161/EU والذي يحدد قائمة ثالثة لقيم إرشادية لحد التعرض المهني.

189- هناك عدة إجراءات للتحديد البيئي للزئبق. ويمكن استخدام النظام الإيجابي والنظام السلبي على حدٍ سواء. وسيعتمد اختيار النظام على نوع التقييم المطلوب، والظروف المساعدة والتقنيات المتوفرة، إلى جانب شكل المادة المُلوِّثة. ويمكن استخدام أجهزة أخذ القراءات المباشرة لقياس تركيز بعينه.

190- تتضمن الطريقة الأكثر شيوعًا حبس الزئبق في صورة بخار. ويتحقق هذا عادةً باستخدام الأنابيب المازَّة (هوبكليت، وثاني أكسيد المنغنيز والكربون المنشط، وغيرها) أو الراصدات السلبية (على سبيل المثال، صفائح الذهب والفضة) التي تؤدي إلى ملغمة الزئبق. وعند حبس الزئبق في الأنابيب المازَّة، تتحدد الكمية عادةً باستخدام قياس الطيف الضوئي للامتصاص الذري. وفي حالة استخدام الراصدات السلبية، يتم قياس التفاوتات في الموصلية الكهربائية عمومًا. وإذا كان الزئبق في صورة جسيمات (مسحوق)، يتم حبسه في مرشحات ويتم تحليله باستخدام قياس الطيف الضوئي للامتصاص الذري. كذلك يمكن استخدام التقنيات الكهروكيميائية، مثل التخطيط الاستقطابي وقياس كمون التعرية للتحديد التحليلي.

191- يمكن تعيين مؤشرات بيولوجية للزئبق الأوَّلي والمكونات غير العضوية. وهي بارامترات مناسبة في الوسائط البيولوجية من أي عامل (بول ودم)، ويمكن قياسها في وقت محدد.

192- يمكن تعيين قيمة الحد البيولوجي لإجمالي الزئبق غير العضوي في البول عند 35 ميكروغرام/غم من الكرياتين قبل يوم العمل، أي بعد 16 ساعة دون تعرض للزئبق. ويمكن تعيين قيمة حد إجمالي الزئبق غير العضوي في الدم عند 15 ميكروغرم/لتر في نهاية أسبوع العمل، أي بعد 4 أو 5 أيام متعاقبة من التعرض في العمل. وتقابل هذه القيم حدود التعرض المهني للمواد الكيميائية في إسبانيا (المعهد الوطني للسلامة والصحة في العمل، 2012).

193- يمكن أن تقلل التدابير الوقائية من مستويات تعرض العاملين للمواد الكيميائية. وتشتمل هذه التدابير على أنظمة التهوية التي تزيد من معدل تجديد الهواء في أماكن العمل. حيث يتم ضخ الهواء النظيف في منطقة العمل وطرد الهواء الملوث لمعالجته في مرشحات

كربون منشط. إضافةً إلى ذلك، يمكن ارتداء ملابس واقية، مثل أقنعة الفم والأنف التي تستخدم مرشحات زئبق (Hg P3)، وفقًا للمعايير الأوروبية لحماية الجهاز التنفسي (EN 141: 2000).

4-8 الرصد البيئي مطلوب أثناء أعمال المعالجة

194- ينبغي أن تشتمل مشروعات المعالجة البيئية للمواقع الملوثة بالزئبق على خطة للرصد البيئي (EMP) إلى جانب أنشطة المعالجة نفسها.

195- الهدف من خطة الرصد البيئي هو تحديد وتقييم الأثر البيئي أو الأضرار البيئية في المنطقة المحيطة بالموقع الملوث المطلوب معالجته، في كل مراحل أعمال المعالجة. وهكذا، ستصف خطة الرصد البيئي التدابير المناسبة؛ للتخفيف من الآثار البيئية السلبية لنشاط المعالجة أو لتجنبها. وستنطبق التدابير على تخطيط نشاط المعالجة وموقعه، وإجراءات المعالجة، والتنقية، والآليات العامة لحماية البيئة.

196- ستعمل خطة الرصد البيئي لأنشطة المعالجة في الموقع الملوث على تحديد أنشطة الرصد والقياس. وستنقسم القياسات إلى مجموعتين:

1- القياسات التي تتم أثناء تنفيذ أعمال المعالجة.
2- القياسات التي تتم بعد أعمال المعالجة أو أنشطة الرصد.

197- في هاتين المجموعتين، سيكون هناك تركيز خاص على:

- جودة المياه السطحية والمياه الجوفية.
- انبعاثات الجسيمات والغازات التي تؤثر على جودة حياة سكان المنطقة.

198- إضافةً إلى ذلك، سيتم رصد أنشطة المعالجة عن طريق الرقابة الطبوغرافية وعمل سجل فوتوغرافي لها. وكذلك سيتم تجميع بيانات الأرصاد الجوية.

199- ستحدد خطة الرصد البيئي طريقة رصد أعمال المعالجة: نوع التقارير المطلوبة، ومحتوى التقارير، وتواترها، ومتى ستصدر في إطار مشروع المعالجة.

200- سيتم إجراء مراقبة جودة أعمال المعالجة والجوانب البيئية المهمة التي تم تحديدها للمشروع (في مراحل التخطيط، والتنفيذ والصيانة) وفقًا للمبادئ التوجيهية المحددة في خطة الرصد البيئي. ويرد في نهاية الفصل مثال للجوانب الرئيسية المطلوب تضمينها في خطة الرصد البيئي لمشروع المعالجة في الموقع الملوث بالزئبق.

5-8 رصد ومراقبة النتائج المتوقعة والأنشطة المُنفّذة

201- بعد تحديد خيار المعالجة، ينبغي وضع خطة رصد ومن ثم تنفيذها وإدارتها. وستحدد هذه الخطة الأوقات والأماكن التي سيتم فيها الرصد لتقييم تقدم أعمال المعالجة والتأكيد على أن الأهداف قد تحققت، وأن الموقع لم يعد يُشكِّل خطرًا على صحة الإنسان أو البيئة.

202- يعتمد تخطيط وتنفيذ خطة الرصد بدرجة كبيرة على نوع المعالجة التي يتم تنفيذها والموقع الملوث. وينبغي أن يكون الرصد مصحوبًا بتقييم للمؤشرات؛ وذلك للتحقق مما إذا كان هناك تقدم قد تم إحرازه في مختلف الأنشطة التي تُشكِّل جزءًا من النظام أو المشروع الخاضع للتقييم.

203- ينبغي أن تهدف مؤشرات الرصد والرقابة الأساسية إلى التحقق مما يلي:

- تنفيذ العمليات داخل الموقع الملوث الذي تمت معالجته وفقًا للخطة.
- أنظمة الحماية البيئية تعمل بالضبط كما هو مقترح في مشروع المعالجة.
- الامتثال لشروط الاستخدام المُصرَّح به للموقع الملوث.

204- ينبغي تقييم المؤشرات التالية على الأقل أثناء الفترة التي تحددها السلطة المعنية:

1- بيانات الأرصاد الجوية. من الضروري تحديد بيانات الأرصاد الجوية التي سيتم جمعها من الموقع:

- حجم الترسيب (القيم اليومية والشهرية)
- الحد الأقصى والحد الأدنى لدرجة الحرارة (المعدل الشهري)
- اتجاه وقوة الرياح السائدة
- التبخر (القيم اليومية والشهرية)
- الرطوبة في الغلاف الجوي (المعدل الشهري)

2- بيانات الانبعاثات:

- رصد المياه السطحية عند نقاط تمثيلية. رصد المياه السطحية **ينبغي إجراؤه عند نقطتين أو أكثر**، بما في ذلك باتجاه منبع المياه بالموقع وباتجاه مصب المياه بالموقع.

  وسيتم أخذ العينات في مواسم مختلفة، ويُفضَّل كل ستة أشهر. وستختلف البارامترات وفقًا لخصائص الموقع المطلوب معالجته. وفي حالة تلوث الزئبق، ينبغي أن تشتمل البارامترات على تركيز الزئبق والمعادن الثقيلة الأخرى، والأنيونات، ودرجة الحموضة، والموصلية.... إلخ.
- رصد المياه الجوفية. سيتم إجراء هذا عند نقطة واحدة، أو أكثر، واقعة باتجاه المنبع من مدخل الموقع، وفقًا لاتجاه تدفق المياه الجوفية، وعند نقطتين باتجاه المصب من مخرج الموقع.

  يمكن زيادة عدد نقاط الرصد على أساس المسح الهيدروجيولوجي للموقع.

  سيكون تواتر أخذ العينات حسب كل موقع وسيتحدد على أساس معرفة وتقييم معدل تدفق المياه الجوفية. وتشتمل البارامترات الموصى بها على درجة الحموضة، والموصلية، والمعادن الثقيلة والأنيونات.

- رصد انبعاثات وجسيمات بخار الزئبق التي بها محتوى زئبق. ينبغي أن تكون شبكة الرصد محددة داخل وخارج الموقع المطلوب معالجته؛ وذلك لتحديد المستويات البيئية للزئبق، وبالتالي التحقق من فعالية إجراءات المعالجة.

3- مسح أخذ العينات من التربة

205-تعتمد مدة خطة الرصد وتواتر أخذ العينات وتجميع البيانات بصفة عامة على السلطات البيئية.

يوضح الجدول التالي بعض البارامترات الرئيسية التي ينبغي تضمينها في خطة الرصد الخاصة بمشروع المعالجة في الموقع الملوث بالزئبق، وذلك أثناء أنشطة المعالجة وبعد اكتمال المشروع.

خطة الرصد			
الوسط المرصود	تواتر الرصد	الموقع	بارامترات الرصد
المياه السطحية	شهريًا، أول سنتين	باتجاه منبع المياه في المناطق المحيطة **مباشرة** بالموقع المطلوب معالجته	درجة الحرارة درجة الحموضة الموصلية الأكسجين المذاب جهد الأكسدة والاختزال (Eh) النتريتات طلب الأكسجين الكيميائي (COD) الأمونيا الزئبق
		باتجاه مصب المياه في المناطق المحيطة **مباشرة** بالموقع المطلوب معالجته	
	كل ستة أشهر، السنوات المتبقية	باتجاه منبع المياه في المنطقة **القريبة** من الموقع المطلوب معالجته	درجة الحرارة درجة الحموضة الموصلية المعادن الثقيلة: الزئبق.
		باتجاه مصب المياه في المنطقة **القريبة** من الموقع المطلوب معالجته	درجة الحرارة درجة الحموضة الموصلية المعادن الثقيلة: الزئبق
	سنويًا	باتجاه منبع المياه في المنطقة **البعيدة** عن الموقع المطلوب معالجته	درجة الحرارة درجة الحموضة الموصلية الزئبق
		باتجاه مصب المياه في المنطقة **البعيدة** عن الموقع المطلوب معالجته	
المياه الجوفية	شهريًا، أول سنتين	الحفر حول الموقع المطلوب معالجته	الزئبق
	كل ستة أشهر، السنوات المتبقية	الحفر حول الموقع المطلوب معالجته	الزئبق
	سنويًا	الآبار والينابيع حول الموقع المطلوب معالجته	درجة الحموضة، الموصلية، البيكربونات ($HCO3^-$)، الكبريتات ($SO4^{2-}$) ، الكلوريد (Cl^-)، أيونات الكالسيوم (Ca^{2+})، أيونات المغنيسيوم (Mg^{2+})، أيونات الصوديوم (Na^+)، النترات ($NO3^-$)، النتريت ($NO2^-$)، الأمونيوم ($NH4^+$)، الزئبق
رصد بيانات الأرصاد الجوية	شهريًا	الموقع والمناطق المحيطة	اتجاه الرياح السائدة، وسرعتها وتواترها
رصد مستوى الزئبق في الهواء	شهريًا، أول سنتين كل ثلاثة أشهر، السنوات المتبقية	الموقع والمناطق المحيطة	مستوى الزئبق في الهواء
رصد مستوى الزئبق في المواد العالقة	شهريًا، أول سنتين كل ثلاثة أشهر، السنوات المتبقية	الموقع والمناطق المحيطة	مستوى الزئبق في الجسيمات العالقة

الملحق الأول: دراسات الحالة

1- تجديد مناجم ألمادين.
2- إزالة التلوث من سد فليكس في نهر إيبرو.
3- إيقاف تشغيل مصنع كلور وقلويات يستخدم خلايا زئبقية بطريقة آمنة بيئيًا
4- تثبيت التربة الملوثة بمعادن ثقيلة باستخدام أكسيد مغنيسيوم منخفض المرتبة الحرارية

إخلاء المسؤولية القانونية: دراسات الحالة هذه هي مجموعة غير شاملة لمشروعات أُجرِيَت مؤخرًا لإزالة التلوث بالزئبق، وهي تُقدَّم للأغراض الإرشادية فقط، ولا تلمح ضمنيًا بالضرورة إلى أي اعتماد أو موافقة من قِبَل خطة عمل البحر الأبيض المتوسط التابعة لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP/MAP) بشأن جميع الإجراءات المستخدمة في كل موقع من المواقع ومستويات التلوث التي قد تبقى فيها.

دراسة الحالة الأولى: تجديد ركام خبث "CERCO DE SAN TEODORO". مناجم ألمادين (في ثيوداد ريال، إسبانيا).

الخلفية

Minas de Almadén y Arrayanes, S.A. (MAYASA) هي شركة عامة تتبع مؤسسة Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI)، والتي تدير مناجم الزئبق في بلدة ألمادين (بمدينة ثيوداد ريال).

لقد بدأ نشاط التعدين في بلدة ألمادين منذ أكثر من 2،000 عام، حيث كان إنتاجها يبلغ ثلث إنتاج العالم.

لقد اكتُشِف مجمع ألمادين للتعدين والصناعات المعدنية في المناطق المعروفة باسم "de San Teodoro Cerco"، بالقرب من المنطقة الحضرية والطريق إلى قرطبة. ويحتوي الموقع على مناجم قديمة وأخرى ظلت تعمل حتى تموز/يوليو 2003.

قامت شركة Minas de Almadén في عام 2005 بأهم مشروع بيئي في تاريخها: وهو تجديد ركام خبث "Cerco de San Teodoro".

ركام خبث "CERCO SAN TEODORO". أيار/مايو 2005. صورة بواسطة موقع Paisajes Españoles

طيلة قرون عديدة ظل ركام خبث "Cerco de San Teodoro" مقلبًا للنفايات المجدبة الناتجة عن عمليات التعدين والخبث الناتج عن عمليات الصناعات المعدنية، حيث بلغ حجمه 3،5 ملايين طن، وبلغت المساحة التي يغطيها 10 هكتارات.

الإجراء

لتحديد نموذج الإصلاح الذي ينبغي اتباعه، تم عمل مجموعة من الدراسات لركام الخبث والمنطقة المحيطة. وخلص موجز لهذه الدراسات إلى أن **المواد التي تم التخلص منها في ركام الخبث خطرة بسبب محتوى الزئبق بها** وأن نفاذية الطبقة التحتية منخفضة، مع عدم وجود كسور أو تغيرات صخرية ملحوظة من شأنها أن تُشكِّل مسارات صرف مميزة.

بوضع هذه الاعتبارات في الحسبان، تقرر إجراء **تجديد لركام الخبث عبر عملية تغليف في الموقع؛ لضمان منع تسرب الماء من الجزء العلوي من الركام، ومنع إعادة الطمر وبالتالي الحد من آثاره على المياه الجوفية والمياه السطحية، إلى جانب الحد من تشتت المواد المدفونة في الركام التي قد تؤثر على التربة المحيطة.**

لقد استغرقت عملية تجديد ركام خبث "Cerco de San Teodoro" من عام 2005 إلى عام 2008 وقاربت تكلفتها 9 ملايين يورو.

بالإضافة إلى المهام البيئية المذكورة آنفًا، حوَّلت عملية تجديد ركام خبث "Cerco de San Teodoro" مجمع التعدين والصناعات المعدنية إلى ساحة اجتماعية وثقافية مفتوحة للعامة: متنزه مجمع ألمادين للتعدين (www.parqueminerodealmaden.es).

المنهجية المستخدمة

يقع ركام الخبث في أقصى الشرق من المنطقة الحضرية وهو مرتفع طبوغرافيًا مقارنةً بالتضاريس المحيطة به، وموقعه معروف جيدًا، حيث يحده من الجنوب طريق قرطبة، ومن الغرب ممتلكات أخرى، ومن الشمال الطريق إلى مدينة فيرجن ديل كاستيلو.

لقد تم تكويم المواد في ركام خبث خارج "Cerco de San Teodoro" امتد إلى الجنوب الشرقي والشمال الغربي، حول موقع التعدين، وفي ركام ثانٍ داخل Cerco في منطقة أقصى الجنوب الغربي.

أسفرت الدراسات التي تصف ركام الخبث والمنطقة المحيطة عن البيانات التالية:

المواد المكونة

- نفايات صناعات معدنية قديمة
- نفايات صناعات حالية
- نفايات تعدين
- غير ذلك

الآثار البيئية

- الخطر الهيدرولوجي
- الخطر الجوي
- استخدام الأرض
- الآثار على النباتات والحيوانات، العمليات الجيوفيزيائية –الطابع المورفولوجي والمناظر الطبيعية، والارتشاح

لقد تم وضع خطة العمل التالية للوفاء بالأهداف المحددة:

أ- تكوين ركام الخبث

كان الهدف من هذه المرحلة إعادة تشكيل ركام الخبث؛ لتحسين ثباته ودمجه في المنطقة المحيطة به. وللقيام بذلك، تم نقل المواد من أحد أجزاء الركام إلى آخر لتقليل انحدار الجوانب، وهو ما أتاح لاحقًا وضع حزمة جيوصناعية؛ لمنع التسرب من الركام.

إعادة تشكيل ركام خبث "CERCO DE SAN TEODORO" آذار/مارس 2006. صورة بواسطة موقع Paisajes Españoles

ب- منع التسرب من ركام الخبث

كان الهدف منع تسرب المياه داخل الركام، وبالتالي منع تكوُّن السوائل المرشحة، وتشتت المواد من خلال العزل الفيزيائي والحراري ومنع تبخر الزئبق عبر سطح الركام بالكامل. وقد تم وضع حزمة جيوصناعية من 5 طبقات.

تتألف حزمة منع التسرب من: طبقة نسيج أرضي، وطبقة غطاء بنتونيت، وطبقة بولي إيثيلين عالي الكثافة، وطبقة مركب جيولوجي للتصريف، وطبقة نهائية من شبكة جيولوجية معززة، أو خلايا جيولوجية، حسب درجة انحدار الجوانب بعد إعادة التشكيل.

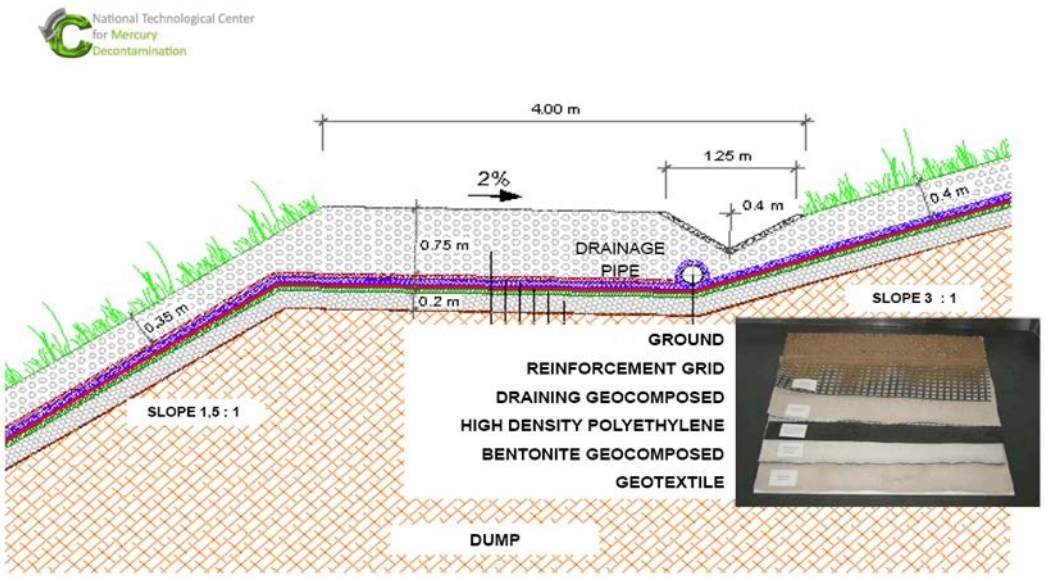
ركام خبث "CERCO DE SAN TEODORO" آذار/مارس 2007

الحزمة الجيوصناعية لها وظائف مختلفة:

- النسيج الأرضي: تمنع طبقة النسيج الأرضي الاختراق.
- طبقة غطاء بنتونيت: تُكسِب هذه الطبقة السطح خصائص مانعة لتسرب الماء، حيث تقلل من تكوُّن السوائل المرشحة وتسرُّب الغاز.

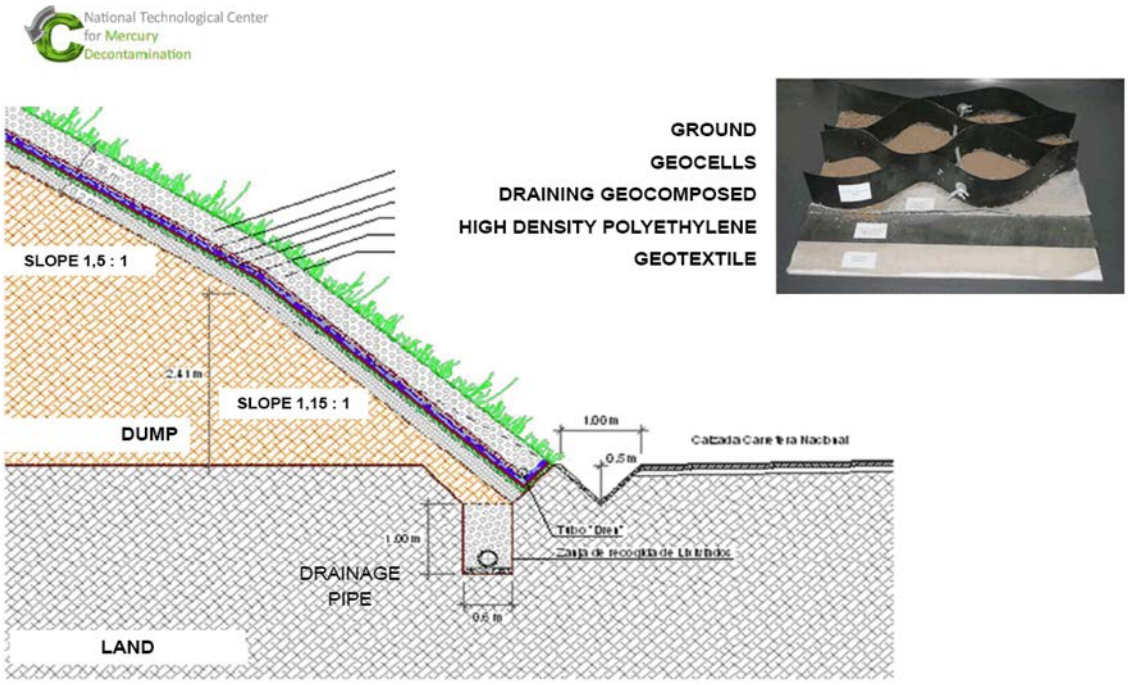
- طبقة بولي إيثيلين عالي الكثافة: المكون الرئيسي للحزمة الجيوصناعية، فهو الذي يضمن أن تكون المنطقة ممنوعة التسرب غير مُنفذَّة بالكامل.
- المركب الجيولوجي للتصريف: ينقل هذا المركب الماء، حيث يفصل ويرشح التربة التي يوضع عليها المركب الجيولوجي.
- شبكة جيولوجية معززة مرنة 80 كيلو نيوتن/متر: يعمل تركيب هذه الطبقة على تحسين ثبات الأرض على سطح معظم المنحدرات في الركام.
- الخلايا الجيولوجية: الخلايا الجيولوجية للتصريف مصنوعة من شرائط من البولي إيثيلين عالي الكثافة، حيث تُوضع لتثبيت الأرض على المنحدرات الشديدة.

توضح الصور التالية توزيع الحزمة الجيوصناعية، حسب المنحدر.



SEALING SURFACE SCHEME

LOW INCLINATION SLOPE



SEALING SURFACE SCHEME

HIGH INCLINATION SLOPE

ج- تركيب نظام لتجميع المياه، وإعادة تدويرها وتفريغها

تهدف هذه المرحلة من المعالجة إلى منع التعرية التي قد تؤثر على ثبات ركام الخبث. ولقد تم تركيب نظام لتجميع المياه وإعادة تدويرها وتفريغها، من خلال بناء خنادق، وأنابيب تصريف وقنوات محيطية تقوم بتجميع جريان المياه السطحي وتمنع أي تعرية في المستقبل، وهو ما سيؤثر على ثبات المنحدرات.

د- استعادة الغطاء النباتي

يهدف هذا الإجراء إلى استعادة الحياة النباتية على السطح المجدد ودمج ركام الخبث في البيئة المحيطة. وللقيام بهذا، أُضيف للسطح بالكامل طبقة من الأرض سُمكها 50 سم، وبمساحة إجمالية بلغت 180،000 متر^3، وتلى ذلك عملية البذر المائي الميكانيكية لمساحة 16 هكتار للمساعدة في تجديد الغطاء النباتي.

ركام خبث "CERCO SAN TEODORO" كانون الثاني/يناير 2008 صورة بواسطة موقع Paisajes Españoles

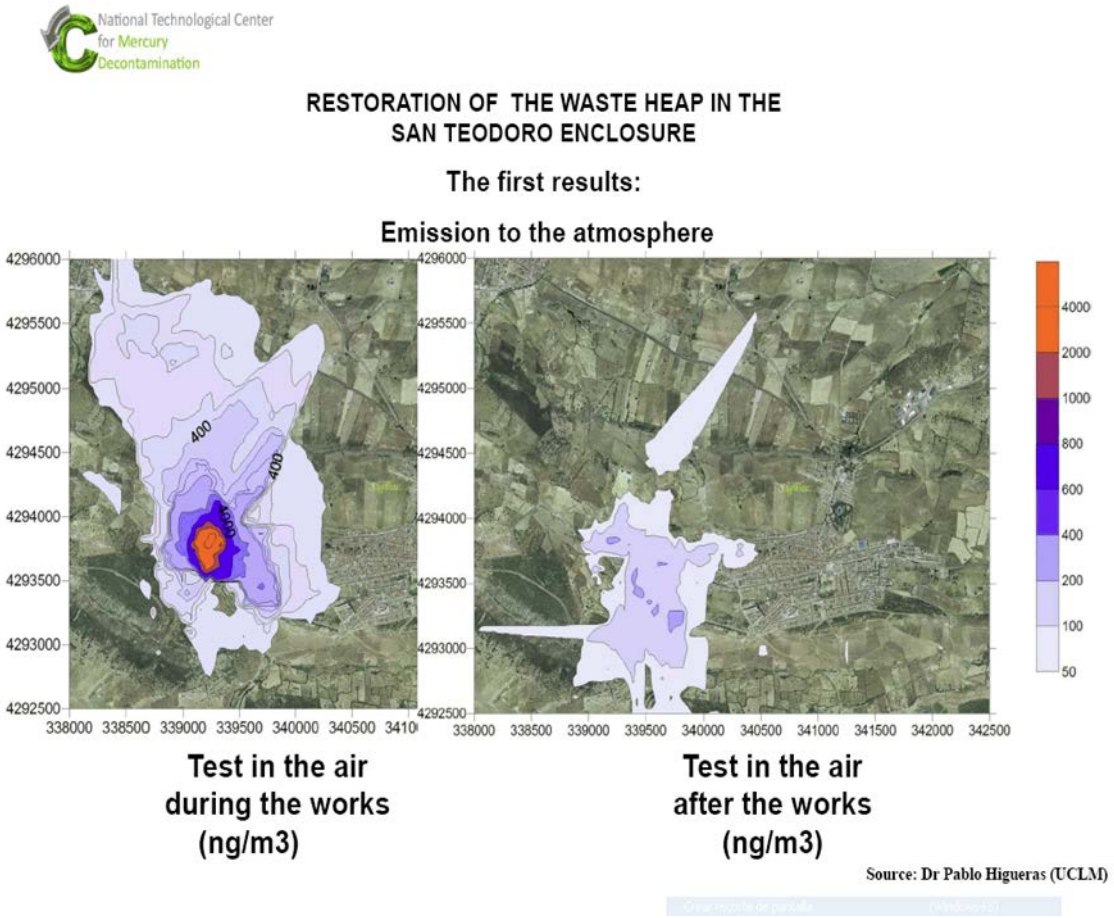
تقييم النتائج والاستنتاجات

منذ انتهاء أعمال التجديد في عام 2008، كانت النتائج المُلاحظَة الأكثر وضوحًا:

- دمج ركام الخبث في المناظر الطبيعية المحيطة.
- التخلص من تشتت النفايات في المنطقة المجاورة.
- مستويات مقبولة من تبخر الزئبق في الجو.
- تكوُّن السوائل المرشحة منعدم تقريبًا، دون أي تسرب في المجاري القريبة أو المياه الجوفية.

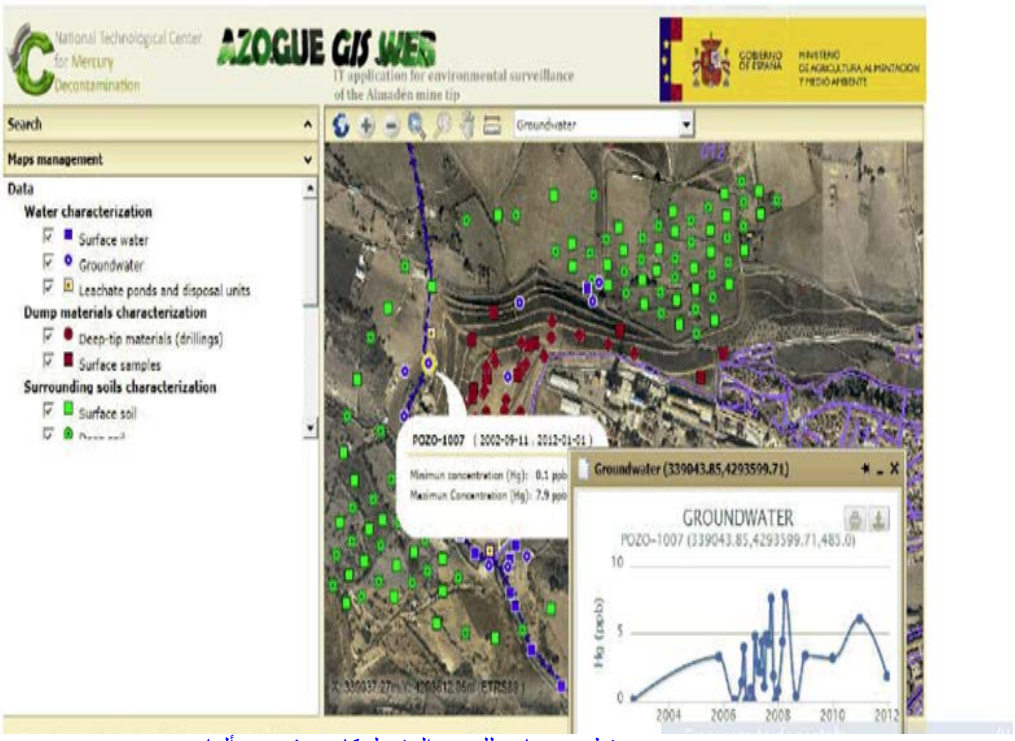
تم الالتزام بمراقبة الجودة خلال مسار العمل، بالتوازي مع الجوانب البيئية المهمة المحددة للمشروع، وفقًا لخطة الرصد البيئي المحددة لمشروع التجديد.

تستمر حاليًا عملية رصد ما بعد الاكتمال المحددة في خطة الرصد البيئي. وحتى الآن، فإن النتيجة المشاهدة الأكثر موثوقية هي انخفاض مستويات الزئبق في الهواء، كما يظهر في الأرقام التالية من دراسة انبعاثات الهواء التي أُجرِيَت أثناء عمليات التجديد وبعدها.



فيما يتعلق بجودة المياه، وبالرغم من التحسن الملحوظ في بعض المياه السطحية، يتطلب الأمر المزيد من الوقت قبل الحصول على نتائج أفضل من ذلك.

يمكن متابعة تطور البيانات التحليلية لهذه المياه على موقع الويب "Centro Tecnológico Nacional para la Descontaminación de Mercurio (CTNDM): http://www.CTNDM.es/proyectos/1-in.php حيث يتم تفريغ البيانات التي يتم الحصول عليها شهريًا ضمن خطة الرصد البيئي للتجديد، والتي تشتمل على تجميع عينات شهرية من عدد من النقاط في المياه السطحية والمياه الجوفية حول ركام الخبث.



تطبيق برنامج للرصد البيئي لركام خبث منجم ألمادين

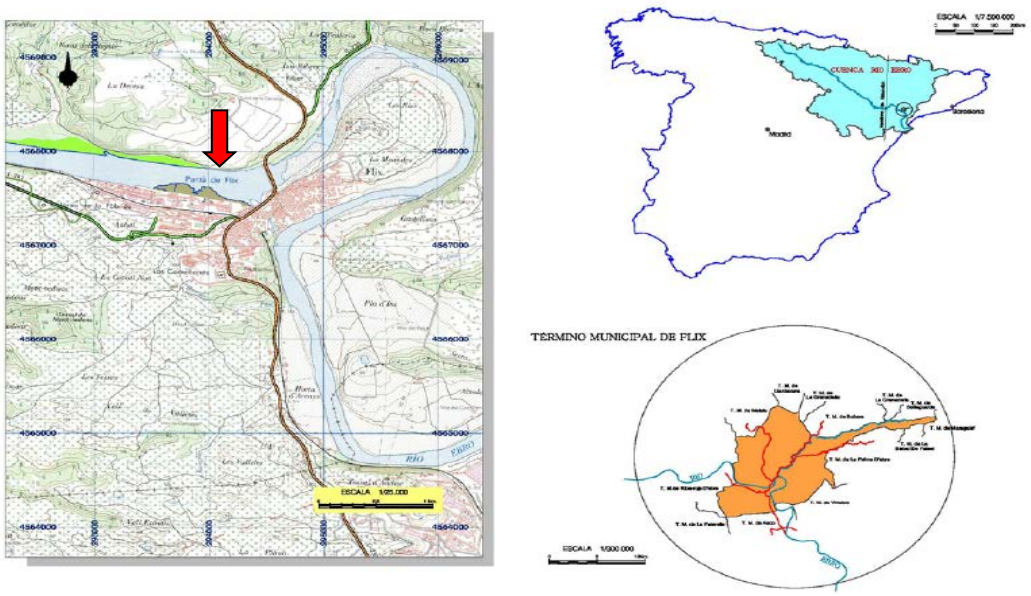
in.php-http://www.ctndm.es/proyectos/1

دراسة الحالة 2: إزالة التلوث من سد فليكس في نهر إيبرو (تاراغونا، إسبانيا)

أصحاب الدراسة: مارك بوجولس، مدير المشروع، وغارسيا باليستيروس، نائب مدير الهندسة والبناء. **ACUAMED**.

ملخص

يحتفظ سد فليكس، الموجود على خط الامتداد السفلي لنهر إيبروا، في حوضه بستمائة ألف متر مكعب من الحمأة الناتجة بشكل أساسي من مصنع مواد كيميائية موجود على الضفة اليمنى من النهر. وقد كانت هذه الحمأة المنتج المتبقي من عمليات المصنع، وهي تتكون من مواد كيميائية ومركبات خاملة. وهناك ثلاث مجموعات رئيسية للمُلوّثات: مركبات الكلور العضوية (مع المُلوثات العضوية الثابتة مثل مادة الدي تي "DDT" والمركبات ثنائية الفينيل متعدد الكلور)، والمعادن الثقيلة (الزئبق بشكل أساسي) والنويدات المشعة.



مكان الموقع الملوث على ضفة نهر إيبرو

تركيز المُلوّثات في الوحل مرتفع نسبيًا، ويُحتمل إمكانية تحركها، وفي الحقيقة قد حدث هذا التحرك فعلاً — كما هو موضح في سجل سلسلة الأحداث الخاصة والذي يُظهِر تجاوز الحدود المسموح بها بخصوص المركبات الضارة في النظام البيئي.

في ضوء هذا الوضع، قررت وزارة البيئة الإسبانية البدء في عملية تخطيط، وتحليل، وتطوير، ومقارنة، وأخيرًا اختيار الوسائل اللازمة لمعالجة مشكلة تحرُّك هذه العناصر السامة في البيئة ومنعه، أو التخفيف من آثاره.

ونتيجة لذلك، تم تكليف الشركة الحكومية Aguas de las Cuencas Mediterraneas, S. A. (ACUAMED) بمشروع التخلص من التلوث الكيميائي في خزان سد فليكس.

الخلفية

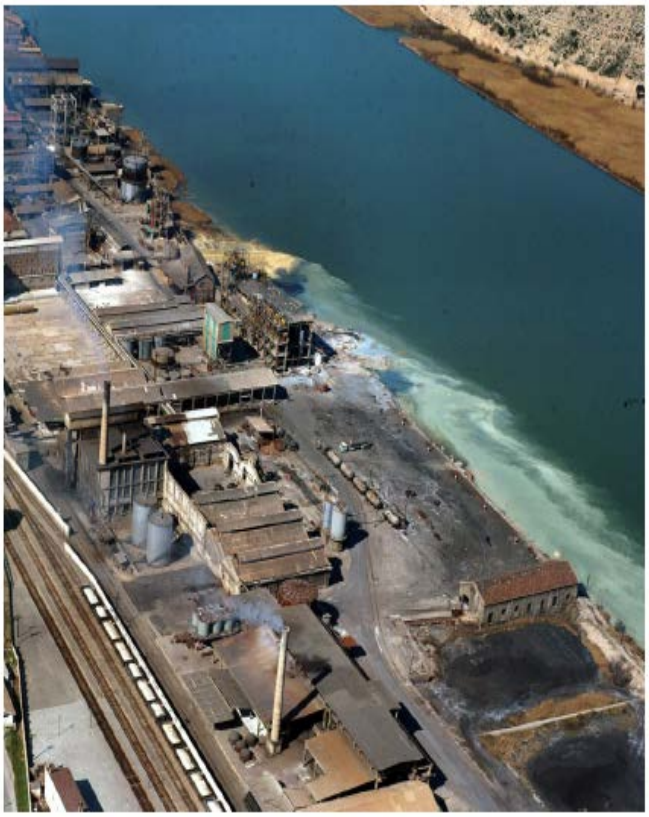
يمكن أن يتسبب تراكم النفايات بمرور الزمن إلى حالات تتعرض فيها الأنظمة البيئية للخطر بسبب ظاهرة طبيعية - الفيضانات، الرياح أو التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة. ومثال على ذلك الحالة الموجودة في خزان سد فليكس.

لقد بدأ إنتاج المنتجات الكيميائية على ضفتيّ النهر في أواخر القرن التاسع عشر، ومنذ ذلك الحين، ونوع المواد المُنتجَة آخذ في التزايد والاختلاف، وذلك حسب التقدم التكنولوجي والطلب.

استندت العمليات الأولية على الكلور والصودا الكاوية، الناتجين من المادة الخام لملح الطعام، من خلال عملية إلكتروليتية باستخدام الزئبق. بعد ذلك، بدأ إدخال الأباتيت بكميات كبيرة باعتباره مادة خام لإنتاج ثنائي فوسفات الكالسيوم. ويحتوي هذا الأباتيت بصورة طبيعية على نسبة من النويدات المشعة، والتي يتم إغراقها فيزيائيًا أثناء عملية الإنتاج. وبالإضافة إلى هذا، ينبغي الأخذ في الاعتبار أيضًا حقيقة أن بعض المُلوِّثات الموجودة في الوحل تأتي أيضًا من السحب الطبيعي الذي يحدث باتجاه المنبع في المصنع.

إضافةً إلى ذلك، قد تغيَّر الطابع المورفولوجي لنهر إيبرو إلى حدٍ كبيرٍ خلال القرن الماضي. ففي كل مرة يتم فيها بناء سد على النهر، تكون النتيجة المباشرة هي أن الحوض الناتج في المياه يزيد من الترسيب، وبالتالي تكون الخزانات لديها ميل للانسداد. وخزان فليكس ليس استثناءً. لقد انخفضت قوة التعرية والسحب الطبيعي لنهر إيبرو عندما مرَّ خلال هذه المنطقة بعد بناء السد. وحتى ذلك الحين، كان النهر يجرف معظم ما يخرج من نفايات المصنع باتجاه المصب، ولكن بعد بناء السد، ظلَّت الغالبية العظمى من النفايات في حوض الخزان.

منظر جوي، 1985



منظر جوي، 1970

في ضوء كل هذه البيانات الأولية، تم إجراء بحث لإيجاد الحلول؛ لتجنب خطر التلوث المستمر أو الدوري.

عمليات إنتاج النفايات

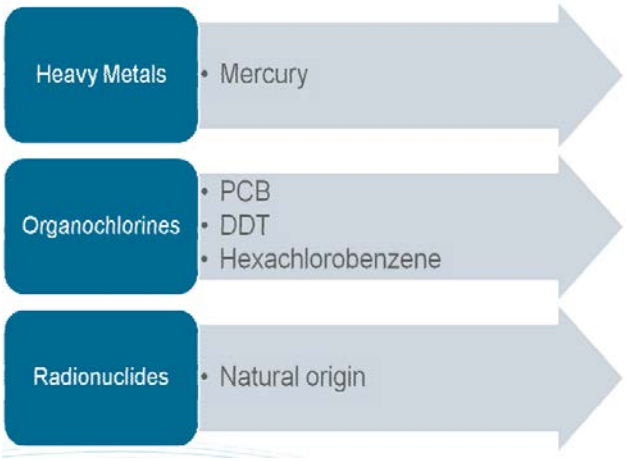
تأتي المواد التي تُشكِّل ضفة الخزان بجانب المصنع من نشاط المصنع غالبًا. العمليات التي أنتجت أو تسببت في معظم المواد المترسبة أو التي استقرت في الضفة هي:

أ- **احتراق الفحم.**

ب- **ذوبان الملح.**

ج- **ثلاثي كلوروالإيثيلين.**
د- **رباعي كلورو الإيثيلين ورباعي كلوريد الكربون.**
ه- **ثنائي فوسفات الكالسيوم.**

العمليات الملوثة المحتملة



كما ذكرنا سابقًا، فإن المُلوِّثات تنتمي إلى ثلاث مجموعات رئيسية: المعادن الثقيلة (الزئبق بشكل أساسي)، ومركبات الكلور العضوية والنويدات المشعة (من المعادن المستخدمة في عملية الفوسفات).

ونظرًا لتنوع العمليات التي تتم في المصنع، وبالإضافة إلى تلك التي سبق ذكرها، قد تكون هناك ملوثات أخرى تنجم عن عمليات المعالجة بالكلور، مثل مادة الدي دي تي "DDT" (في الفترة 1945-1975)، والمركبات ثنائية الفينيل متعدد الكلور (في الفترة 1959-1987)، وسداسي كلوروبنزين، وشتى تفاعلات المنتجات الثانوية.

الحلول المدروسة

توصلت الدراسات التي أُجريَت إلى أنه يمكن تصنيف الحلول الممكنة إلى مجموعتين استنادًا إلى طبيعة النفايات إذا كانت يتم الاحتفاظ بها في نهاية المطاف في الخزان (حلول داخل الموقع) أو على العكس، يتم تجميعها ووضعها في مكانٍ آخر (حلول خارج الموقع).

العناصر الرئيسية التي تحدد الحل الأمثل ضمن كل مجموعة هي:

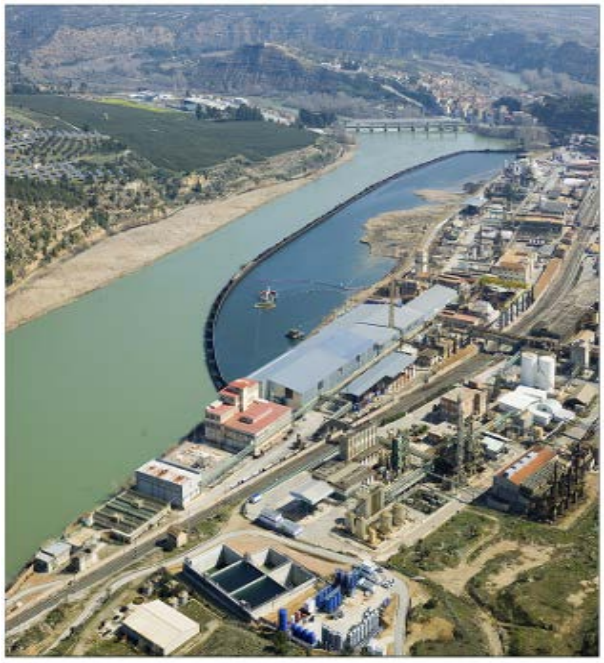
- الحل داخل الموقع: إنشاء منطقة العمل، وتراكم النفايات، ومعالجة النفايات والحماية من تآكل النهر.
- الحل خارج الموقع: إنشاء موقع عمل، والتخلص من النفايات، والمعالجة، والنقل إلى منطقة ردم النفايات ومنطقة ردم النفايات نفسها.

الحل الذي تم إقراره

قررت لجنة الرصد التي تشكَّلت من هيئات حكومية متعددة، تتضمن الاتحاد الهيدروغرافي لنهر إيبرو، ووزارة البيئة الإسبانية، وحكومة كاتالونيا، وبلدية فليكس، والمجلس الوطني الإسباني للأبحاث، واتحاد حماية دلتا إيبرو (CEPIDE) ومروج المشروع (ACUAMED)، وبعد دراسة جميع الردود المُستلَمة من أكثر من 80 منظمة تمت استشارتها لدراسة الإجراءات البديلة، حتى تلك التي "لم تحدد أي إجراء"، أن الحل خارج الموقع كان البديل الأكثر أمانًا للبيئة، حيث قلل بالفعل من مستوى الملوثات ووفَّر ضمانات أكثر.[10]

عند تصميم وتخطيط الأنشطة، تمت دراسة سلسلة من التدابير التصحيحية؛ للحد من التأثير على الأحياء البيئية، فقد كانت هناك محمية طبيعية بجوار المنبع، وكانت تضم مراعٍ مغمورة بالمياه وأحياء برية متنوعة مثل النسر الذهبي، والبلشون الإمبراطوري والقضاعة.

[10] الجريدة الرسمية الإسبانية (BOE)، قرار بتاريخ 25 تشرين الأول/أكتوبر 2006، للأمانة العامة لمنع التلوث وتغير المناخ، يصيغ بيان الأثر البيئي على تقييم مشروع إزالة التلوث الكيميائي من خزان فليكس (تاراغونا).



منظر للموقع مع أعمال إزالة التلوث الجارية (2012)

أنشطة التجريف داخل الدعائم الصفائحية

الأعمال التمهيدية

- بناء **جدار مزدوج من الدعائم الصفائحية بطول 1300 متر**؛ لتطويق منطقة العمل على الضفة اليمنى من الخزان لعزل حمأة النهر الملوثة، الذي يجب تنفيذه قبل التعامل مع الوحل الملوث بصورة كبيرة. ويتمثل الهدف الرئيسي في إنشاء منطقة محمية (مياه راكدة)، منعزلة عن مياه نهر إيبرو المتدفقة؛ وذلك حتى يتمكن النهر من التدفق من خلال قناة عند الضفة اليسرى من الخزان، أثناء الأعمال داخل الخزان. ولو وقعت أي حادثة أثناء العملية، فستظل منطقة العمل محصورة ولن يتسرب التلوث باتجاه المصب.

- بناء **جدار حاجز من الدعائم القاطعة بطول 1100 متر** على شاطئ الضفة اليمنى من الخزان؛ وذلك لتجنب خطر انهيار أرضية الضفة بسبب إزالة النفايات، ومنع الجريان الجوفي من المصنع إلى النهر.

- بناء **مَجَارٍ اعتراضية لمصارف النفايات الموجودة** عند المصنع.

- بناء، داخل مجمع المصنع، **مبانٍ صناعية متنوعة لاحتواء منشآت معالجة المواد المُستخرَجة والمياه**، إضافةً إلى مراكز التجميع.

- بناء **سبعة آبار لإمداد المدن الواقعة باتجاه مجرى النهر بالمياه**؛ وذلك لاستخدامها فقط في حالة الطوارئ.

أحد الآبار التي تم بناؤها لإمداد المدن الواقعة باتجاه مجرى النهر بمياه الشرب في حالات الطوارئ

- **مطمر نفايات من الفئة الثانية يؤدي الغرض المطلوب ومانع لتسرب المياه** (نوع من مدافن النفايات المجهزة للنفايات غير السامة وغير الخاملة) في منطقة "Racó de la Pubilla" el (تبعد مسافة 6 كيلومترات عن النهر)، التزامًا بالمعايير المطلوبة بدرجة تفوق ما تطلبه القوانين الحالية.

أعمال تهيئة في مطمر النفايات في "Racó de la Pubilla"

أعمال إزالة التلوث

بعد بناء الموقع، يمكن متابعة إزالة النفايات. وستتم إزالة الجزء المغمور من الوحل باستخدام جرَّافات الشفط الإيكولوجية، والتي ستعمل وهي محاطة بستائر لدائنية عائمة. حيث سيعمل هذا الإجراء على الحد من اضطراب المُلوِّثات وإحداث حالة من الركود في منطقة التجريف، حيث سيسهل الاحتفاظ بالمياه. ويُستكَمل هذا باستخدام مضخة صغيرة يمكنها العمل عند توقف الجرَّافة. ولمنع حدوث أي اضطراب للمُلوِّثات، يلزم إجراء التجريف بمستوى منخفض.

التجريف منخفض الاضطراب

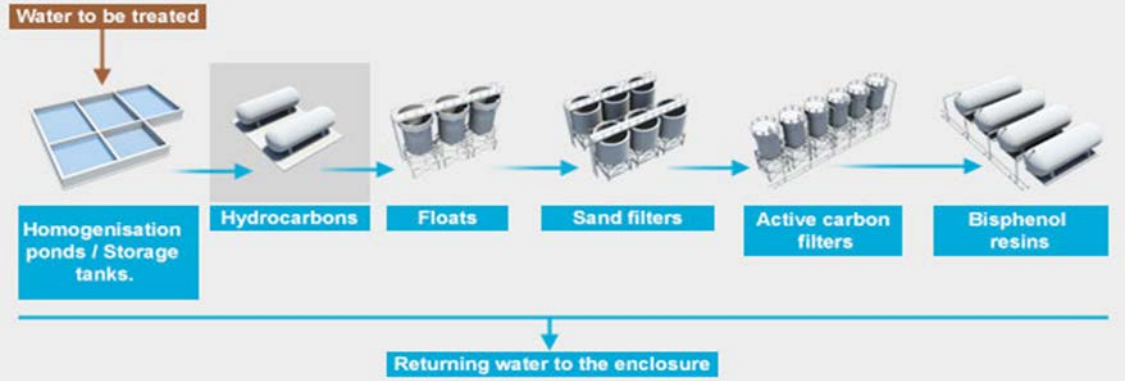
يجب أن تخضع المواد بعد إزالتها إلى معالجة تحقيق لها شروط النفايات التي تسمح بقبولها كمُلوِّثات نهائية في منطقة طمر النفايات الموجودة.

تتألف المعالجة من:

- **تصنيف حجم التربة**، باستخدام المناخل والفرازات المائية، متبوعًا **بتجفيف** المواد المُستخرَجة بالكامل، باستخدام خزانات ترسيب ومرشحات ضغط.

- سيتم تصنيف الجزء الصلب بناءً على تركيزات المُلوِّثات به، حيث سيتم إرسال الأجزاء النظيفة مباشرةً إلى منطقة الردم، وإجراء معالجة خاصة لتلك الأجزاء التي يتم رفضها في منطقة طمر النفايات. بعد دراسة كل الاحتمالات، تصبح العلاجات المختارة (البديلة أو المتعاقبة) هي:

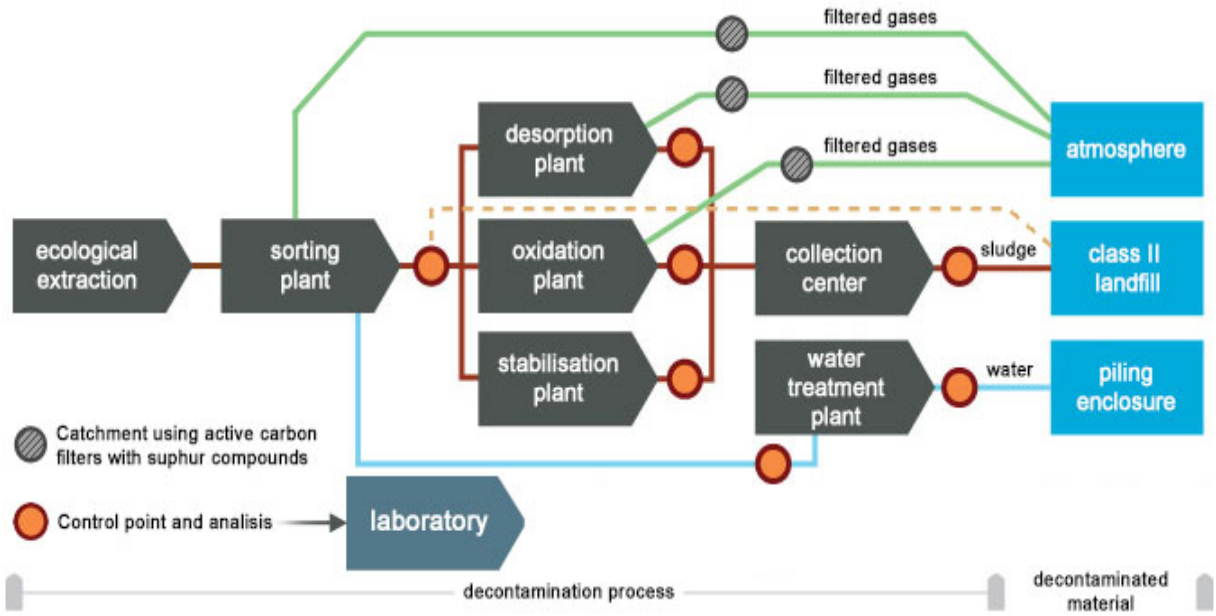
  - **الامتزاز الحراري** (مقابل المركبات العضوية): يتم إدخال المادة في فرن الامتزاز بدرجة حرارة أقل من 350 درجة مئوية؛ لتجنب تبخر الزئبق. تمر الغازات التي تنتج من فرن الامتزاز إلى فرن الأكسدة الحرارية وهناك يتم تسخينها من جديد، ولكن هذه المرة إلى 1100 درجة مئوية. بعد ذلك، يتم تبريد درجة الحرارة بسرعة إلى أقل من 200 درجة مئوية لمنع تكوُّن الديوكسينات. ويمر الغاز الناتج من فرن الأكسدة الحرارية من خلال مرشح نسيجي لتجميع الجسيمات العالقة.



- **الأكسدة:** الملوثات الرئيسية من الحمأة المجففة هي مركبات متطايرة بتركيزات معتدلة، وتتأكسد في خزان الخلط بإضافة مادة كاشفة ومياه. بعد الخلط، تمر المادة إلى خزانات التفاعل. وبعد ساعتين، ينتج مركب خامل غير قابل للذوبان في المياه وجاهز لنقله إلى موقع مطمر النفايات.
- **التثبيت** (مقابل المعادن الثقيلة): إذا كانت الحمأة المجروفة تحوي تركيزات عالية من الزئبق والمعادن الثقيلة الأخرى، تتم معالجتها في مصنع التثبيت. حيث يتم تخميل الحمأة بتمريرها من خلال بعض الأوعية القمعية مع الأسمنت وبعض الإضافات لتثبيت الزئبق ومنع وجوده في الترشيح المحتمل من الحمأة.

- ويتم إرسال **المياه** إلى محطة معالجة (محطة معالجة مياه الصرف الصحي)، تبلغ سعتها مئة لتر في الثانية تقريبًا.

يسلط الرسم البياني التالي الضوء على الأهمية الكبرى لعمليات مراقبة التلوث في نهاية كل عملية، قبل الموافقة على الاستمرار في سلسلة عمليات إزالة التلوث. كذلك يتم اتباع مبادئ توجيهية صارمة بشأن الأمان أثناء التعامل مع المواد؛ وذلك لمنع أي تأثير لها على الأشخاص أو البيئة.
بعد المعالجة، سيتم نقل المادة بواسطة شاحنات إلى مطمر النفايات "Racó de la Pubilla" من الفئة الثانية (نوع من مدافن النفايات المجهزة للنفايات غير السامة وغير الخاملة).



أعمال التفكيك

مقرر أن تنتهي الأعمال بحلول نهاية عام 2015، وسوف تتضمن الإجراءات التالية:

- إغلاق موقع مطمر النفايات.
- تفكيك جدار الدعائم الصفائحية.
- تفكيك فاصل المياه السطحية وتغيير موضع مطمر النفايات بالنسبة إلى الخزان لتصريف مياه الأمطار.
- إزالة العناصر المتنقلة والميكانيكية من محطة المعالجة.
- تفكيك بناء المصنع والعناصر الثابتة التي يحتويها.
- التقوية عبر منحدر من الدبش الخشن على جدار الدعائم على طول الامتداد الكامل لمكان استخلاص المواد بجوار جدار الدعائم القاطعة.

التدابير الأمنية

كما أشرنا من قبل، تتضمن التدابير الأمنية الستائر اللدائنية العائمة وجدار الدعائم الصفائحية المزدوج، إضافةً إلى المراقبة اليومية المركزة لجودة المياه، باتجاه المنبع وباتجاه المصب، وكذلك خارج منطقة الاحتواء وداخلها.

نقاط مراقبة جودة المياه يوميًا

يتم إجراء هذه الاختبارات، إلى جانب تحليل المواد التي يتم تجريفها، في مختبر "في الموقع"، والذي يحتوي على المعدات التالية:

- الفصل الكروماتوغرافي الغازي مقترنًا بقياس الطيف الكُتَلي.
- الفصل الكروماتوغرافي للأيونات مع كشف الموصلية.
- التفلور الذري.
- قياس الطيف الضوئي للامتصاص الجزيئي المرئي وفوق البنفسجي.
- الانبعاث الطيفي المستحث بالبلازما.
- نظام الأقطاب الانتقائية.
- عدادات أشعة ألفا مع كاشفات كبريت الزنك.
- عداد أشعة بيتا باستخدام كاشف يتناسب مع تدفق الغاز.
- عدادات أشعة جاما باستخدام يوديد الصوديوم وكاشف الجرمانيوم.

المختبر "في الموقع"

معلومات للجمهور

تم تخصيص موقع إلكتروني على شبكة الويب لإعلام الجمهور بتفاصيل المشروع وأخباره.

www.decontaminationflix.com/

تكلفة المشروع

تبلغ التكلفة الإجمالية المقدرة حوالي 192 مليون يورو، تم تدبير 70٪ منها بتمويل مشترك من الاتحاد الأوروبي، وفيما يلي تفصيل البنود الرئيسية:

محطة المعالجة	50 مليون يورو
تهيئة منطقة طمر النفايات	38 مليون يورو
جدار الدعائم الصفائحية	21 مليون يورو
جدار الدعائم	15 مليون يورو
التجريف	12 مليون يورو
غير ذلك	56 مليون يورو
المجموع	**192 مليون يورو**

دراسة الحالة 3: إيقاف تشغيل (مصنع كلور وقلويات) يستخدم خلايا زئبقية بطريقة آمنة بيئيًا

صاحب الدراسة: أنطونيو كابرينو. مدير إنتاج التحليل الكهربائي. SOLVAY IBERICA, MARTORELL.

ربما تُعد عملية إيقاف تشغيل (مصانع الكلور والقلويات) التي تستخدم خلايا زئبقية واحدة من العمليات التي تستلزم على الأرجح إطلاق كميات كبيرة من الزئبق في البيئة. وهي تتضمن سلسلة من الخطوات التي تحتاج إلى تخطيط شامل ودقيق. وقد تختلف كمية النفايات الناتجة وتركيبتها بصورة كبيرة، من المعدات الواقية الخاصة بالعمال مثل قفازات التعامل مع الخبث، ومعدات الإنتاج، والحاويات، والدبش....

فيما يلي الخطوات التي ينبغي اتباعها لإيقاف تشغيل المصانع التي تستخدم خلايا زئبقية، مع تأكيد خاص على الاحتياطات اللازم اتخاذها لضمان صحة الإنسان وسلامته والحيلولة دون تلوث البيئة، وذلك وفقًا لوثائق اتحاد "منتجو الكلور" في أوروبا (Euro Chlor) بشأن إيقاف التشغيل وخبرة Solvay في هذا المجال.

1- مقدمة

في القرن العشرين، كان التحليل الكهربائي للزئبق يُستخدم بصورة شائعة في عمليات إنتاج الكلور في أنحاء العالم، إلا أن استخدام الزئبق وظهور التكنولوجيات الجديدة يعني أن هذه التقنية الآن قد عفا عليها الزمن إلى حدٍ كبير. وفي الواقع، تم التوقف عن بناء محطات التحليل الكهربائي التي تستخدم هذه التقنية منذ ستينيات القرن العشرين.

وبالنظر إلى التحديات التي تواجه القطاع فيما يتعلق بالتغيُّر في التكنولوجيا، تعهد اتحاد "منتجو الكلور" في أوروبا (Euro Chlor) (وهو منظمة تجمع معظم الشركات المنتجة للكلور في أوروبا) بالتوقف طوعًا عن عمليات إنتاج الكلور التي تعتمد على الزئبق في أوروبا بحلول عام 2020. وبهذا سيتم إيقاف تشغيل المصانع التي تستخدم الزئبق في منطقة البحر الأبيض المتوسط بحلول عام 2020[11].

وعلى المستوى العالمي توجد عملية مماثلة مُتَّبعة: ففي عام 2002 كان هناك 92 مصنعًا يستخدمون الزئبق، بينما في عام 2011 تقلص العدد إلى 53 مصنعًا فقط. لقد توصل برنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP) إلى اتفاقية عام 2013 (اتفاقية مينماتا بشأن الزئبق)، التي تنص على إيقاف تشغيل مصانع الكلور والقلويات التي تستخدم الخلايا الزئبقية في الفترة بين عاميّ 2025 و2035 في تلك البلدان التي صدَّقت على الاتفاقية.

وبالنظر إلى هذا الوضع، يبدو أنه من الملائم تجميع وثيقة للممارسات الجيدة التي ينبغي اتباعها أثناء إيقاف تشغيل مثل تلك المصانع.

2- حالة Solvay

Solvay هي شركة رائدة عالميًا في إنتاج الكلور، فلديها 13 مصنعًا ينتجون أكثر من مليونيّ طن من الكلور سنويًا. ولا تزال هناك أربعة من هذه المصانع تستخدم تكنولوجيا الخلايا الزئبقية. وفي الفترة بين عاميّ 2006 و2011 تم عمل 3 تحويلات من الخلايا الزئبقية إلى الخلايا الغشائية:

2006 في روزيجنانو، إيطاليا
2007 في بوسي، إيطاليا
2009 في سانتو أندري، البرازيل
سيتم الانتهاء من تحويلين في عام 2013: ليلو (بلجيكا)، وتافوكس (فرنسا).

استنادًا إلى هذه التجارب، يتوفر شرح لكيفية إدارة عملية إيقاف تشغيل المصانع التي تستخدم الخلايا الزئبقية أثناء عملية تغيُّر التكنولوجيا. وسيتم الاستشهاد بالوثائق المرجعية، إلى جانب الفريق المسؤول عن العملية وتفاصيل العمليات المطلوب إجراؤها على المستوى المحلي، وكل ذلك بناءً على أحدث الحالات في روزيجنانو وسانتو أندري. وفي نهاية المطاف، يتم تلخيص أهم الدروس المستفادة من هذه العمليات في قائمة للممارسات الجيدة التي ينبغي مراعاتها.

[11] المتطلبات القانونية للخطة الإقليمية لاتفاقية برشلونة بشأن الحد من مدخلات الزئبق. خطة عمل البحر الأبيض المتوسط التابعة لبرنامج الأمم المتحدة للبيئة (UNEP MAP)، 2012.

2-1 إدارة عملية إيقاف التشغيل

2-1-1 الوثائق المرجعية

- Euro Chlor Env Prot 3، **المبادئ التوجيهية لإيقاف تشغيل مصانع الكلور والقلويات التي تستخدم الزئبق**.
- Euro Chlor Env Prot 19، **المبادئ التوجيهية لتحضير التخزين الدائم للزئبق المعدني فوق الأرض أو في مناجم تحت الأرض**.
- وثائق محلية مثل: SHD (Syndicat des Halogènes et Dérivés) France - **"بروتوكول إيقاف تشغيل وحدة التحليل الكهربائي بكاثود الزئبق"**،
- الوثائق الخاصة بالشركة (الإجراءات الداخلية، والجداول الزمنية، وخطط العمل...)

2-1-2 التنظيم

للقيام بعمليات إيقاف التشغيل المطلوبة تَقرَّر تشكيل فريق لتحديد الكيفية التي ينبغي إدارة هذه العمليات بها في مصانع المجموعة المختلفة.

تشكَّل الفريق من خبراء في العمليات وخبراء في السلامة والصحة والبيئة (SHE) حيث قاموا بتحديد العملية ونطاقها، وأنشأوا قاعدة بيانات فنية عن المعدات الملوثة بالزئبق والمعالجة الموصى بها.

اشتمل الفريق كذلك على خبراء في المشتريات؛ وذلك لضمان الإدارة الاقتصادية الجيدة أثناء فترة العمل.

2-1-3 مراحل عملية التشغيل

2-1-3-1 المرحلة الأولى: التحضير والتخطيط

يجب إجراء تقييم للنفايات الملوثة المطلوب معالجتها، بما في ذلك الكمية والتركيز المتوقعين للزئبق.
كذلك يجب تحديد المعدات التي سيستمر عملها أثناء إجراءات إيقاف التشغيل؛ وذلك لوقاية العاملين من التعرض للزئبق والحيلولة دون تلوث البيئة. وهي عادةً ستكون معدات تنقية الغازات وتجهيزات معالجة مياه الصرف الصحي.

واستنادًا إلى الخبرة، تتفاوت كمية المواد الملوثة التي تحتاج إلى معالجة بين 1000 و6000 طن لكل مصنع (باستثناء المباني)، وفيما يلي قائمة غير شاملة توضح بعض الأمثلة:

- الصلب الكربوني ومعادن أخرى مثل النحاس والألومنيوم
- الزئبق
- الغرافيت والكربون المنشط
- البوليستر المقوى وكلوريد البوليفينيل (PVC) غير المقوى، وراتنجات البوليستر، ولدائن أخرى
- الأغطية، مثل الإبونيت، والنيوبرين، والبيوتيل
- الوصلات المصنوعة من مواد متنوعة
- الرمل والطين
- المعدات الكهربائية
- الخرسانة، والقرميد، والدبش
- أخرى

تُستخدم هذه القائمة لتحديد معالجة كل نوع من النفايات، أو إذا كان ينبغي إرسالها إلى مكب النفايات أم لا. وتتحدد معالجة كل نوع من النفايات وفقًا للوصف الموضح في قاعدة البيانات التي يعدها الفريق المركزي والشروط التي تنص عليها التشريعات في كل بلد.

وهناك نقطة مهمة ينبغي مراعاتها في بداية العملية، وهي أنه يجب توفير حاويات معدنية مناسبة لتخزين الزئبق المعدني من أجهزة التحليل الكهربائي مؤقتًا.

بعد ذلك، يمكن عمل دعوة بين المقاولين ليقدموا عطاءاتهم، إضافةً إلى وضع خطة تفصيلية للعملية. وينبغي أن تشتمل هذه الخطة على إخطار السلطات بأنه قد تمت مراعاة جميع الجوانب المتعلقة بالنفايات، بما في ذلك المعالجة، والرقابة البيئية أثناء عملية إيقاف التشغيل وجميع الجوانب الأخرى المتعلقة بحماية الأشخاص المشتركين في العمل.

أخيرًا، يجب تحديد عدد العاملين المطلوبين، سواءً المعينين المسجلين في كشف المرتبات والعاملين المستقلين، والمعدات الواقية، والرصد البيولوجي والرقابة البيئية.

2-3-1-2 المرحلة الثانية: العمليات

تنقسم هذه المرحلة بدورها إلى ثلاث مراحل.

المرحلة الأولى، يُطلَق عليها "الأحكام الأساسية للصحة والسلامة" وتتألف من العمليات التالية:

- إفراغ المنشآت التي تحتوي على الزئبق المعدني وسوائل العمليات.
- التنظيف الشامل واحتواء مختلف الخلايا الملوثة، وإذا لزم الأمر، تغطيتها بالمياه؛ لمنع انبعاث النيتروجين في الغلاف الجوي.
- تفكيك المعدات غير الملوثة (مثل الأنودات، ولوحات الخلايا، وغير ذلك).

يجب تنفيذ مثل هذا العمل بواسطة أشخاص مؤهلين، وهم في العادة نفس الأشخاص الذين كانوا يعملون في المصنع حال تشغيله.

في **المرحلة الثانية** يتم تفكيك المعدات الملوثة بالزئبق وتخضع لمعالجة مناسبة وفقًا للخطة الموضوعة. والمعدات التي يلزم استمرار تشغيلها لأسباب تتعلق بالسلامة والصحة والبيئة هي فقط المعدات التي لن يتم تفكيكها. ويمكن إنجاز هذا العمل بواسطة مقاولين إذا لم يكن عدد الموظفين الدائمين كافيًا.

أخيرًا، في **المرحلة الثالثة،** يتم تفكيك المعدات المتبقية (مثل معدات المراقبة، ووحدات المعالجة، وغير ذلك). وغالبًا ما يتم إسناد مثل هذا العمل لمقاولين.

3- صور دراسة الحالة
فيما يلي بعض صور دراسة الحالة التي توضح الخطوات الموصوفة.

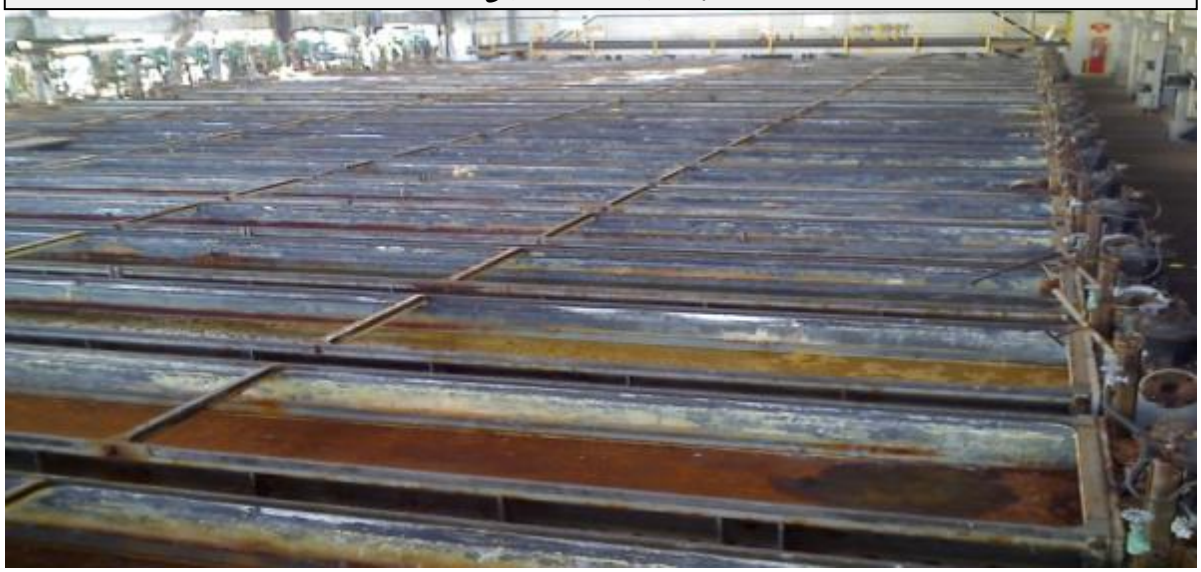
حبس الخلايا (متصل بوحدة معالجة الهواء)

منطقة عمل للمعالجة الآمنة للمعدات الملوثة متصلة بوحدة معالجة نفايات الزئبق السائلة، يتم غسلها بانتظام بالمياه

أرضية مخزن خلايا يتم غسلها بانتظام

المرحلة الأولى من العمليات

نهاية مرحلة التفكيك الأولى



4- الممارسات الجيدة المستفادة

تجب إدارة عمليات إيقاف تشغيل مصانع الكلور والقلويات التي تستخدم الخلايا الزئبقية باعتبارها مشروعًا خاصًا:

1- بواسطة فريق بدوام كامل، متحمس وملتزم بالمشروع، وقادر على التوصل لحلول مبتكرة تعمل على تحسين الإجراءات الحالية. يجب أن يكون الموظفون مؤهلين ولديهم الخبرة اللازمة، وبالأخص أولئك المسؤولون عن تفريغ الدوائر وتفكيك الخلايا الملوثة في المرحلة الأولى.

2- يجب التخطيط للمشروع بعناية بما يتماشى مع الوثائق المتاحة ووفقًا للمواصفات الخاصة بكل مصنع.

3- يجب تحديد عدد من الأمور في المرحلة الأولى:

أ- كيفية إيقاف العمل في مخزن الخلايا (دفعة واحدة أو على مراحل متقطعة)
ب- ما الخلايا التي ينبغي أن تستمر في العمل لأسباب تتعلق بالسلامة والصحة والبيئة.
ج- عمل قائمة بالخلايا الملوثة وأنواع النفايات وطريقة المعالجة المقابلة لكلٍ منها، وستظهر فائدة هذه القائمة عند إخطار السلطات وإعداد طلبات العطاءات من المقاولين.

4- حماية العاملين والبيئة جانب في غاية الأهمية. وقبل البدء في العمل، يجب تحديد المعدات الواقية المطلوب استخدامها، والخلايا التي ينبغي أن تستمر في العمل؛ لضمان الحد الأدنى من التعرض للتلوث، ومراقبة البيئة والمياه والرصد البيولوجي.

5- أخيرًا، ولضمان نجاح العملية، يلزم تنفيذ مؤشرات التقدم للتحكم في المشروع ومراقبته.

5- المعالجة الآمنة للنفايات الناتجة عن عمليات إيقاف تشغيل مصانع الكلور والقلويات

يوضح الجدول التالي بعض النماذج الموصى بها لمعالجة النفايات التي تحتوي على الزئبق في مجال صناعة الكلور والقلويات، وفقًا للمستند المرجعي لأفضل التقنيات المتاحة.[12]

نوع النفايات	الخصائص	الكميات النموذجية (غم/طن غاز	محتوى الزئبق قبل المعالجة (غم/كغم)	المعالجة	الزئبق النهائي (ملغم/كغم)
حمأة محلول ملحي	نفايات غير عضوية	حتى 20000، حسب جودة	< 0.150	طمر النفايات بعد التثبيت	
حمأة من معالجة النفايات السائلة	الكربون المنشط	400-50	50-10	التقطير/طمر النفايات بعد التثبيت	الزئبق المستعاد/ <10 في النفايات
حمأة الكربون من ترشيح الصودا الكاوية	الكربون المنشط	50-20	500-150	التقطير/طمر النفايات بعد التثبيت	الزئبق المستعاد/ 20-200 في
مرشحات الانبعاثات الغازية	الكربون المنشط	20-10	200-100	المعالجة الكيميائية طمر النفايات بعد التثبيت	الزئبق المستعاد/ 20-200 في النفايات
حمأة من صهاريج التخزين، والبواليع، وغير ذلك		قد تحتوي على كميات ضخمة	محتوى الزئبق مرتفع عمومًا	التقطير	الزئبق المستعاد
طلاءات مطاطية	متغير		متغير	الحمام الحمضي، أو التبريد أو الغسل أو الترميد	300

[12] المفوضية الأوروبية (2001): المكافحة المتكاملة للتلوث (IPPC) - الوثيقة المرجعية لأفضل التقنيات المتاحة في مجال صناعة الكلور والقلويات.

المواد المطلية بمعدن	تلوث سطحي		بشكلٍ عام، <0.1٪	التسخين، أو القطع والغسل أو التبريد	
أجزاء المباني المصنوعة من الصلب والحديد	كميات متغيرة	غير متجانس بشكلٍ عام، <0.1٪		حمام حمضي/تُباع بوصفها نفايات	10-5>
الخرسانة ونفايات التشييد الأخرى	كميات متغيرة	غير متجانس/ بشكلٍ عام، <0.1٪		الدفن بوسفها نفايات خطرة أو نفايات أخرى حسب المحتوى	10>/ 10<

يوضح الجدول التالي مواد النفايات النموذجية الناتجة بعد عملية إيقاف تشغيل مصانع الكلور والقلويات وطرق علاجها الممكنة لاستعادة الزئبق [13]

تلوث المواد النموذجي			**المعالجة الممكنة**			
المادة	**النسبة النموذجية للزئبق في مياه الصرف الصحي**	**الحالة الفيزيائية**	**المعالجة الفيزيائية/الميكانيكية**	**الغسل بالمياه**	**الغسل الميكانيكي**	**التقطير بالمعوجة**
حمأة من صهاريج التخزين، والبواليع	10 - 30	صلبة رطبة				
حمأة من صهاريج الترسيب، والمصارف، وغير ذلك	2 - 80	صلبة رطبة				
فحم نباتي معالج بالكبريت أو اليود من تنقية الهيدروجين	10 – 20	صلبة جافة				
كربون من مرشحات الصودا الكاوية	فوق 40	صلبة رطبة				
غرافيت من مسببات التحلل	2	صلبة مسامية				
مطاط / مواد تغليف	متغير	متغير				
القرميد/الخرسانة	0.1 – 0.01	صلبة جافة				
مركبات الخلايا الزئبقية (الأنودات، والجدران الجانبية، والأنابيب...)	متغير	تلوث غير متجانس				
الصلب (الخلايا، ومسببات التحلل، والخردة المعدنية، ومكثفات غاز الهيدروجين "H_2"، والمضخات، والأنابيب...)	1 – 0.001	صلبة مع تلوث سطحي				
المعدات اللدائنية	0.1>	صلبة مع تلوث سطحي				
الموصلات النحاسية	0,04	صلبة مع تلوث سطحي				(للصفائح المرنة)

[13] إيقاف تشغيل مصانع الكلور والقلويات التي تستخدم الزئبق. الطبعة الخامسة. أيلول/سبتمبر 2009، Euro Chlor

تلوث المواد النموذجي			المعالجة الممكنة			
المادة	**النسبة النموذجية للزنبق في مياه الصرف الصحي**	**الحالة الفيزيائية**	**المعالجة الفيزيائية/الميكانيكية**	**الغسل بالمياه**	**الغسل الميكانيكي**	**التقطير بالمعوجة**
مانع التسرب من الخلايا (طبقات خرسانية)	0,01					
أسفلت	1 - 20	تلوث غير متجانس				
خرسانة وتربة تحتية	متغير	تلوث غير متجانس				
الخشب	متغير					
الأرضية	متغير	تلوث غير متجانس				
العازل الحراري	0,03		لا تحتاج معالجة قبل الدفن			
نفايات التقطير بالمعوجة	0.1 – 0.1 >	صلبة جافة مسامية				
الأرضيات الخشبية	0.05 – 0.08	تلوث غير متجانس				

IC: تلوث غير متجانس / SSC: صلبة مع تلوث سطحي

دراسة الحالة 4: تثبيت التربة الملوثة بمعادن ثقيلة باستخدام أكسيد مغنيسيوم منخفض المرتبة الحرارية

صاحب الدراسة: خوسيه ماريا شيمينوس. جامعة برشلونة (UB)

علاج التثبيت باستخدام مادة كيميائية للتنظيم الحيوي لدرجة الحموضة (pH) هو أحد الخيارات التي تُوضَع في الاعتبار عندما يتمثل أفضل إجراء بديل في إزالة التربة الملوثة بمعادن ثقيلة من موضعها، دون إجراء عملية إزالة تلوث، ونقلها إلى مطمر نفايات مناسب أو صومعة آمنة.

وتحد عملية التثبيت الكيميائي هذه من قابلية ذوبان المعادن الثقيلة. والجير أو خليط من الأسمنت، والجير هو عامل التنظيم الحيوي المعتاد لأنواع عديدة من النفايات، ولكن مع قيم درجة الحموضة العالية التي تظهر مع الجير - وهو مادة قلوية قوية - قد تحتوي المياه المترشحة التي تتجمع في مطمر النفايات على تركيزات عالية من المعادن الثقيلة، بفعل إعادة إذابة هيدروكسيدات المعادن التي تشكلت في السابق.

وتصل معظم هيدروكسيدات المعادن الثقيلة الشائعة إلى أدنى حد لقابلية ذوبانها عند درجة حموضة تتراوح بين 8 و10. وفي عملية التثبيت الكيميائي للتربة الملوثة بمعادن ثقيلة، ينبغي استخدام منتج قلوي له قابلية ذوبان تتزن عند فاصل درجة الحموضة، ويتميز بسعر تنافسي مقارنةً بالجير.

يمكن أن يكون هيدروكسيد المغنيسيوم، $Mg(OH)_2$، أنسب منتج للقيام بهذه الوظيفة، فهو الأقل من حيث تأثيره على البيئة، كما أن قابلية ذوبانه منخفضة ويقترب اتزان درجة حموضته عند اتصاله بالماء من 9.5. ولكن هيدروكسيد المغنيسيوم الطبيعي، (Brucite) نادرًا ما يتفاعل، والهيدروكسيد الموجود في السوق أغلى عشر مرات من أكسيد أو هيدروكسيد الكالسيوم. والأفضل سعرًا هو أكسيد المغنيسيوم منخفض المرتبة الحرارية (MgO)، حيث يمكن استخدامه بوصفه عامل تثبيت، ويمكن الحصول عليه من تكليس كربونات المغنيسيوم المعدنية.

إذا كان الزئبق موجودًا في التربة، لا بد من النظر بعناية إلى إمكانية تكوُّن ميثيل الزئبق، أوتعقيده مع المواد العضوية، مثل حمض الدبالية. وفي هذه الحالة، لن يكون عامل التثبيت فعالاً.

فيما يلي وصف لبعض حالات تثبيت التربة الملوثة بمعادن ثقيلة باستخدام أكسيد المغنيسيوم منخفض المرتبة الحرارية (MgO).

1- في عام 1998، شرعت شركة Inabonos S.A. (إحدى شركات مجموعة Roullier Group) في تنظيف وإزالة التلوث من قطعة أرض بمساحة 74،408م^2 في مزرعة تقع في مدينة لودوسا (إقليم نافارا، إسبانيا)، وذلك بنقل التربة الملوثة إلى صومعة آمنة، بُغية بناء مشروع إسكان جديد. والعملية التي تسببت في التلوث كانت إنتاج حامض الكبريتيك من البيريت – كبريتيد الحديد – وهو معدن يحوي نسبة عالية من المعادن الثقيلة. وقد احتوت النفايات الناتجة عن العملية على أكاسيد الحديد ومعادن ثقيلة مثل الرصاص، والزنك، والزرنيخ، والنحاس، والزئبق، والكوبلت، والكادميوم، والكروم، والنيكل، والقصدير، والسيلينيوم، والتلوريوم، والأنتيمون التي يمكن العثور عليها على عُمق يصل إلى 2.5 متر. وقد وصل تركيز الزئبق بحد أقصى إلى 1.7 غم/كغم في نصف المتر الأول من العمق.

تم استخراج 120،000 م^3 من التربة الملوثة من الموقع، ونُقِلَت إلى صومعة آمنة وتم إخضاعها لعملية تثبيت. ولقد كانت عملية التثبيت عملية تدريجية، حيث تم وضع طبقات من الأرض، بسُمك 0.5 متر تقريبًا، بالتبادل مع طبقات من الهيدرات - التي تم الحصول عليها من تكليس هيدروكسيد المغنيسيوم الطبيعي، وكانت من إنتاج وتسويق شركة Magnesitas Navarras S.A.-. وقد عملت هذه الطبقة باعتبارها طبقة ترشيح للسوائل المترشحة من الطبقات العليا. ولقد كانت النسبة المئوية لمادة التثبيت المضافة حوالي 5-6٪ من وزن التربة الملوثة التي تم نقلها إلى الصومعة الآمنة. وبعد الانتهاء من عملية نقل النفايات وتثبيتها، تم إغلاق الصومعة الآمنة. وإلى هذا الحد، قد يتم تفريغ السوائل المرشحة المتجمعة في أحواض الصومعة الآمنة في المجاري المائية الطبيعية دون الخضوع لمعالجة مسبقة، باستثناء تلك النفايات السائلة التي تحتوي على نسبة عالية من الكبريتات.

2- في إحدى المدن الساحلية القريبة من برشلونة، تم الشروع في عملية تثبيت خارج الموقع لمساحة 12.5 هكتارًا تحتوي على رماد ناتج عن عملية تحميص لمعدن البيريت إلى جانب معدن البيريت الذي يحتوي على نسبة عالية من الكبريت من مصنع قديم للأسمدة غير العضوية، وذلك باستخدام 10٪ من أكسيد المغنيسيوم منخفض المرتبة الحرارية. لقد كان الهدف النهائي لهذه المعالجة هو نقل التربة المثبتة إلى مطمر نفايات من الفئة الثانية خاضع للرقابة.

3- في إحدى المدن الساحلية الإسبانية، أُجرِيَت دراسة تجريبية أولية لعملية تثبيت في الموقع باستخدام أكسيد المغنيسيوم لتربة ملوثة من نفايات مصنع أسمدة قديم غير خاضع للرقابة. والمساحة التي كانت تغطيها المنطقة التي تمت معالجتها بلغت 200 م^2 وبعمق مترين. وقد تمت إضافة عوامل التثبيت بواسطة الحقن، وتم تحقيق التجانس للتربة الملوثة باستخدام مسلفة. وتُظهِر النتائج التي تم التوصل إليها أن المواد المرشحة من العينات التي تم تثبيتها باستخدام أكسيد مغنيسيوم منخفض المرتبة الحرارية حققت درجة حموضة تتراوح بين 9.5 و10.5، وهو فاصل مثالي للحد من قابلية ذوبان المعادن الثقيلة.