

التوجيهات بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات  
البيئية

منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق  
الفحم

## منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم

توجيه بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لضبط انبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم

موجز

تشكّل منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم مصدراً كبيراً وهاماً من مصادر انبعاثات الزئبق في الجو. وفي عام 2010، كان حرق الفحم سبباً في انبعاثات قرابة 475 طناً من الزئبق في كل أنحاء العالم، وجاء معظمها من توليد الطاقة واستعمال المراجل الصناعية (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، 2013). ويمثّل ذلك حوالي 40 في المائة من مجموع الانبعاثات العالمية البشرية المنشأ. وتحتوي أنواع الفحم المستعملة للإحراق في كل أنحاء العالم على كميات نزرة من الزئبق التي تنبعث في حالة عدم ضبطها إلى الغلاف الجوي.

ويقدّم هذا الفصل توجيهاً بشأن أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية للضبط، والتخفيض حيثما أمكن، لانبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم التي يغطيها المرفق دال للاتفاقية.

ومعظم منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم هي منشآت كبيرة لإنتاج الطاقة الكهربائية، وبعضها يعمل أيضاً لتوفير التدفئة. وتوفّر المراجل الصناعية الحرارة أو تُجهّز البخار لتلبية احتياجات المرفق الذي أنشئت فيه.

وتتأثر انبعاثات الزئبق من منشآت الاحتراق العاملة بحرق الفحم بعدد من المتغيرات، منها تركيز الزئبق وأنواعه في الفحم؛ ونوع الفحم وتكوينه؛ ونوع تكنولوجيا الاحتراق؛ وكفاءة الضبط في نُظم ضبط التلوث القائمة. ولكن تكنولوجيات ضبط انبعاثات الزئبق تتشابه بصورة عامة في حالة جميع المراجل التي تعمل بحرق الفحم بغض النظر عن تطبيقها في منشآت الطاقة أو المرافق الصناعية.

وتستعمل بالفعل نُظم ضبط تلوث الهواء على نطاق واسع في عدد من البلدان لتقليل انبعاثات ملوثات الهواء التقليدية بخلاف الزئبق، مثل الجسيمات وأكسيدات النيتروجين وثاني أكسيد الكبريت. وحتى عندما تكون هذه النُظم غير مصممة في المقام الأول لالتقاط الزئبق فإنها توفّر منفعة مشتركة من ناحية تقليل انبعاثات الزئبق، نظراً لأنها تستطيع أن تلتقط بعض الزئبق من غازات المدخن. وقد استحدثت تقنيات مخصصة لضبط الزئبق ويجري تطبيقها في عدد من البلدان لتوفير ضبط إضافي للزئبق في الحالات التي لا تتمكن فيها تقنيات المنافع المشتركة من توفير تخفيضات كافية وموثوقة للزئبق.

ويناقش هذا الفصل مجموعة من أفضل التقنيات المتاحة المستعملة لضبط الزئبق ويوفّر معلومات إرشادية بشأن أدائها من ناحية الانبعاثات وتكاليفها التقديرية. ويصف أيضاً العناصر الهامة في أفضل الممارسات البيئية لتشغيل المرافق العاملة بحرق الفحم. وأخيراً، يقدّم هذا الفصل مجموعة مختارة من التقنيات الناشئة لضبط انبعاثات الزئبق ويناقش رصد انبعاثات الزئبق في السياق المحدّد للمنشآت العاملة بحرق الفحم.

## المحتويات

7	1-1	مقدمة
8	2-1	العمليات المستعملة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمرآجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، بما في ذلك دراسة المواد المدخلة وسلوك الزئبق في العمليات
8	2-1	خصائص الفحم
9	1-1	الجدول 1- محتوى الزئبق في أنواع الفحم (مغ/كغ)
11	2-2	تحولات الزئبق أثناء حرق الفحم
12	2	الشكل 2 - تحولات الزئبق المحتملة أثناء الاحتراق وما بعد الاحتراق (غالبريث وزيفارليك، 2000)
14	3-1	قائمة تقنيات تخفيض انبعاثات الزئبق
14	3-1	غسل الفحم 14
14	3-2	مساهمة نظم ضبط تلوث الهواء في إزالة الزئبق
15	2	الجدول 2 - لمحة عامة عن المنافع المشتركة لإزالة الزئبق في نظم ضبط تلوث الهواء
18	4	الشكل 4 - تركيز الزئبق في غاز المدخنة من منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم باستعمال مجموعة FGD+ESP+SCR ومجموعة FGD+LLT-ESP+SCR
18	3	الجدول 3 - كفاءة إزالة الزئبق حسب المجموعات النمطية لأجهزة ضبط تلوث الهواء في الصين (بالنسب المئوية) جانغ وآخرون، 2015
19	4	الجدول 4 - مستويات الانبعاثات المتحققة من خلال تقنيات المنافع المشتركة (بيانات جمعها الفريق العامل للزئبق الصفري، 2015)
19	3-2-1	أجهزة ضبط الجسيمات
21	5	الشكل 5 - إزالة الزئبق بالمرسب الكهروستاتيكي كدالة على مقدار الكربون غير المحروق (النسبة المئوية للفاقد عند الاشتعال) في الرماد المتطاير (سنيور وجونسون، 2008)
23	3-2-2	أجهزة ضبط ثنائي أكسيد الكبريت
25	3-2-3	الاختزال الحفزي الانتقائي لضبط أكاسيد النيتروجين
26	3-3	تقنيات تعزيز المنافع المشتركة
26	3-3-1	خلط الفحم 26
26	5	الجدول 5 - مقارنة خصائص الفحم دون القيري والفحم القيري
27	6	الشكل 6 - الأثر المحتمل لخلط الفحم على التقاط الزئبق في نظام التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة ...
28	3-3-2	المواد المضافة لأكسدة الزئبق
29	7	الشكل 7 - أداء الإضافات القائمة على البروم والقائمة على الكلور مع أصناف الفحم (الفحم دون القيري من حوض نهر باوذر (PRB)؛ فحم اللغنيث من تكساس (TxL)؛ فحم اللغنيث من ولاية داكوتا الغربية (NDL))
29	3-3-3	المواد المضافة إلى جهاز التنظيف الرطب لضبط إعادة انبعاث الزئبق
29	8	الشكل 8 - رسم يوضح امتصاص/امتزاز زئبق غاز المدخنة عبر جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (كينز وآخرون، 2014)
30	3-3-4	الحفاز الانتقائي لأكسدة الزئبق

- 31..... 4-3 حقن الكربون المنشط للضبط المخصص للزئبق
- الجدول 6 - مستويات انبعاثات منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم التي تُطبَّق حقن الكربون المنشط..... 31
- 32..... 1-4-3 حقن المادة الماصة بدون معالجة كيميائية
- 33..... الشكل 9 - اختبار كفاءة إزالة الزئبق كتابع لمعدل حقن الفحم المنشط غير المعالج
- 33..... 2-4-3 حقن مادة ماصة معالجة كيميائياً
- 34..... 3-4-3 تقيدت انطباق حقن الكربون المنشط
- 35..... 5-3 تكلفة تكنولوجيات ضبط الزئبق
- 36..... 1-5-3 تكاليف تكنولوجيات ضبط الزئبق في إطار المنافع المشتركة
- الجدول 7- تكاليف أجهزة ضبط تلوث الهواء في منشآت الطاقة (يوان/كيلوواط، يوان عام 2010)، الصين  
36..... (أنكورا وآخرون، 2015)
- الجدول 8 - التكلفة الرأسمالية لتكنولوجيا المنافع المشتركة في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام  
37..... 2012) (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2013)
- الجدول 9 - تكاليف مجموعات أجهزة ضبط تلوث الهواء موزعة على مختلف الملوثات في وحدة طاقتها 600  
37..... ميغاواط، الصين (ملايين يوان ريميني، يوان عام 2010) (أنكورا وآخرون، 2015)
- 37..... 2-5-3 تكاليف تقنيات تعزيز المنافع المشتركة وحقن الكربون المنشط
- 38..... الجدول 10 - التكلفة النسبية لمختلف أساليب إزالة الزئبق
- الجدول 11 - التكلفة الرأسمالية لحقن الكربون المنشط في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام 2007) 39
- الجدول 12 - تكاليف التشغيل لنظم حقن الكربون المنشط (في منشأة طاقتها 250 ميغاواط) يعقبها إما مرسب  
39..... كهروستاتيكي أو مرشح نسيجي للفحم القيري (اللجنة الدولية المشتركة، 2005)
- 41..... 4- أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لحرق الفحم
- 41..... 1-4 أفضل التقنيات المتاحة
- 41..... 1-1-4 التدابير الأولية لتقليل محتوى الزئبق في الفحم
- 41..... 2-1-4 تدابير تقليل انبعاثات الزئبق أثناء الاحتراق
- 41..... 3-1-4 إزالة الزئبق بواسطة المنافع المشتركة لنظم ضبط تلوث الهواء التقليدية
- 42..... 4-1-4 التكنولوجيات المخصصة لضبط الزئبق
- 42..... 2-4 أفضل الممارسات البيئية
- 42..... 1-2-4 مُعاملات العمليات الرئيسية
- 42..... 2-2-4 اعتبارات كفاءة الطاقة في المنشأة بأكملها
- 43..... 3-2-4 صيانة أجهزة ضبط تلوث الهواء وكفاءتها في الإزالة
- 43..... 4-2-4 الإدارة السليمة بيئياً للمنشأة
- 44..... 5-2-4 الإدارة السليمة بيئياً لمخلفات احتراق الفحم
- 46..... 5 - رصد انبعاثات الزئبق
- 46..... 1-5 الرصد المستمر للانبعاثات

46.....	رصد المصيدة الماصة.....	2-5
46.....	أخذ العينات بجهاز الارتطام.....	3-5
	توازن الكتلة 47	4-5
47.....	النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات.....	5-5
47.....	عوامل الانبعاثات.....	6-5
47.....	التقديرات الهندسية.....	7-5

## قائمة الأشكال

- الشكل 1- استعمال مختلف رُتب الفحم (مؤسسة الفحم العالمية 2014)..... 37
- الشكل 2- تحولات الزئبق المحتملة أثناء الحرق وما بعد الحرق (غالبريث وزيفارليك، 2000)..... 40
- الشكل 3- رسم تخطيطي لعملية تشكيل نمطية من منشآت طاقة تعمل بحرق الفحم في اليابان (إيتو وآخرون، 2006) (مننَّح)..... 44
- الشكل 4- تركيز الزئبق في غاز المدخنة من منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم باستعمال مجموعة FGD +ESP+SCR ومجموعة FGD+LLT-ESP+SCR..... 45
- الشكل 5- إزالة الزئبق بالمرسب الكهروستاتيكي كدالة على مقدار الكربون غير المحروق (النسبة المئوية للفاقد عند الإشغال) في الرماد المتطاير (سنيور وجونسون، 2008)..... 48
- الشكل 6- الأثر المحتمل لخلط الفحم على النقاط الزئبق في نظام التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة.... 54
- الشكل 7- أداء الإضافات القائمة على البروم والكلور مع تنوع الفحم (الفحم دون القيري من حوض نهر باوذر (PRB)؛ فحم اللغنيث من تكساس (TxL)؛ فحم اللغنيث من ولاية داكوتا الغربية (NDL))..... 55
- الشكل 8- رسم يوضح امتصاص/امتزاز زئبق غاز المدخنة عبر جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (كينزر وآخرون، 2014)..... 56
- الشكل 9- اختبار كفاءة إزالة الزئبق كدالة على معدل حقن الفحم المنشَّط..... 59
- الشكل 10- مقارنة أداء الكربون المنشَّط غير المعالج وأداء الكربون المنشَّط المعالج في إزالة الزئبق..... 60

## قائمة الجداول

- الجدول 1- محتوى الزئبق في أنواع الفحم (مغ/كغ)..... 9
- الجدول 2- نظرة عامة على المنافع المشتركة لإزالة الزئبق في نُظم ضبط تلوث الهواء..... 15
- الجدول 3- كفاءة إزالة الزئبق حسب المجموعات النمطية لأجهزة ضبط تلوث الهواء في الصين (بالنسب المئوية) جانغ وآخرون، 2015)..... 18
- الجدول 4- مستويات الانبعاثات المتحققة من خلال تقنيات المنافع المشتركة (بيانات جمعها الفريق العامل للزئبق الصفري، 2015)..... 19
- الجدول 5- مقارنة خصائص الفحم دون القيري والفحم القيري..... 26
- الجدول 6- مستويات انبعاثات منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم التي تُطبَّق حقن الكربون المنشَّط..... 31
- الجدول 7- تكاليف أجهزة ضبط تلوث الهواء في منشآت الطاقة (يوان/كيلوواط، يوان 2010)، الصين (أنكورا وآخرون، 2015)..... 36
- الجدول 8- التكلفة الرأسمالية لتكنولوجيا المنافع المشتركة في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام 2012) (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2013)..... 37
- الجدول 9- تكاليف مجموعات أجهزة ضبط تلوث الهواء موزعة على مختلف الملوثات في وحدة بقدرة 600 ميغاواط، الصين (ملايين يوان ريمنيب، يوان عام 2010) (أنكورا وآخرون، 2015)..... 37
- الجدول 10- التكلفة النسبية لمختلف أساليب إزالة الزئبق..... 38
- الجدول 11- التكلفة الرأسمالية لحقن الكربون المنشَّط في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام 2007)..... 65
- الجدول 12- تكاليف التشغيل لُنظُم حقن الكربون المنشَّط (في منشأة طاقتها 250 ميغاواط) يعقبها إما مرسب كهروستاتيكي أو مرشح نسيجي للفحم القيري (اللجنة الدولية المشتركة، 2005)..... 65

## 1- مقدمة

يقدم هذا الفرع التوجيهات المتعلقة بأفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية للضبط، والتخفيض كلما أمكن ذلك، لانبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، التي يغطيها المرفق دال للاتفاقية.

ومنشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في المراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم هي مصدر كبير من مصادر الانبعاثات المحلية والإقليمية والعالمية للزئبق في الجو، حيث ينبعث منها أكثر من 740 طناً مترياً من الزئبق في أنحاء العالم (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، 2013). والفحم المستعمل في الاحتراق في كل أنحاء العالم يتضمن كميات نزرة من الزئبق التي تنبعث أثناء عملية الحرق (مع ملوثات أخرى) في حالة عدم ضبطها.

ومعظم منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم هي منشآت كبيرة لإنتاج الكهرباء؛ وبعضها يوفر أيضاً التدفئة (منشآت تجمع بين التدفئة والطاقة الكهربائية وتدفعه الأحياء السكنية إلخ). وتوفر المراجل الصناعية التدفئة أو بخار العملية اللازم للإنتاج المحلي في المرفقات التي تقام فيها هذه المراجل. وتستهلك المراجل المقامة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم نظيماً كميات أكبر من الفحم عن معظم المراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، مع احتمال زيادة انبعاثات الزئبق. ومع ذلك، فإن عدد المراجل الصناعية يزيد عادة عن عدد منشآت الطاقة. وهناك فارق آخر وهو أن مراجل منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم هي في الأغلب مراجل تعمل بوقود واحد في حين أن المراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم مصممة في كثير من الأحيان من أجل استعمال خليط أكثر تنوعاً من مختلف أنواع الوقود وتستخدمها (مثل نواتج الوقود الثانوية والنفايات والأخشاب) بالإضافة إلى الفحم (أمار وآخرون، 2008).

ومن منظور الجدوى التقنية، يمكن استخدام نفس التكنولوجيات للسيطرة على انبعاثات الزئبق من جميع المراجل العاملة بحرق الفحم، أيًا كانت وظائفها. وفي عدد من البلدان، تكون تزويد منشآت الطاقة والمراجل الصناعية الكبيرة مزودة بالفعل بنظم ضبط تلوث الهواء نتيجة السياسات المتبعة بشأن تلوث الهواء. وحتى عندما تكون هذه النظم غير مصممة للتعاطي مع الزئبق فإنها قادرة على التقاط بعض الزئبق الناتج عن الاحتراق وهو ما يؤثر مباشرة على تقليل انبعاثات الزئبق في الجو (ما يسمى بالمنافع المشتركة التي تنتج للزئبق من نظم ضبط تلوث الهواء). ومن ناحية أخرى، لا تكون المراجل الصناعية الأصغر العاملة بحرق الفحم عادة مجهزة بأجهزة فعالة لضبط الانبعاثات، وسيؤثر ذلك على دراسة كيفية معالجة انبعاثات الزئبق من هذه المنشآت. وتؤثر عدة عوامل على مقدار الزئبق الذي قد ينبعث من منشآت متشابهة تحرق كميات متماثلة من الفحم. وتشمل هذه العوامل ما يلي:

- تركيز الزئبق في الفحم
- نوع الفحم وتكوينه
- نوع تكنولوجيا الاحتراق
- وجود نظم ضبط تلوث الهواء وكفاءة قيامها بإزالة الزئبق

وستكون العوامل المذكورة أعلاه موضع الدراسة في بقية هذه الوثيقة بتفصيل أكبر في سياق تحديد أفضل التقنيات المتاحة/أفضل الممارسات البيئية.

## 2- العمليات المستعملة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم، بما في ذلك دراسة المواد المدخلة وسلوك الرزبق في العمليات

### 1-2 خصائص الفحم

الفحم مورد معقّد من موارد الطاقة ويمكن أن يتباين إلى حد كبير في تكوينه حتى ولو كان من نفس عرق المنجم. وتحدّد نوعية الفحم بتكوينه ومحتواه من الطاقة. ويستند تحديد رتبة الفحم إلى درجة تحول مادة النبات الأصلية إلى كربون. وتعرّف الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد أربعة أنواع أساسية من الفحم: الليغيت، ودون القيري، والقيري، والأنثراسيت (الصلب) (الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد D388) وفي بعض البلدان، يسمى فحم الليغيت والفحم دون القيري باسم "الفحم البني"، ويسمى الفحم القيري والصلب باسم "الفحم القاسي". وسوف تستخدم تسميات الجمعية الأمريكية للاختبارات والمواد في كل أجزاء هذه الوثيقة.

ويتضمن الليغيت نمطياً 25-35 في المائة من الكربون الثابت (وزناً بوزن) ويحتوي على أقل مقدار من الطاقة (أقل من 19,26 ميغاجول/كغ قيمة حرارية إجمالية). ويستعمل عموماً لتوليد الكهرباء أو تدفئة المناطق الواقعة بالقرب من المناجم.

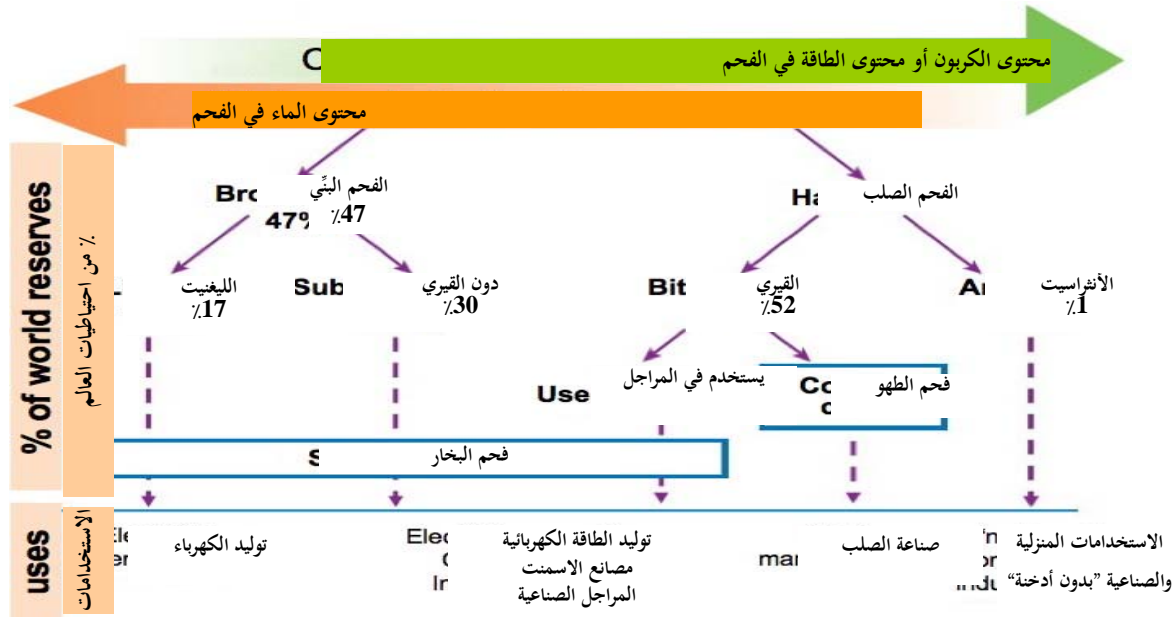
ويحتوي الفحم غير القيري نمطياً على 35-45 في المائة من الكربون الثابت (وزناً بوزن) وتتراوح قيمة التدفئة بين 19,26 و 26,80 ميغاجول/كغ قيمة حرارية إجمالية. ويستعمل على نطاق واسع لتوليد الكهرباء وكذلك في المراجل الصناعية.

ويحتوي الفحم القيري على 25-86 في المائة من الكربون الثابت (وزناً بوزن) وتتراوح قيمته الحرارية بين 26,80 و 32,66 ميغاجول/كغ قيمة حرارية إجمالية. وهذا الفحم القيري، مثله مثل الفحم دون القيري، يستعمل على نطاق واسع لتوليد الكهرباء وفي المراجل الصناعية.

ويتضمن الأنثراسيت مقداراً كبيراً جداً من الكربون الثابت يصل إلى 86-97 في المائة (وزناً بوزن). وهو أصلب أنواع الفحم ويعطي أكبر قدر من الحرارة عند حرقه (أكثر من 32,66 كيلوجول/كغ قيمة حرارية إجمالية)، ولكنه أصعب أنواع وقود الفحم في الحرق بسبب انخفاض المحتوى المتطاير.

ويعرض الشكل 1 الاستخدام النمطي لمختلف أنواع الفحم (رابطة الفحم العالمية، 2014). وكما يتضح من ذلك الشكل 1 تشير التقديرات إلى أن الفحم بنوعيه القيري ودون القيري المستعمل في منشآت توليد القوى الكهربائية وفي المراجل الصناعية يشكل أكثر من 80 في المائة من احتياطات الفحم المعروفة في كل أنحاء العالم.





الشكل 1 - استعمال مختلف رتب الفحم (مؤسسة الفحم العالمية 2014).

ويمثل محتوى الرتب أحد المعالم الرئيسية التي تؤثر على مقدار انبعاثات الفحم غير المضبوطة. ويقدم الجدول 1، الذي تم تعديله من "تيوالث وآخرون (2010)" البيانات المتاحة علناً بشأن محتوى الرتب في الفحم.

الجدول 1- محتوى الرتب في أنواع الفحم (مغ/كغ)

المرجع	المدى	متوسط جميع العينات	نوع الفحم	البلد
Nelson, 2007; Tewalt et al., 2010	0,31-0,01	0,075	قيري	أستراليا
Finkelman, 2004; Tewalt et al., 2010	(8) 0,96-0,02	0,19	قيري	الأرجنتين
Finkelman, 2004; Tewalt et al., 2010	(28) 0,15-0,04	0,10	قيري	بوتسوانا
Finkelman, 2004; Tewalt et al., 2010	(23) 0,81-0,04	0,20	قيري	البرازيل
Tewalt et al., 2010	(45) 0,94-0,06	0,3	دون قيري	كندا
Tewalt et al., 2010	(12) 0,12-0,033	0,058	قيري	شيلي
Tewalt et al., 2010	(19) 2,2-0,03	0,21	دون قيري	الصين
Zhang et al., 2012; UNEP, 2011	(482) 2,248-0,01	0,17	قيري/دون قيري	كولومبيا
Finkelman, 2004	(16) 0,17-0,02 <	0,069	دون قيري	الجمهورية التشيكية
Finkelman, 2003	(16) 0,79-0,03 >	0,338	ليغيت	مصر
Tewalt et al., 2010	(21) 0,38-0,03	0,126	قيري	فرنسا
Tewalt et al., 2010	(24) 0,37-0,02	0,12	قيري	ألمانيا
Tewalt et al., 2010	(3) 0,071-0,03	0,044	قيري	هنغاريا
Pirrone et al., 2001	1,4-0,7		قيري	
MUNLV 2005	0,09	0,05	ليغيت	
Tewalt et al., 2010	(5) 1,2-0,091	0,354	قيري	

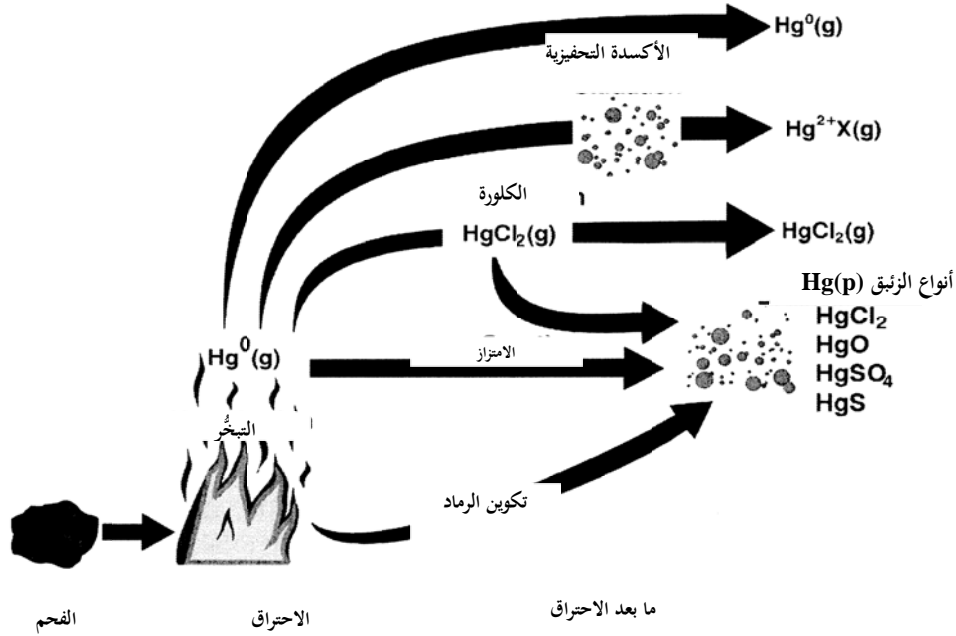
المرجع	المدى	متوسط جميع العينات	نوع الفحم	البلد
	(19) 0,31-0,04	0,138	دون قيري	
	(12) 0,44-0,075	0,242	ليغيت	
Tewalt et al., 2010; UNEP, 2014	(99) 0,86-0,02	0,106	قيري	الهند
	(8) 0,093-0,053	0,071	ليغيت	
Finkelman, 2003; Tewalt et al., 2010	(8) 0,19-0,02	0,11	ليغيت	إندونيسيا
US EPA, 2002	(78) 0,05-0,01	0,03	دون قيري	
Tewalt et al., 2010	(57) 0,73-0,02	0,168	قيري	إيران
Ito et al., 2004	(86) 0,21-0,01	0,0454	قيري	اليابان
Tewalt et al., 2010	(15) 0,14-0,03>	0,08	قيري	كازاخستان
	(5) 0,1-0,03	0,073	قيري	
Tewalt et al., 2010	(9) 0,13-0,062	0,082	دون قيري	نيوزيلندا
Tewalt et al., 2010	(36) 0,22-0,02	0,097	قيري	منغوليا
Finkelman, 2004	(15) 0,63-0,04	0,27	أنتراسيت+قيري	بيرو
Finkelman, 2004	0,1-0,04>	0,04	دون قيري	الفلبين
Bojkowska et al., 2001	0,163-0,013	0,085	قيري	بولندا
Finkelman, 2004	(11) 0,46-0,07	0,21	ليغيت+دون قيري	رومانيا
UNEP, 2013b	(23) 0,25-0,02>	0,12	قيري/	روسيا
Romanov et al., 2012			دون قيري	
Finkelman, 2004	(7) 0,13-0,03	0,08	قيري	الجمهورية السلوفاكية
Tewalt et al., 2010	(8) 0,14-0,032	0,057	ليغيت	
Leaner et al., 2009; Tewalt et al., 2010	(40) 0,1-0,023	0,157		جنوب أفريقيا
Finkelman, 2004	(75) 0,22-0,03	0,12	قيري	تنزانيا
Tewalt et al., 2010	(23) 0,6-0,02	0,137	ليغيت	تايلند
Tewalt et al., 2010	(149) 0,66-0,03	0,12	ليغيت	تركيا
Tewalt et al., 2010	(84) 0,6-0,012	0,216	قيري	المملكة المتحدة
US EPA, 1997	(640) 8,0-0,01	0,1	دون قيري	الولايات المتحدة الأمريكية
US EPA, 1997	(183) 1,0-0,03	0,15	ليغيت	
US EPA, 1997	(3527) 3,3-0,01>	0,21	قيري	
US EPA, 1997	(52) 0,30-0,16	0,23	أنتراسيت	
Tewalt et al., 2010	(6) 34-0-0,02>	0,348	أنتراسيت	فيت نام
Tewalt et al., 2010	(14) 3,6-0,03>	0,6	قيري	زامبيا
Tewalt et al., 2010	(6) 0,15-0,03>	0,08	قيري	زمبابوي

ملاحظة: ينبغي توخي الحذر عند تفسير معلومات تركيزات الزئبق الواردة أعلاه، نظراً لأن مجموعات عينات الفحم لمختلف البلدان تتباين تبايناً واسعاً. وبالإضافة إلى ذلك، فإن المعلومات غير متوافرة عالمياً لتوضيح ما إن كانت تركيزات الزئبق المبلغ عنها تستند إلى الفحم الجاف أو أرقام الفحم كما وردت. وهذه البيانات قد لا تُمثّل الفحم من منظور حرق الفحم الفعلي. ويوضح الرقم الموضوع بين قوسين في عمود "المدى" عدد العينات.

## 2-2 تحولات الزئبق أثناء حرق الفحم

العناصر الرئيسية القابلة للاشتعال في الفحم هي الكربون الأوّلي والهيدروجين ومركباتهما.

ويمثل الشكل 2 (غالبريث وزيجارليك، 2000) مخططاً توضيحياً للتحويلات الفيزيائية والكيميائية التي يمر بها الزئبق أثناء حرق الفحم، وبعد ذلك في غاز المدخنة الناتج. ويرتبط الزئبق أساساً بالعناصر المعدنية غير العضوية في الفحم، رغم أنه أشير إلى وجود رابطة بين الزئبق والعناصر العضوية في الفحم الموجودة في شكل مركبات عضوية زئبقية (سوين، 1990؛ غروين وكريغ، 1994؛ وفينكلمان، 1994). وبناءً على ذلك فإن البيريت ( $FeS_2$ ) هو المعدن الغالب الذي يستضيف الزئبق في الفحم. وفي حالات نادرة من التخصيب الشاذ للزئبق قد يوجد أيضاً كبريتيد الزئبق ( $HgS$ ) (كولكر وآخرون، 2006؛ كولكر، 2012 والمراجع المذكورة فيه). ونظراً لأن المستقبلات المعدنية (وربما الزئبقية العضوية) للزئبق تتحلل أثناء الاشتعال (< 1400 درجة مئوية)، فإن الزئبق يتطوّر ليصبح زئبقاً أوّلياً ( $Hg^0$ ). ولا تؤثر طريقة وجود الزئبق في الفحم على آلية تحول الاحتراق الأوّلي المذكور.



## الشكل 2 - تحولات الزئبق المحتملة أثناء الاحتراق وما بعد الاحتراق (غالبريث وزيجارليك، 2000)

ويمكن تصنيف انبعاثات الزئبق من المراحل التي تعمل بحرق الفحم إلى ثلاثة أشكال: الزئبق النقي الغازي ( $Hg^0$ ) والزئبق المؤكسد الغازي ( $Hg^{2+}$ ) والزئبق العالق بالجسيمات ( $Hg_p$ ) الذي قد يكون زئبقاً أولياً أو مؤكسداً. والكميات النسبية لهذه الأشكال الرئيسية الثلاثة للزئبق في غازات المداخن هي ما يسمى تنوعات الزئبق. ومن المفترض أن برومة أو كلورة الزئبق هي الآلية الغالبة للتحويل الكيميائي للزئبق التي تؤثر على تنوعات الزئبق. وتنطوي الآليات المحتملة الأخرى على تفاعلات الزئبق مع أسطح جسيمات الرماد حيث تتوفر الأنواع الكيميائية المتفاعلة والعوامل المحفزة ومواقع الامتزاز النشط لتحويل الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد، وكذلك تحويل الزئبق النقي والمؤكسد إلى زئبق عالق بالجسيمات (غالبريث وزيجارليك، 2000).

وتحدث مرحلة الأكسدة في الطور الغازي أساساً عن طريق أنواع الكلور الموجودة أصلاً في الفحم، مع انخفاض حرارة الغازات المارة عبر أجهزة التسخين المسبق للهواء وأجهزة ضبط التلوث. ويتوقف مدى أكسدة الزئبق في الطور الغازي إلى حد كبير على رتبة الفحم وتركز الكلور الموجود في الفحم وظروف تشغيل المراحل (مثل نسبة الهواء إلى الوقود ودرجة الحرارة). وعلى سبيل المثال، توصلت دراسة عن قياسات تنوعات الزئبق من 14 نظاماً مختلفاً لحرق الفحم إلى وجود نسبة تتراوح من 30 إلى 95 في المائة من الزئبق المؤكسد في المرحلة السابقة لأجهزة ضبط تلوث الهواء (بريستوبو وبلوم، 1995). وأظهرت دراسة استقصائية للمؤلفات ذات الصلة بالموضوع أن أكسدة الزئبق تتراوح أساساً في نطاق 45-80 في المائة، حيث يأخذ الشكل المؤكسد من الزئبق في معظم الأحيان شكل كلوريد الزئبق (سينيور وآخرون، 2004). وتستخدم أشكال مختلفة من إحراق أو إشعال الفحم في منشآت الطاقة والمراحل الصناعية. وهذه الأساليب تشمل:

- الإشعال المعلق للفحم المسحوق (إشعال الفحم المسحوق)
- الإشعال بالوقاد (أي الإشعال من حاملة وقود ثابتة أو تتحرك ببطء)
- الإشعال على قاعدة مميعة (سواء في شكل يحدث الفقاعات أو قاعدة مميعة دوارة)
- الإشعال الإعصاري للفحم المحروش

وينتج معظم البخار المتولد على نطاق كبير في منشآت الطاقة من خلال إشعال الفحم المسحوق. وفي المرحل الذي يعمل بالفحم المسحوق يتم سحق الفحم المطحون جيداً ليصبح مسحوقاً ناعماً ويتم ضخه مباشرة إلى محارق منفردة حيث يختلط بهواء إحراق سبق تسخينه، ثم يتم إحراقه في شكل لهب. وتستعمل طاقة التسخين الناتجة عن عملية الاحتراق لإنتاج البخار الذي يدفع مولدات توربينياً مجهّزاً لإنتاج الكهرباء. وتوضح الاختبارات الميدانية أن صورة التنوعات تتباين بشدة بين المراحل المختبرة التي تعمل بالفحم المسحوق (وانغ وآخرون، 2010).

والإشعال بجهاز الوقود لا يزال يستعمل في بعض أجزاء العالم، وذلك أساساً في المراحل الصغيرة. وفي نظام الإشعال بالوقاد يمر الهواء الساخن في اتجاه صاعد من خلال فتحات في حاملة الوقود. وتوضع أجهزة ترطيب في المناطق الواقعة أسفل حاملة الوقود من أجل الوصول إلى التوجيه الصحيح لتدفق الهواء. ويضيف الإحراق فوق النار (أي الهواء الذي يضاف فوق الشبكة الحاملة للوقود) مزيداً من الاضطراب للغازات الصاعدة من الشبكة الحاملة للوقود ويوفر الهواء المطلوب لجزء الوقود الذي يشتعل بشكل معلق. وعموماً، تنتج الوقودات كمية أقل من الجسيمات لكل وحدة من الوقود

المشتعل وتنتج جسيمات أكبر مقارنة بإشعال الفحم المسحوق، لأن الإشعال يحدث في طبقة وقود ساكنة بدون انتقال كميات كبيرة من الرماد إلى غازات العادم.

والإشعال على طبقة مميّعة مفيد خصيصاً في أجل التعامل مع أنواع الفحم من نوعية منخفضة (دون حاجة إلى التجفيف). وفي جهاز إشعال ذي قاعدة مميّعة من نوع طبقة الفقاعات، يتم تنظيم حجم جسيمات الفحم وسرعة الهواء الرأسي لإنشاء سطح أفقي منفصل يعمل على فصل الطبقة النشطة عن التدفق المسحوب من الفرن المفتوح الواقع فوقها. والآلية الأساسية لضبط درجة حرارة الطبقة السفلى ونقل الحرارة إلى جدران جهاز الاحتراق وإلى أي سطح تسخين مغمور في سطح قاعدة مرجل الطبقة المميّعة هي التباين في موجودات المواد الصلبة. ويمكن التحكم في درجة حرارة جهاز الاحتراق ذي القاعدة المميّعة في نطاق ضيق. ويوضّح قياس تراكيزات الزئبق المأخوذة في الموقع من مرجل ذي قاعدة مميّعة دواراً أن زئبق الجسيمات هو نوع الزئبق الغالب في غاز مدخنة المرجل (دوان وآخرون، 2010).

وفي الإشعال الإعصاري، يتم حرق الفحم المحروش (ولكن غير المسحوق) في غرفة احتراق تدور بسرعة تحت درجات حرارية عالية، وتحوّل معظم المادة المعدنية في الفحم إلى خبث سائل. بعد ذلك تدخل الغازات الساخنة إلى الفرن حيث تشع الحرارة إلى جدران الفرن وتحمل الحرارة إلى البخار المتولّد، الذي يدفع مولداً توربينياً مجهزة لإنتاج الكهرباء. وتولّد المراجل الإعصارية رماداً متطايراً يقل عن الرماد المتطاير الصادر عن مراجل الفحم المسحوق لكل وحدة من الفحم المحروق، لأن معظم المادة المعدنية في المرجل الإعصاري يتحول إلى خبث سائل يتم جمعه من قاع غرفة الاحتراق الإعصاري.

### 3- قائمة تقنيات تخفيض انبعاثات الزئبق

يصف هذا القسم نُهج التعامل مع تخفيض انبعاثات الزئبق وتكنولوجيات الضبط التي يمكن النظر فيها لتحديد أفضل التقنيات المتاحة لأي طرف أو مرفق (انظر القسم 5 أدناه). وتشمل معالجة الفحم والفوائد المشتركة مع إزالة الزئبق والتقنيات المخصصة لإزالة الزئبق.

#### 1-3 غسل الفحم

يقلل غسل الفحم المحتوى من الرماد ويحسن قيمة التسخين وهو ما يزيد من كفاءة المراحل (ساتيامورتي، 2007). وفي حين أن غسل الفحم يستهدف في المقام الأول التقليل من الرماد ومحتوى الكبريت في الفحم فإنه يمكن أن يقلل أيضاً من محتوى الزئبق في الفحم، ويحدث ذلك بالفعل في بعض الحالات. ويتضمن الفحم الحام شوائب معدنية مثل الصخور والصلصال التي يشار إليها باعتبارها من الرماد. وينبغي حسب الاقتضاء معالجة هذا الفحم الحام (أو تنظيفه) لتقليل المحتوى من الرماد وزيادة قيمة التسخين وتقليل الجسيمات والكبريت وكذلك احتمال تقليل المحتوى من الزئبق للوصول في نهاية المطاف إلى انبعاثات أقل عند حرق الفحم في المرجل. وبالإضافة إلى ذلك، فإن إزالة الشوائب المعدنية يقلل أيضاً تكاليف التشغيل والصيانة ويطيئ تدهور نظام المرجل. ولكن ينبغي أن يلاحظ أن معظم أنواع اللغيت والفحم البني لا تقبل أساليب غسل الفحم التقليدية (مؤسسة المهندسين الكيميائيين، 1997).

ويمكن أيضاً أن تزيل أساليب غسل الفحم التقليدية بعض الزئبق المصاحب للمواد المعدنية غير القابلة للاشتعال. ومع ذلك فإن هذه الأساليب لن تقوم نمطياً بإزالة الزئبق المصاحب لهيكل الكربون العضوي في الفحم (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2002). وتستشهد إحدى المجلات ببيانات اختبار 26 عينة فحم قيري من الولايات المتحدة أظهرت اتساع نطاق مقدار الزئبق الذي تمت إزالته بغسل الفحم (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 1997). وقد تأكد هذا الاتجاه بدراسة أخرى (مؤسسة الولايات المتحدة للمسح الجيولوجي، 2014)، خلصت إلى أن غسل الفحم يتصف بالفعالية في تقليل تركيزات العناصر المصاحبة للكبريت مثل الزئبق. ولكن دراسة أخرى تذكر انخفاضاً متوسطاً للزئبق على أساس الطاقة بنسبة 37 في المائة (تول- أونيل وآخرون، 1999).

والتباين في انخفاضات الزئبق المذكورة أعلاه قد يكون تابعاً لنوع العملية المستعملة لغسل نوع معين من الفحم ورتبة الفحم وطبيعة الزئبق في مصفوفة الفحم. وباختصار، فإن إزالة بعض الزئبق من الفحم أمر ممكن في حالة استخدام الأساليب التقليدية لغسل الفحم. ولكن فعالية إزالة الزئبق أثناء غسل الفحم بالطريقة التقليدية تتباين بصورة واسعة حسب مصدر الفحم وطبيعة الزئبق الموجود فيه.

*الآثار الشاملة لعدة وسائل نتيجة غسل الفحم*

يولد غسل الفحم ملاطاً من النفايات المحتوية على الزئبق. وهناك احتمال لتلوث التربة أو المياه الجوفية في حالة عدم إدارة ملاط غسل الفحم بطريقة آمنة.

#### 2-3 مساهمة نظم ضبط تلوث الهواء في إزالة الزئبق

تعمل نظم ضبط تلوث الهواء التي تقام أساساً لضبط ثنائي أكسيد الكبريت أو كلوريد الهيدروجين أو الجسيمات الدقيقة على إزالة الزئبق من غاز المداخن. ويسمى ذلك المنافع المشتركة لإزالة الزئبق. وتحقق المنافع المشتركة لإزالة الزئبق من معدات ضبط تلوث الهواء غير الزئبقية في معظم الأحيان بطريقتين أساسيتين: إزالة الزئبق المؤكسد في جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المداخن وإزالة الزئبق العالق بالجسيمات الدقيقة في جهاز لضبط الجسيمات الدقيقة، مثل المرسب الكهروستاتيكي أو المرشح النسيجي. والمنافع المشتركة لإزالة الزئبق يمكن أن تتحقق أيضاً بأجهزة الامتصاص الخفيفة بالرش. ويمكن تحقيق كميات متباينة من إزالة الزئبق حسب تشكيلة معدات مكافحة التلوث. ويتضمن الجدول 2 (سريفاستافا وآخرون، 2006؛ المكتب الأوروبي للمكافحة المتكاملة للتلوث ومنعه، 2013) لمحة عامة عن حجم

المنافع المشتركة لإزالة الزئبق بالنسبة لتشكيلات مختلفة من نظم ضبط تلوث الهواء. وينبغي أن يلاحظ أن المنافع المشتركة لإزالة الزئبق كما ترد في الجدول 2 تتباين حسب خصائص الفحم والبارامترات التشغيلية لنظم ضبط تلوث الهواء.

## الجدول 2 - لمحة عامة عن المنافع المشتركة لإزالة الزئبق في نظم ضبط تلوث الهواء

التقاط الزئبق النوعي	معدات الضبط الموجودة
التقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات؛ التقاط أفضل من أنواع الفحم المرتفع الكلور عن أنواع الفحم المنخفضة الجودة	ESPC فقط
التقاط منخفض	ESPh فقط
التقاط جيد للزئبق المؤكسد	FF فقط
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل وجود زئبق مؤكسد قابل للذوبان في غاز المدخنة. والتقاط سيئ نسبياً من أنواع الفحم المنخفضة الجودة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة.	ESPC + wet FGD
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور. بفضل وجود الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. والتقاط سيئ نسبياً من أنواع الفحم المنخفضة الجودة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. ويمكن أن يتأكسد الزئبق النقي عبر المرشح النسيجي ويتم التقاطه في جهاز التنظيف الرطب.	ESPh + wet FGD
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور. ويُتَظَر أن تقل المنافع المشتركة للالتقاط من أنواع الفحم المنخفضة الجودة.	SDA + FF
بوجه عام، التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل وجود زئبق مؤكسد قابل للذوبان في غاز المدخنة. والتقاط سيئ نسبياً من أنواع الفحم المنخفضة الجودة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. ويمكن أن يتأكسد الزئبق النقي عبر المرشح النسيجي ويتم التقاطه في جهاز التنظيف الرطب.	FF + Wet FGD
التقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات، والتقاط أفضل من أنواع الفحم المرتفع الكلور عن الأنواع المنخفضة الجودة.	SCR + ESPC
التقاط منخفض	SCR + ESPh
التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاختزال الحفزي الانتقائي. ويتحسن الالتقاط من أنواع الفحم المنخفض الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. والتقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات	SCR + ESPC + wet FGD
التقاط مرتفع جداً من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاختزال الحفزي الانتقائي. ويتحسن الالتقاط من أنواع الفحم المنخفض الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. والجمع بين المبادل الحراري والمرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض يُعزِّز التقاط الزئبق العالق بالجسيمات والزئبق في طور البخار.	SCR + HEX + LLT-ESP + wet FGD

التقاط الزئبق النوعي	معدات الضبط الموجودة
التقاط جيد عموماً من أنواع الفحم المرتفعة الكلور ويقل الالتقاط في الأنواع المنخفضة الجودة. ويُعزَّز الاختزال الحفزي الانتقائي الالتقاط حيث يؤكسد الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد، نظراً لتوفر الكلور في غاز المدخنة	SCR + SDA + FF
التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاختزال الحفزي الانتقائي ويتحسَّن الالتقاط في حالة أنواع الفحم المنخفضة الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة.	SCR + ESPh + wet FGD
التقاط جيد من أنواع الفحم المرتفعة الكلور بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة الذي يدعمه الاختزال الحفزي الانتقائي. ويتحسَّن الالتقاط من أنواع الفحم المنخفضة الجودة بفضل زيادة كمية الزئبق المؤكسد القابل للذوبان في غاز المدخنة. ويمكن أن تؤدي إعادة انبعاث الزئبق النقي إلى تخفيض مقدار المنافع المشتركة. والتقاط جيد للزئبق العالق بالجسيمات	SCR + FF + wet FGD

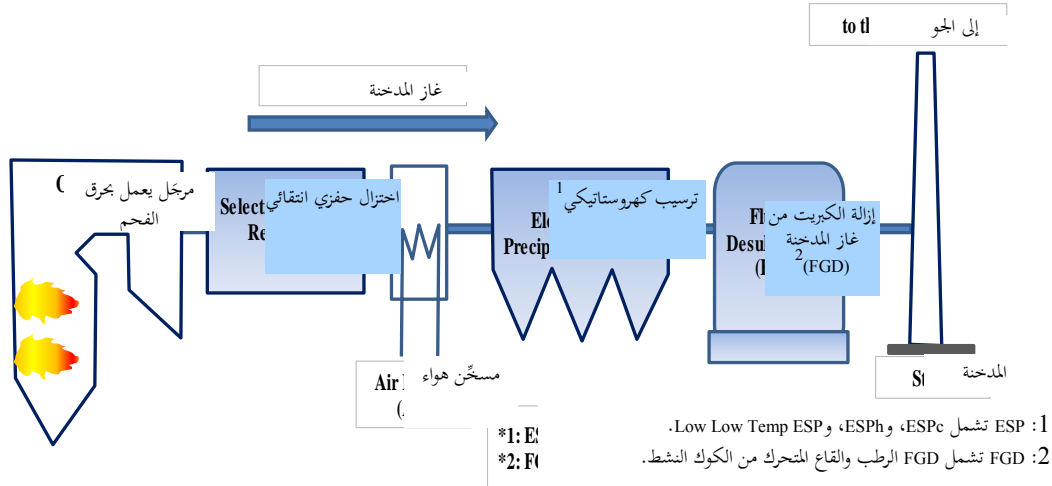
المفتاح:

ESP = المرسب الكهروستاتيكي، ESPc = المرسب الكهروستاتيكي في الجانب البارد؛ ESPh = المرسب الكهروستاتيكي في الجانب الساخن؛ FF = المرشح النسيجي؛ SCR = الاختزال الحفزي الانتقائي؛ SDA = جهاز امتصاص التجفيف بالرش (جهاز التنظيف الجاف)؛ FGD الرطب = جهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة؛ HEX = التبادل الحراري؛ LLT-ESP = المرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض

وتعني صفة منخفض الضبط بنسبة أقل من 30 في المائة، وتعني مرتفع/جيد الضبط بنسبة أكثر من 70 في المائة، وتعني "معتدل" الضبط بنسبة 30 إلى 70 في المائة.

وترد تشكيلات نُظِم ضبط تلوث الهواء المعروضة في الجدول 2 (FGD+ESPh+SCR) بصورة تخطيطية في الشكل 3 أدناه. ويرد أدناه (إيتو وآخرون، 2006). وعلى سبيل المثال، حققت هذه المجموعة من الأجهزة في اليابان كفاءة في إزالة الزئبق بمتوسط 74 في المائة (إيتو وآخرون، 2006). ولذلك يمكن أن تضبط تقنيات المنافع المشتركة ملوثات الهواء المتعددة، بما فيها الزئبق.



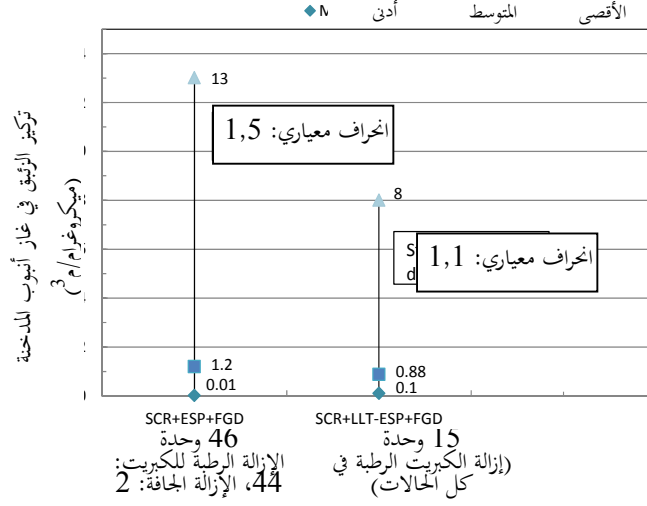


الشكل 3- رسم تخطيطي لتشكيلة نمطية من منشآت طاقة تعمل بحرق الفحم في اليابان (إيتو وآخرون، 2006) (منقح)

ويمكن أن يتحقق مستوى مرتفع من المنافع المشتركة لإزالة الزئبق بجمع الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسبات الكهروستاتيكية في الجانب البارد (ESPC) وأجهزة التنظيف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (FGD). والجمع بين هذه التقنيات أمر نمطي تماماً في المنشآت المتقدمة للطاقة التي تعمل بحرق الفحم في بعض البلدان ويستعمل على نطاق واسع في اليابان على سبيل المثال، كما يتضح في الشكل 4. والجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسب الكهروستاتيكي وإزالة الكبريت من غاز المدخنة كما يتضح من هذه الأمثلة يمكن أن يحقق كفاءة إزالة تبلغ 50-90 في المائة في حالة أكاسيد النيتروجين وأكثر من 99 في المائة في حالة الجسيمات الدقيقة العالقة و76-98 في المائة في حالة ثنائي أكسيد الكربون، إلى جانب كفاءة عالية لإزالة الزئبق بمتوسط 74 في المائة، ويؤدي ذلك إلى 1,2 ميكروغرام/م<sup>3</sup> من تركيز الزئبق في غاز المدخنة في هذا المثال. وبالإضافة إلى ذلك، فإن الجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض، الذي تبلغ درجة حرارة تشغيله 90 درجة مئوية بالإضافة إلى التنظيف الرطب لإزالة الكبريت يمكن أن يحقق كفاءة إزالة للزئبق بمستوى مرتفع إلى حد كبير يصل إلى 87 في المائة، مما يؤدي إلى 0,88 ميكروغرام/م<sup>3</sup> من تركيز الزئبق في غاز المدخنة في هذه الحالة بالتحديد. والمرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة الانخفاض، الذي يتطلب تبريد غاز المدخنة، يحسّن ضبط الجسيمات من خلال تقليل حجم الغاز وتخفيض مقاومة الرماد بسبب تكثف ثلاثي أكسيد الكبريت وامتزاز الرطوبة للرماد المتطاير، وزيادة الرطوبة للرماد المتطاير، كما يزيد امتصاص الزئبق في الرماد المتطاير بسبب انخفاض درجة حرارة غاز المدخنة. ويؤدي ذلك أيضاً إلى تجنب التكاليف المصاحبة لإعادة تسخين غاز المدخنة أو عمليات التعديل الرجعي التي يتطلبها أنبوب المدخنة الرطب. وفي الحالات التي لا تتطلب إعادة تسخين عادم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت فإن الحرارة المستعادة يمكن استخدامها في المرجل أو التوربين البخاري لتحسين كفاءة الوحدة، مما يؤدي إلى زيادة صافي الناتج (ناكاياما وآخرون، 2006، وأيواسوكي وآخرون، 2008).

ويظهر الشكل 4 اتساع نطاق تركيزات الزئبق. ويرجع ذلك إلى أن هذه الوحدات تشمل وحدات أقدم أو أصغر تعطي التركيزات الأعلى. ومن ناحية أخرى، فإن الودنتين التين تعملان بطبقة متحركة من الكوك النشط (بيترز، 2010)، وهي جهاز التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، يوضح أداءً أكثر ارتفاعاً عن جهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت. والأداء في هذه الحالة أكثر ارتفاعاً عن المجموعة التي تشمل المرسب الكهروستاتيكي بدرجة حرارة شديدة

الانخفاض وجهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (معهد البحوث المركزي لصناعة الطاقة الكهربائية واتحاد شركات الطاقة الكهربائية في اليابان، 2012).



ملحوظة: المرطب الكهروستاتيكي في مجموعة FGD+ESP+SCE يشمل ESPh يشمل ESPc، ESPc و LLT-ESP درجة حرارة التشغيل في ESPh تبلغ 300-400 درجة مئوية و 130-180 درجة مئوية في ESPc و 90-100 درجة مئوية في LLT-ESP

الشكل 4 - تركيز الزئبق في غاز المدخنة من منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم باستعمال مجموعة FGD+ESP+SCR ومجموعة FGD+LLT-ESP+SCR

ويخصص الجدول 3 كفاءة إزالة الزئبق لأجهزة ضبط تلوث الهواء في منشآت حرق الفحم في الصين. ويتضح من الجدول أنه في بعض الحالات يحقق الجمع بين المرسبات الكهروستاتيكية والإزالة الرطبة للكبريت من غاز المدخنة كفاءة في إزالة الزئبق تصل إلى 88 في المائة. والجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسبات الكهروستاتيكية والإزالة الرطبة للكبريت، وهي مجموعة تستعمل بصورة واسعة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في الصين، يمكن أن يحقق كفاءة أكبر لإزالة الغاز، تصل على سبيل المثال إلى 95 في المائة. ولوحظ أيضاً ارتفاع كفاءة إزالة الزئبق في حالة الجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرشحات النسيجية والتنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة.

الجدول 3 - كفاءة إزالة الزئبق حسب المجموعات النمطية لأجهزة ضبط تلوث الهواء في الصين (بالنسب المئوية) جانغ وآخرون، 2015

مجموعة أجهزة ضبط تلوث الهواء	المتوسط	الحد الأدنى	الحد الأقصى	الانحراف المعياري	عدد الاختبارات
التنظيف الرطب للحسيمات العالقة	23	7	59	18	8
المرسبات الكهروستاتيكية في الجانب البارد	29	1	83	19	64
المرشحات النسيجية	67	9	92	30	10
المرسبات الكهروستاتيكية في الجانب البارد +					
التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة	62	13	88	22	19
المرشحات النسيجية + التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة	86	77	97	10	3
الاختزال الحفزي الانتقائي + المرسبات الكهروستاتيكية + التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة	69	36	95	24	4
الاختزال الحفزي الانتقائي + المرشحات	93	86	99	9	2

النسيجية + التنظيف الرطب لإزالة الكبريت  
من غاز المدخنة

المرسبات الكهروستاتيكية الباردة + القاعدة  
المسيّلة الدائرية - التنظيف الرطب لإزالة  
الكبريت من غاز المدخنة + المرشحات  
النسيجية

1

68

68

68

ويوضح الجدول 4 أدناه قيم قياس انبعاثات الزئبق لمختلف منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم، التي تم التوصل إليها من خلال المنافع المشتركة لوسائل ضبط التلوث. والأمثلة المختارة في هذا الجدول توضح أن تقنيات الضبط ذات المنافع المشتركة تحقق في بعض الحالات تركيزات منخفضة من الزئبق في غاز المدخنة.

#### الجدول 4 - مستويات الانبعاثات المتحققة من خلال تقنيات المنافع المشتركة (بيانات جمعها الفريق العامل للزئبق الصفري، 2015)

المنشأة	نوع الفحم	مستوى الانبعاثات (مغ/متر عادي <sup>3</sup> ) (التسوية إلى 6% من محتوى O <sub>2</sub> )	حجم المرجل (ميغاواط حراري)	تقنية معالجة غاز المدخنة
Federico II - برينديسي، إيطاليا	فحم صلب	0,69	1 700	ESP+SCR+wFGD
Torrevaldaliga Nord، إيطاليا	فحم صلب	0,99	1 420	FF+SCR+wFGD
Impianto termoelettrico di Fusina، إيطاليا	فحم صلب	0,8	431	FF+SCR+wFGD
Heyden، ألمانيا	فحم صلب	0,5	2 150	ESP+SCR+wFGD
FHKW Mellach، النمسا	فحم صلب	0,5	543	FF+SCR+wFGD
Brindisi BR III & BR II، إيطاليا	فحم صلب	0,5	857	ESP+SCR
Krefeld، ألمانيا (مرجل صناعي)، Currenta	فحم صلب	0,2	105	FF
Salem Harbour، الولايات المتحدة الأمريكية	فحم صلب	0,4 - 0,2	300	ESP
Power plant Tusimice، الجمهورية التشيكية	لغنيت	2,6	890	ESP+wFGD
Neurath، ألمانيا، A and F	لغنيت	3,0	855	ESP+wFGD
Teplarna Tabor، الجمهورية التشيكية	لغنيت	3,3	199	ESP

ملحوظة: تستند جميع القيم إلى عينات دورية باستثناء Salem Harbour، التي تستند قيمتها إلى رصد مستمر للانبعاثات. والبيانات الواردة هي عن سنة 2010.

### 3-2-1 أجهزة ضبط الجسيمات

يوجد نوعان رئيسيان من أجهزة ضبط الجسيمات وتشمل المرسبات الكهروستاتيكية والمرشحات النسيجية. وتستخدم أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات أيضاً في المراحل العاملة بحرق الفحم.

### 3-1-2-3 المرسبات الكهروستاتيكية

تصمّم المرسبات الكهروستاتيكية نمطياً لتحقيق أكثر من 99 في المائة من الكفاءة في جمع الجسيمات، رهناً بمختلف العوامل المعروضة في القسم التمهيدي. وكفاءة جمع الجسيمات في المرسبات الكهروستاتيكية تُمثل أيضاً دالة على المحتوى الكبريتي في الفحم، الذي يؤثر على مقاومة الرماد المتطاير. فالفحم الذي يحتوي على مقادير متوسطة إلى مرتفعة من الكبريت ينتج رماداً متطائراً يسهل جمعه. أما الفحم الذي يحتوي على كبريت منخفض فينتج رماداً متطائراً بمقاومة أعلى وتزداد صعوبة جمعه. ويمكن أيضاً تغيير مقاومة الرماد المتطاير من خلال تقليل درجة الحرارة في المرسبات أو بتكثيف

الجسيمات قبل دخولها في المرسب بثلاثي أكسيد الكبريت ( $SO_3$ ) أو حامض الكبريت ( $H_2SO_4$ ) أو الماء أو الصوديوم أو النشادر ( $NH_3$ ).

وبالنسبة لأي رماد متطاير من الفحم تكون كفاءة جمع الجسيمات في المرسب دالة على حجم الجسيمات. فالجسيمات التي تزيد عن 1 ميكرومتر - 8 ميكرومتر يتم جمعها نظماً بكفاءات تبلغ 95 إلى 99,9 في المائة. ولكن الجسيمات التي يقترب حجمها من 0,3 ميكرومتر تدخل في منطقة تحميل سيئة تقلل كفاءة الجمع لتصل إلى 80-95 في المائة (لوليس، 1996).

ويمكن استعمال المرسب الكهروستاتيكي في أحد موقعين في نظام المرسل: ما يسمى مرسب "الجانب البارد" (ESPC) ومرسب "الجانب الساخن" (ESPh). ويتم تركيب مرسب الجانب البارد في اتجاه خروج مسخن الهواء (درجة حرارة غاز المدخنة تتراوح بين 130 درجة مئوية و180 درجة مئوية). ويتم تركيب مرسب الجانب الساخن في المنبع لمسخن الهواء (تتراوح درجة حرارة غاز المدخنة بين 300 درجة مئوية و400 درجة مئوية) ويمكن ذلك من الاستفادة من انخفاض مقاومة الرماد المتطاير في درجات الحرارة الأعلى. ويتسم ذلك بأهمية خاصة في الوحدات التي تعمل بحرق فحم منخفض الكبريت، مما يؤدي إلى رماد متطاير بمقاومة كهربائية أعلى. والمرسب الكهروستاتيكي الرطب هو نوع جديد من المرسبات ويتسم بكفاءة أعلى لجمع الجسيمات الدقيقة (ألتمان وآخرون، 2001 وستايل وآخرون، 2003). ولكن لم يتم بعد القيام بقياسات في الموقع بشأن إزالة الزئبق داخل المرسب الرطب.

ولوحظت مستويات متباينة من إزالة الزئبق في المرسبات الكهروستاتيكية. ويتوقف مستوى إزالة الزئبق على ما إن كان المرسب الكهروستاتيكي في الجانب البارد أو في الجانب الساخن، وعلى نوع الفحم المحروق، ونوع المرسل، وعوامل أخرى مثل محتوى الكبريت في الفحم ومستوى الكربون غير المحروق في الرماد المتطاير. والمرسب في الجانب الساخن يكون عموماً أقل فعالية في إزالة الزئبق عن المرسب المقام في الجانب البارد. وعلى سبيل المثال، فعلى الرغم من أن مستوى إزالة الزئبق المبلغ عنها باستعمال مرسب كهروستاتيكي يعمل على الفحم القيري تبلغ 30 في المائة فإن نطاق الإزالة المقاسة يتراوح بين صفر إلى حوالي 60 في المائة (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2001). وقد يكون المدى المقاس لإزالة الزئبق، وخاصة في حالة المرسب الكهروستاتيكي، دالة على إمكانية تحسين التقاط الزئبق نتيجة زيادة كفاءة أداة تجميع الجسيمات. ومن المهم أن نفهم أداء جمع الجسيمات في أي جهاز نظراً لأن ذلك يؤثر بدوره على قدرة الجهاز على تقليل انبعاثات الزئبق.

وتشير النمذجة الأساسية لإزالة الزئبق في المرسبات الكهروستاتيكية إلى أن تقييدات انتقال الكتلة قد تؤدي، حتى في الظروف المثالية، إلى تقييد إمكانية التقاط الزئبق بالجسيمات المتجمعة على الإلكتروودات في المرسب الكهروستاتيكي (كلاك، 2006 وكلاك، 2009). فالمرسبات تقوم بإزالة الزئبق العالق بالجسيمات (Hgr) فقط في عملية جمع الجسيمات. وهذا الزئبق العالق يرتبط تفضيلاً بالكربون غير المحروق. وقدرة امتزاز الزئبق في الجزئيات غير العضوية (الرماد المتطاير) هي قدرة منخفضة نظماً بالمقارنة بالكربون غير المحروق في الرماد المتطاير. وقد لوحظت علاقة بين كمية الكربون غير المحروق وإزالة الزئبق عبر المرسبات الكهروستاتيكية في حالة الرماد المتطاير من الفحم القيري (سنيور وجونسون، 2008). ويتضح هذا السلوك في الشكل 5 الذي يوضح النسبة المئوية للالتقاط (النسبة المئوية للزئبق الداخل إلى المرسب) كدالة على مقدار الكربون غير المحروق. وفي الشكل 5، يتم التعبير عن الزئبق غير المحروق باعتباره فاقدًا مقاساً عند الاشتعال (LOI). وكما نرى فإن الشكل يبين أن التقاط الزئبق يتراوح بين 20 و40 في المائة في مرسب يلتقط رماداً متطائراً يحتوي على حوالي 5 في المائة من الكربون غير المحروق. ومع ارتفاع محتوى الكربون غير المحروق، يمكن أن



وينبغي أن يلاحظ أن الآثار الإيجابية لثلاثي أكسيد الكبريت على التقاط الجسيمات قد يقابلها جزئياً تنافس ثلاثي أكسيد الكبريت مع الزئبق على الامتصاص في الرماد المتطاير.

### 2-1-2-3 المرشحات النسيجية

توفّر المرشحات النسيجية كفاءة عالية في إزالة الجسيمات الدقيقة بالمقارنة مع المرسبات الكهروستاتيكية ولا سيما بالنسبة للحزيمات دون الميكرونية.

ولوحظ أن إزالة الزئبق في المرشحات النسيجية أعلى عموماً منها في المرسبات الكهروستاتيكية. والمرشحات النسيجية أكثر فعالية في إزالة الجسيمات الدقيقة (الجسيمات دون الميكرونية، وهو الأمر الأكثر أهمية) من المرسبات الكهروستاتيكية، وهي تتجه عموماً إلى إزالة قدر أكبر من زئبق الطور الغازي عما تزيله المرسبات. وبالإضافة إلى طول وقت الاتصال فإن المرشحات النسيجية توفّر اتصالاً أفضل (حيث يخترق الغاز كُسب الفلتر) من المرسبات (حيث يمر الغاز على سطح الكُسب). ونتيجة لذلك تترجح أكسدة الزئبق النقي الغازي وتحويله إلى شكل يمكن التقاطه في حالة استعمال الفلتر النسيجي. وعلى سبيل المثال، أظهرت دراسة قارنت بين التقاط الزئبق في المرسبات الكهروستاتيكية والمرشحات النسيجية في منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم في الصين نسبة التقاط تتراوح من 1 إلى 33 في المائة في المرسبات وبين 9 و 92 في المائة في المرشحات (جانغ وآخرون، 2015). ويبلغ متوسط كفاءات إزالة الزئبق في المرسبات والمرشحات في منشآت الطاقة الصينية العاملة بحرق الفحم 29 في المائة و 67 في المائة على التوالي (جانغ وآخرون، 2015).

ويمكن أيضاً أن تتكامل المرشحات النسيجية مع المرسبات الكهروستاتيكية لتصبح مرسبات-مرشحات، وهو ما يجري استخدامه في الصين على نطاق مشابه لنطاق استخدام المرشحات النسيجية. وتبلغ كفاءة إزالة الزئبق في المرسبات-المرشحات درجة متوسطة بين كفاءة المرسبات وكفاءة المرشحات. ويمكن تحقيق إزالة الزئبق بنسبة 43 في المائة في المتوسط عند استعمال المرسبات-المرشحات (جانغ، 2015).

### 3-1-2-3 أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات

معظم المراحل الصناعية الصغيرة والمتوسطة الحجم في الصين مجهزة بأجهزة تنظيف رطب للجسيمات من أجل تقليل انبعاثات الجسيمات. وتشابه العمليات الكيميائية في نظام جهاز التنظيف الرطب للجسيمات مع نظيرتها في التنظيف الرطب للكبريت من غاز المدخنة. ولكن أجهزة التنظيف الرطب التقليدية للجسيمات تستعمل الماء فقط كمادة ماصة، مما يجعل إعادة انبعاث الزئبق النقي كبيرة. وأوضحت القياسات في الموقع كفاءة إزالة الزئبق بمتوسط يبلغ 23 في المائة (بين 7 و 59 في المائة) عند استعمال أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات في المراحل الصناعية العاملة بحرق الفحم في الصين.

وأجهزة التنظيف الرخامية المتكاملة (IMS) هي نوع خاص من أجهزة التنظيف الرطب للجسيمات للإزالة المتزامنة للجسيمات وثنائي أكسيد الكبريت، وتستعمل على نطاق يتزايد اتساعاً في منشآت الطاقة بحرق الفحم في الصين لأنها اقتصادية من الناحية التكنولوجية. وتستعمل أجهزة التنظيف الرخامية محلولاً قلويًا كمادة ماصة، وهو أكثر فعالية في التقاط الزئبق المؤكسد، ويشبه التنظيف الرطب للكبريت. وكفاءة أجهزة التنظيف الرخامية في إزالة الزئبق يمكن أن تكون أعلى من أجهزة التنظيف الرطب التقليدية للجسيمات نتيجة قدرتها على ضبط ثنائي أكسيد الكبريت، ولكن لم تجر بعد قياسات في الموقع.

التأثيرات عبر الوسائط لأجهزة ضبط الجسيمات

توجد آثار محتملة عبر الوسائط تنطبق على أجهزة ضبط الجسيمات. ويمكن أن يعاد انبعاث الزئبق في الرماد المتطاير إذا تم تسخين الرماد المتطاير المتجمّع في أجهزة ضبط الجسيمات أثناء إعادة الاستخدام. وعلى سبيل المثال، يمكن إطلاق

الزئبق العالق بالرماد المتطاير في الهواء إذا استخدم كمادة خام في فرن الإسمنت. وهناك أيضاً احتمال أن يرشح الزئبق من الرماد المتطاير إلى المياه الجوفية. وتلزم الإدارة السليمة للرماد المتطاير المتجمّع في أجهزة ضبط الجسيمات.

### 3-2-2 أجهزة ضبط ثنائي أكسيد الكبريت

ترد أدناه تقنيتان رئيسيتان تستعملان لتخفيض انبعاثات ثنائي أكسيد الكبريت: الأولى هي التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة والثانية هي التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، أو جهاز التنظيف الجاف.

### 3-2-2-1 التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة

في المنشآت المجهّزة بالتنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة يمكن زيادة مقدار المنافع المشتركة للإزالة من خلال زيادة جزء الزئبق المؤكسد في محتوى الزئبق الكلي لغاز المدخنة أو من خلال تحسين فعالية ضبط الجسيمات (سلوس، 2009). ويمكن تحقيق زيادة جزء الزئبق المؤكسد بإضافة مركبات كيميائية (عوامل مؤكسدة) أو بأكسدة الزئبق على العوامل الحفّازة (أمار وآخرون، 2010). ويمكن أن يوضع العامل الحفّاز في غاز المدخنة لغرض وحيد وهو أكسدة الزئبق أو يمكن إقامته لغرض آخر (مثلاً لضبط انبعاثات أكاسيد النيتروجين) وبالتالي توفير منافع مشتركة. وتشغيل التنظيف الرطب لإزالة الكبريت يتطلب إنشاء جهاز لضبط الجسيمات عند منبع جهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (سريفاستافا ويوسفستس، 2001).

وكما ذكرنا من قبل، تتسم المركبات الغازية للزئبق المؤكسد عموماً بأنها قابلة للذوبان في الماء، ولهذا فإنه من المتوقع أن تستطيع نُظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت التقاطها بكفاءة (ريدينغر وآخرون، 1999؛ وديفيتو وروسنهوفر 1999). ولكن الزئبق النقي الغازي غير قابل للذوبان في الماء وبالتالي لا يمتص في حمأة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت. ويتضح من البيانات المأخوذة من المرافق الفعلية أنه يمكن أن نتوقع التقاط الزئبق المؤكسد بمتوسط 75 في المائة بين (67 و 93 في المائة) في نُظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة على أساس الكالسيوم (شين وآخرون، 2007؛ وكيم وآخرون، 2009؛ ووانغ وآخرون، 2010؛ وسلوس، 2015)، رغم وجود حالات حدث فيها قياس التقاط أقل بكثير نتيجة توازن كيميائي غير موات في جهاز التنظيف (مكسا وفوجي وارا، 2004).

وقد تم إثبات أن الزئبق المؤكسد قد يتم احتزاله في بعض الظروف إلى زئبق أولي في أجهزة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، ويمكن بعد ذلك إعادة انبعاثه (مولان وآخرون، 2003). وهكذا فإن الوصول إلى الاستراتيجية المثلى للمنافع المشتركة يعني في بعض الأحيان الحفاظ، في حالة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت، على كمية الزئبق المؤكسد في النظام من أجل منع إعادة انبعاث الزئبق. وقد تحدث إعادة انبعاث الزئبق عند امتصاص الزئبق المؤكسد في حمأة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت، وتحويله إلى زئبق أولي، ونقله بعد ذلك إلى الطور الغازي للخروج من جهاز التنظيف.

والأثر الصافي لإعادة الانبعاث هو انخفاض مستوى إزالة الزئبق بواسطة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة. ويتوقف حدوث ومدى إعادة انبعاث الزئبق من التنظيف الرطب لإزالة الكبريت على الخواص الكيميائية للتنظيف الرطب لإزالة الكبريت (ريننغر وآخرون، 2004). ويبدو أيضاً أن هناك إمكانية متزايدة لإعادة انبعاث الزئبق في التنظيف الرطب لإزالة الكبريت مع حدوث تراكيزات كبيرة للزئبق في مرحلة السيولة (شانغ وآخرون، 2008). وفي بعض الحالات، يتعيّن إضافة عوامل كيميائية أو كربون منشّط إلى سائل التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من أجل ضبط إعادة الانبعاث.

### 3-2-2-2 التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة

تستعمل مجففات الرش غمطياً لضبط انبعاثات ثنائي أكسيد الكبريت من المصادر التي تحرق الفحم المحتوي على درجات منخفضة إلى متوسطة من الكبريت، أو في المنشآت الأصغر التي تعمل بحرق الفحم. ويمكن إزالة ما يصل إلى نحو 95 في المائة من الزئبق باستخدام مجموعات تتألف من أجهزة امتصاص التحفيف بالرش والمرشحات النسيجية في المراحل العاملة بحرق الفحم القيرى. ولكن يلاحظ التقاط للزئبق بدرجة أقل كثيراً (حوالي 25 في المائة) في الوحدات العاملة بأجهزة امتصاص التحفيف بالرش والمرشحات النسيجية في المراحل العاملة بحرق اللغنيت أو غيره من أنواع الفحم المنخفضة الجودة ذات محتوى الكلور المنخفض (سنيور، 2000). وتنظيف أنواع الهالوجين في أجهزة امتصاص التحفيف بالرش قد يجعل عملية الأكسدة وما يليها من التقاط الزئبق (معظمه في شكل زئبق أولي من هذه الأنواع من الفحم) عند مخرج المرشح النسيجي أقل فعالية. وأحياناً، يكون التقاط الزئبق من الفحم المنخفض الجودة بواسطة المرشحات النسيجية وحدها أعلى مما يتحقق في الجمع بين أجهزة امتصاص التحفيف بالرش والمرشحات النسيجية (سريفستافا وآخرون، 2006).

وهناك تكنولوجيا لأجهزة التنظيف الجاف لإزالة الكبريت تزايد استعمالها في الآونة الأخيرة في منشآت حرق الفحم، وهي أجهزة التنظيف الجاف الدوارة. وكما يحدث في حالة أجهزة امتصاص التحفيف بالرش فإن أجهزة التنظيف الجاف الدوارة تحتوي على غرفة تفاعل ومرشح نسيجي لالتقاط المنتجات الثانوية والرماد. والصفة التي تميز أجهزة التنظيف الجاف الدوارة هي أن مواد التفاعل التي تدخل إلى غرفة التفاعل يتم تحويلها إلى سائل في غرفة التفاعل قبل أن تمر إلى المرشح النسيجي. ويستخدم رش المياه على أرضية غرفة التفاعل من أجل ضبط درجة حرارة المفاعل. ومواد التفاعل هي الجير الرطب ومواد صلبة أعيد تدويرها من المرشح النسيجي. ويوجد في أجهزة التنظيف الجاف الدوارة تركيزات صلبة تزيد عن ما يوجد في أجهزة امتصاص التحفيف بالرش الأمر الذي يحقق تخفيضات لثنائي أكسيد الكربون بنسب تصل إلى 98 في المائة، بالمقارنة مع تخفيض حده الأقصى 95 في المائة تحققه أجهزة امتصاص التحفيف بالرش. وبالإضافة إلى ذلك فإن أجهزة التنظيف الدوارة يمكن أن تعالج غاز المدخنة الناتج عن فحم يحتوي نسبة كبريت أعلى من تلك التي تعالجها أجهزة امتصاص التحفيف بالرش لأن التقاط ثنائي أكسيد الكبريت لا تحدده حسابات التكافؤ الكيميائي للحمأة (إيك، 2009).

والتقاط الزئبق في أجهزة التنظيف الدوارة في سياق المنفعة المشتركة يشابه من حيث الحجم التقاطه في منظفات أجهزة امتصاص التحفيف بالرش التي تحقق قدراً كبيراً من التقاط الزئبق المؤكسد. وبناءً على ذلك، يمكن تحقيق درجة أعلى بكثير من المنافع المشتركة لالتقاط الزئبق في حالة أنواع الفحم المرتفعة الكلور عما يحدث في حالة أنواع الفحم المنخفضة الكلور (بابكوك باور، 2012).

#### آثار أجهزة ضبط ثنائي أكسيد الكبريت الشاملة لعدة وسائط

في نظام التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة يتطلب الاحتفاظ بالزئبق من خلال نظام التنظيف الرطب معالجة عالية الجودة لمياه الفضلات والحمأة للتأكد من أن التأثير لن يقتصر على مجرد انتقال الزئبق من الهواء إلى الماء. ولدى استخدام جبس إزالة الكبريت لإنتاج ألواح التبطين، ينشأ احتمال إعادة انبعاث الزئبق الذي يحتويه هذا الجبس. ولدى استخدام نظام امتصاص التحفيف بالرش مع المرشح النسيجي ينشأ احتمال نض الزئبق من الرماد المتطاير المتجمع في المرشح إلى المياه الجوفية. ولذلك تقوم الحاجة إلى الإدارة السليمة بيئياً للرماد المتجمع في المرشحات النسيجية.



آثار أجهزة ضبط ثاني أكسيد الكبريت الشاملة لعدة وسائط (غير المتصلة بالزئبق)

يؤدي تشغيل نظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة عموماً إلى زيادة استهلاك الطاقة، وهذه الزيادة تبلغ نمطياً 5 في المائة.

### 3-2-3 الاختزال الحفزي الانتقائي لضبط أكاسيد النيتروجين

صُممت تكنولوجيا الاختزال الحفزي الانتقائي، من أجل تقليل أكاسيد النيتروجين من خلال التفاعل المعزّز حفزياً لأكاسيد النيتروجين مع غاز النشادر ( $NH_3$ )، مما يؤدي إلى اختزال أكاسيد النيتروجين إلى الماء والنيتروجين. ويحدث هذا التفاعل على سطح الحفّاز، الذي يوضع في أنبوب تفاعل. وفي ظروف معينة، تبين أن حفّازات الاختزال الحفزي الانتقائي تعيّر تنوعات الزئبق حيث تدعم أكسدة الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد، وخاصة في حالة الفحم المرتفع الكلور. وينبغي أن يلاحظ أن الاختزال الحفزي الانتقائي نفسه لا يزيل الزئبق. وبدلاً من ذلك، فإن هذا الاختزال يؤدي، من خلال زيادة مقدار الزئبق المؤكسد، إلى تحسين التقاط الزئبق في أجهزة ضبط الجسيمات وأنظمة التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، مما يؤدي إلى تعزيز إزالة الزئبق (شو، 2004؛ فافال وآخرون، 2013).

ونظراً لأن المعاملات التشغيلية للاختزال الحفزي الانتقائي (مثل درجة الحرارة وتركيز غاز النشادر في غاز المدخنة وحجم قاعدة الحفّاز وعمر الحفّاز) ستتحدّد عموماً بموجب استراتيجية ضبط أكاسيد النيتروجين، فإن المعامل الذي ينطوي على أفضل احتمال للوصول إلى الإزالة المثلى للزئبق هو محتوى الكلور في الفحم. وكما يرد في القسم الوارد أدناه المتعلّق بخلط الفحم والذي يستند إلى بيانات من الولايات المتحدة، فإن أكسدة الزئبق النقي إلى زئبق مؤكسد تزيد في حالة الفحم القيرى عنها في حالة الفحم دون القيرى. وهكذا فإن الحدّ الأقصى من المنافع المشتركة للأنظمة الحالية للاختزال الحفزي الانتقائي قد تتحقّق من خلال الخلط الصحيح للفحم أو من خلال إضافة البروميدي (فوستين وآخرون، 2006). ويجري تصميم حفّازات الاختزال الحفزي الانتقائي للوصول إلى الحدّ الأمثل من كلاً إزالة أكاسيد النيتروجين وأكسدة الزئبق.

واستخدام الاختزال الحفزي الانتقائي يزيد من مدى أكسدة الزئبق والتقاطه، وخاصة مع زيادة جزء الفحم القيرى في الخليط الذي يجمع بين نوعي الفحم القيرى ودون القيرى. وأثبتت دراسة ميدانية في منشأة مرافق كبيرة تعمل بحرق خليط من الفحم بنسبة 60 في المائة من الفحم دون القيرى إلى 40 في المائة من الفحم القيرى في مرحلتي متشابهين (واحد منهما يعمل بنظام الاختزال الحفزي الانتقائي والآخر لا يعمل به) وجود زيادة في نسبة الزئبق المؤكسد من 63 في المائة في حالة عدم وجود الاختزال الحفزي الانتقائي لتصل إلى 97 في المائة في حالة وجود هذا الاختزال. وعموماً، ترتفع أكسدة الزئبق في نظم الاختزال الحفزي الانتقائي مع زيادة النسبة المئوية للفحم القيرى في أي خليط من الفحم القيرى ودون القيرى. وعلى سبيل المثال، في حالة خليط من الفحم بنسبة 65 من الفحم دون القيرى إلى 35 من الفحم القيرى كان الارتفاع بمقدار 49 نقطة مئوية (من 13 إلى 62 في المائة). ولكن في حالة خليط بنسبة 21:79، كانت الزيادة 14 نقطة مئوية فقط، (أي من 6 إلى 20 في المائة) (سير وآخرون، 2008).

ومن الممكن أن يحقق الفحم دون القيرى غير المخلوط في وحدة لا تعمل بنظام الاختزال الحفزي الانتقائي نسبة تتراوح بين صفر و40 في المائة من الزئبق المؤكسد (معهد شركات الهواء النظيف، 2010). وفي دراسة ميدانية أخرى، أظهرت الاختبارات التي أجريت في ثلاث منشآت تعمل بحرق الفحم القيرى، أكسدة للزئبق عبر الاختزال الحفزي الانتقائي، بنسبة تصل إلى 90 في المائة وأكثر. وكانت إزالة الزئبق الناتجة عن ذلك في أجهزة التنظيف الرطب التالية تتراوح من 92 إلى 84 في المائة مع تشغيل نظام الاختزال الحفزي الانتقائي مقارنة بنسبة 43-51 في المائة بدون تشغيل هذا

الاختزال. ولكن المنشآت العاملة بحرق الفحم دون القيرى أظهرت تغيراً ضئيلاً في تنوعات الزئبق عبر مفاعلات الاختزال الحفزي الانتقائي (لاودال، 2002).

وأظهرت القياسات الموقعية في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في الصين أن معدّل أكسدة الزئبق النقي داخل نظام الاختزال الحفزي الانتقائي كانت في نطاق 34-85 في المائة، وتأثرت بمحتوى الزئبق الكلي والكلور في الفحم ومعدل حقن غاز النشادر في نظام الاختزال الحفزي الانتقائي (جانغ وآخرون، 2013).

آثار أجهزة ضبط أكاسيد النيتروجين الشاملة لعدة أوساط

مع أكسدة الزئبق باستخدام الاختزال الحفزي الانتقائي ينشأ احتمال لزيادة محتوى الزئبق في الرماد المتطاير والجبس الناجم عن إزالة الكبريت من غاز المداخن. والحفاظ المستخدم في عملية الاختزال قد يكون خطراً بطبيعته. وحفاظ عملية الاختزال ينبغي إعادة توليده أو التخلص منه بطريقة سليمة بيئياً.

آثار أجهزة ضبط أكاسيد النيتروجين الشاملة لعدة وسائط (غير المتصلة بالزئبق)

يؤدي تشغيل نظام الاختزال الحفزي الانتقائي عموماً إلى زيادة استهلاك الطاقة وهذه الزيادة تبلغ نمطياً 3 في المائة.

### 3-3 تقنيات تعزيز المنافع المشتركة

يمكن تحقيق تعزيز المنافع المشتركة من خلال خلط الفحم أو مضافات الفحم أو بعدد من التقنيات الأخرى التي يرد وصفها أدناه.

### 3-3-1 خلط الفحم

يستعمل خلط الفحم (أو تبديله) في منشآت الطاقة في إطار استراتيجية تهدف إلى تلبية حدود انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت ( $SO_2$ ) بطريقة تحقق منافع مشتركة، شريطة أن يكون خلط الفحم متوافقاً مع تصميم منشأة الطاقة. ونمطياً، يتم خلط أنواع الفحم القيرى المرتفعة الكبريت بأنواع فحم دون قيرى منخفضة الكبريت لتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت. ومن الآثار الجانبية غير المرغوبة لهذه الاستراتيجية الرامية إلى ضبط انبعاثات ثاني أكسيد الكبريت أن تنوعات الزئبق قد تتغير وبذلك تقل كمية الزئبق المؤكسد وتزيد كمية الزئبق النقي، وهو ما يضر بالتقاط الزئبق في نظم إزالة الكبريت من غاز المدخنة الواقعة في المرحلة التالية. ولكن خلط الفحم قد يستخدم أيضاً لزيادة كمية الزئبق المؤكسد في غاز المدخنة. وبالإضافة إلى المحتوى من الزئبق، فإن بعض خصائص الفحم، مثل المحتوى من الكلور والبروم أو المحتوى القلوي، تتسم بالأهمية من ناحية إزالة الزئبق وينبغي أن تكون معروفة. والفحم القيرى ينتج نمطياً جزءاً أكبر من الزئبق المؤكسد في غاز المدخنة عما ينتجه الفحم دون القيرى. ونظراً لأن الزئبق المؤكسد قابل للذوبان في الماء فإنه أكثر سهولة للالتقاط في نظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة. وبالتالي فإن كفاءة التقاط الزئبق في نظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة تتوقف إلى حد كبير على جزء الزئبق المؤكسد في مدخل نظام التنظيف الرطب (ميلار وآخرون، 2006).

ويناقش أدناه مثال لخلط الفحم المستخدم لتحسين إزالة الزئبق في معدات ضبط تلوث الهواء الواقعة في المرحلة التالية. ويوضح الجدول (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، 2010) بيانات بشأن خصائص الفحم دون القيرى النمطي (من ولاية ويومنغ، الولايات المتحدة) والفحم القيرى (من ولاية إيلينوي، الولايات المتحدة). وينبغي أن يلاحظ أن الخصائص التي يتضمنها الجدول 5 ترد لأغراض التوضيح فقط وستتباين حسب مصدر الفحم.

### الجدول 5 - مقارنة خصائص الفحم دون القيرى والفحم القيرى

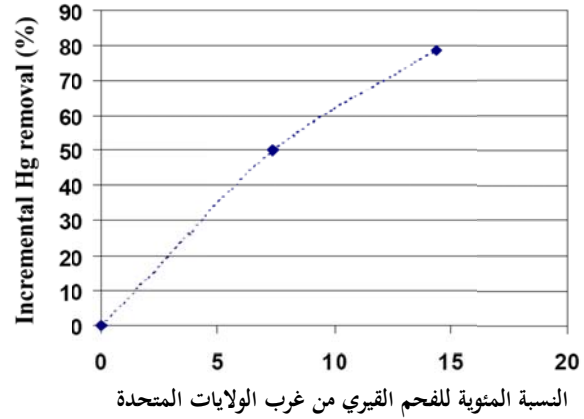
المحتوى	الفحم دون القيرى	الفحم القيرى
---------	------------------	--------------

النسبة المئوية من الوزن	النسبة المئوية من الوزن	
0,02	0,0006	البروم <sup>أ</sup>
0,100	0,003	الكلور <sup>أ</sup>
4,00	0,37	الكبريت <sup>أ</sup>
3,43	26,67	أكسيد الكالسيوم (CaO)
3,07	5,30	أكسيد المغنيسيوم (MgO)
0,60	1,68	أكسيد الصوديوم (Na <sub>2</sub> O)
0,1	0,1	الزئبق (Hg) جزء من المليون

أ التحليل النهائي، كما ورد، النسبة المئوية من الوزن.

وينبغي أن يلاحظ من الجدول 5 أنه رغم أن محتوى الزئبق في هذه البيانات المتوسطة لا يتغير ويصل إلى 0,1 جزء من المليون في كلا نوعي الفحم فإن محتوى الكلور يتباين بصورة كبيرة من 0,003 في المائة من الوزن في حالة الفحم دون القيرى ليصل إلى 0,1 في المائة من الفحم القيرى. وبالإضافة إلى ذلك فإن محتوى المادة القلوية (مثل أكسيد الكالسيوم) يتباين من 3,43 في المائة في الفحم دون القيرى ليصل إلى 26,67 في المائة في الفحم القيرى حسب الوزن. ويوضح ذلك أن انخفاض محتوى الكلور قد يؤدي إلى انخفاض أكسدة الزئبق وبالتالي ارتفاع النسبة المئوية للزئبق الأولي. وخلط الفحم القيرى بالفحم دون القيرى يوفر مزايا مزدوجة من ارتفاع تركيز الكلور وانخفاض القلوية. وفي سياق ضبط الزئبق، سيكون هدف خلط الفحم هو زيادة تركيز الهالوجين بخلط الفحم ذي المحتوى العالي نسبياً من الهالوجين بالفحم المنخفض الهالوجين الذي قد يستعمل في المنشأة.

ويوضح الشكل أدناه اتجاه زيادة التقاط الزئبق في نظام التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (التنظيف الجاف بالإضافة إلى المرشح النسيجي) مع زيادة جزء الفحم القيرى في خليط الفحم القيرى-دون القيرى (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، 2011). ويمكن أن نرى أن خلط الفحم ينطوي على إمكانية زيادة التقاط الزئبق بنسبة تصل إلى قرابة 80 في المائة. ومرة أخرى، يجدر بالملاحظة أن القيم الإضافية لإزالة الزئبق هي ذات طابع توضيحي وأن القيم الإضافية الفعلية لإزالة الزئبق قد تتباين حسب مصدر الفحم المستخدم في الخلط.



**الشكل 6 - الأثر المحتمل لخلط الفحم على التقاط الزئبق في نظام التنظيف الجاف لإزالة الكبريت من غاز المدخنة**

وهكذا فإن خلط الفحم يمكن أن ينطوي على زيادة أكسدة الزئبق في المنشآت التي تحرق الفحم المنخفض الكلور والمرتفع الكالسيوم. وخصائص أنواع الفحم المختلفة تؤدي دوراً رئيسياً في تحديد تنوعات الزئبق. وهذا بدوره يمكن أن



الشكل 7 - أداء الإضافات القائمة على البروم والقائمة على الكلور مع أصناف الفحم (الفحم دون القيري من حوض نهر باوذر (PRB)؛ فحم اللغنيت من تكساس (TxL)؛ فحم اللغنيت من ولاية داكوتا الغربية (NDL))

ويوضح الشكل مقارنة لأداء المواد المضافة البرومية والكلورية في المراحل العاملة بحرق الفحم التي تحرق أنواعاً مختلفة من الفحم؛ وهذه المقارنة تقدّم النسبة المئوية لتخفيض خط أساس الزئبق النقي كتابع لمعدل إضافة الهالوجين (معهد بحوث الطاقة الكهربائية، 2006؛ فستين ولنداو، 2006؛ شانغ وآخرون، 2008). وكما يمكن أن نرى في الشكل، فبالنسبة لأي مقدار من إضافات الهالوجين كان البروم أكثر فعالية بكثير من الكلور في تقليل مقدار زئبق خط الأساس. وأمكن تحقيق تخفيض بنسبة 80 في المائة في الزئبق النقي في خط الأساس بإضافة أقل من 200 جزء من المليون من الإضافات القائمة على البروم. ويتطلب الأمر مقداراً أكثر بكثير من المواد المضافة القائمة على الكلور (قيمة مضاعفة تقريباً) لتحقيق نفس المستوى من تخفيض خط أساس الزئبق النقي.

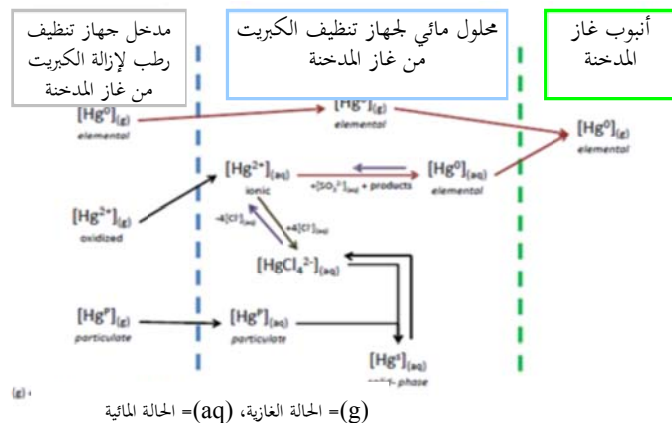
الآثار الشاملة لعدة وسائط الناجمة عن المواد المضافة لأكسدة الزئبق

ينطوي استخدام مضافات أكسدة الزئبق على آثار محتملة على المرجل ونُظم ضبط تلوث الهواء والانبعاثات وقياس الانبعاثات. فهو يؤدي إلى زيادة إمكانية التآكل في أجهزة التسخين المسبق للهواء ونُظم التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (سريني فاسان وديهن، 2013). وتؤدي مضافات البروم أو الكربون المنشط المبروم إلى زيادة البروم في الرماد المتطاير (دومبروفسكي وآخرون، 2008). وقد تنبعث الهالوجينات المضافة إلى الفحم من أنبوب المدخنة (ICR، 2010). ويمكن أن تكون قياسات الزئبق عسيرة جداً في وجود البروم في غاز المدخنة. وهناك أيضاً إمكانية تصريف البروم في نظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة ليشكل نواتج فرعية للتطهير في منشآت مياه الشرب في اتجاه المصب من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم وإمكانية التأثير على الملوثات الأخرى مثل السليسيوم (ماك تيغ وآخرون، 2014؛ وريتشاردسون وآخرون، 2007) والوثيقة المرجعية لأفضل التقنيات المتاحة، 2013). ولا يزال النطاق الكامل لأوجه عدم التيقن العلمي المصاحب لانبعاثات الملوثات من إضافات البروم غير واضح.

### 3-3-3 المواد المضافة إلى جهاز التنظيف الرطب لضبط إعادة انبعاث الزئبق

يتمثل أساس مساهمة المنافع المشتركة التي توفرها أجهزة التنظيف الرطب لثاني أكسيد الكبريت في امتصاص الزئبق المؤكسد ثم الاحتفاظ بهذا الزئبق المؤكسد في حالة سائلة. ومع ذلك، فهناك الكثير من الحالات المؤتقة التي لم تتمكن فيها أجهزة التنظيف من الاحتفاظ بكل الزئبق في الطور السائل الذي تم امتصاصه. وتقاس هذه الحالة باعتبارها تركيزاً أعلى للزئبق الأولي الخارج من جهاز التنظيف بالمقارنة مع الكمية الداخلة إلى الجهاز ويُطلق عليها "إعادة انبعاث الزئبق" (كينز وآخرون، 2014).

وفي إعادة انبعاث الزئبق من جهاز تنظيف رطب يتم احتزال الزئبق الأيوني القابل للذوبان إلى شكل أولي غير قابل للذوبان، وينتج عن ذلك إطلاقه مرة أخرى في غاز المدخنة. ويوضح الشكل أدناه المسار الكيميائي الذي يمكن أن يحدث من خلاله الامتصاص وإعادة الانبعاث.



الشكل 8 - رسم يوضح امتصاص/امتزاز زئبق غاز المدخنة عبر جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة (كينز وآخرون، 2014)

وقد بُذلت جهود كثيرة لتطوير التقنيات والمنتجات من أجل تجنب إعادة انبعاث الزئبق، وتم تسويق عدد منها تجارياً. ومن ناحية المبدأ، تستند جميع هذه التقنيات إلى أسلوب تقليل محتوى الزئبق القابل للذوبان في سائل جهاز التنظيف. ويجري ذلك سواء من خلال امتصاص الزئبق الأيوني في جسيمات أو ترسيب الزئبق الأيوني من السائل (شيثان وآخرون، 2014).

وفي تقنية الامتصاص يتم امتصاص الزئبق بالكربون المنشط. ويضاف الكربون المنشط إلى سائل جهاز التنظيف سواء مباشرة في خطوط محلول جهاز التنظيف أو بحقنه في غاز المدخنة في منبع جهاز التنظيف. وتتم إزالة الكربون المنشط من جهاز التنظيف عن طريق خطوة إزالة المياه.

وتم تعيين عدد من عوامل الترسيب وهذه العوامل يمكن تجميعها في خمس فئات: الفئة الأولى هي الكبريتيدات غير العضوية؛ والثانية الكبريتيدات العضوية؛ والثالثة المركبات العضوية التي تحتوي على النيتروجين والكبريت؛ والرابعة المركبات العضوية التي تحتوي على الأكسجين والكبريت؛ والخامسة هي البوليمرات ذات الوزن الجزيئي المنخفض التي تحتوي على الكبريت (كيزر وآخرون، 2014).

*آثار مضافات أجهزة التنظيف الرطب الشاملة لعدة وسائط*

يخرج الزئبق الملتقط من جهاز التنظيف سواء في المرحلة السائلة أو المرحلة الصلبة، حسب المادة المضافة في جهاز التنظيف.

### 3-3-4 الحفاز الانتقائي لأكسدة الزئبق

من المعروف للجميع أن محفزات الاختزال الحفزي الانتقائي تستطيع أن تؤكسد الزئبق النقي المنبعث من المراحل العاملة بحرق الفحم في حالة غازية وفي شكل جسيمات (لودال وآخرون، 2002). ولكن معدل أكسدة الزئبق على حفاز الاختزال الحفزي الانتقائي يتناسب مع أكسدة ومعدل التحويل لثنائي أكسيد الكبريت الذي يشكل ثلاثي أكسيد الكبريت، ويمكن أن يسبب الرائحة الكريهة في جهاز تسخين الهواء وتآكل أنبوب المدخنة وإحداث سحب دخان واضحة في أنبوب المدخنة.

ولذلك تم تطوير نوع خاص من حفاز الاختزال يحقق درجة عالية من أكسدة الزئبق ودرجة عالية من إزالة أكاسيد النيتروجين وينخفض فيه في الوقت نفسه تحول ثنائي أكسيد الكبريت إلى ثلاثي أكسيد الكبريت (ويعرف باسم الحفاز الانتقائي لأكسدة الزئبق). وأساس هذا النهج هو أكسدة أكبر قدر ممكن من الزئبق النقي لإتاحة إزالة الزئبق المؤكسد بعد ذلك عن طريق نظم ضبط تلوث الهواء الواقعة في مخرج الحفاز (فافال وآخرون، 2013).

والحفازات الاختزالية الانتقائية الخاصة التي تستخدم من أجل أكسدة الزئبق، وتقوم بزيادة معدل أكسدة الزئبق مع الحفاظ على قدرتها الأصلية على الاختزال تُعزِّز إزالة الزئبق في تقنيات المنافع المشتركة (برتول، ج.، 2013). وفي بعض المنشآت القائمة في أمريكا الشمالية تم بالفعل التخلي عن الحفازات المستعملة في الاختزال لتحل محلها حفازات اختزال تحقق أكسدة مرتفعة للزئبق. وتؤكد أن الاستبدال الجزئي يمكن أيضاً أن يخفِّض تركيز الزئبق في غاز أنبوب المدخنة (فافال وآخرون، 2013).

*آثار حفاز أكسدة الزئبق الانتقائي الشاملة لعدة وسائط*

من المحتمل أن استعمال حفاز أكسدة الزئبق الانتقائي يؤدي إلى زيادة محتوى الزئبق في الرماد المتطاير وجس نظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة. وينبغي إعادة توليد الحفاز المستخدم أو التخلص منه بطريقة سليمة بيئياً.

### 3-4 حقن الكربون المنشط للضبط المخصص للزئبق

قد تستخدم المواد الماصة المعالجة كيميائياً أو غير المعالجة كيميائياً لحقنها من أجل التوصل إلى إزالة الزئبق. ويتم تطبيق حقن المواد الماصة في غاز مدخنة المراحل العاملة بحرق الفحم من أجل ضبط الزئبق في المراحل في ألمانيا منذ تسعينيات القرن الماضي (ويلنغ، 2000) وتم تنفيذه في الولايات المتحدة في أكثر من مائة نظام كامل (مكتب مساءلة الحكومة، 2009؛ أمار وآخرون، 2010). ومنذ حوالي عام 2005 ظلت تكنولوجيا حقن الكربون المنشط تُطبَّق تجارياً في الولايات المتحدة (معهد شركات الهواء النظيف، 2010، وأمار وآخرون، 2010). وبالإضافة إلى ذلك، تم توضيح هذه التكنولوجيا في منشأة طاقة كهربائية روسية تعمل بحرق الفحم الروسي (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2014). ومنذ عام 2007، ظل حقن الكربون المنشط يُستعمل بشكل روتيني في عدد من الولايات المتحدة الأمريكية، مثل ماساتشوستس ونيوجيرسي وكونيتيكت، في كثير من المراحل القائمة العاملة بحرق الفحم وتستخدم الفحم القيري أو دون القيري، وذلك للوفاء بالقيم الحدية التنظيمية للانبعاثات في مدى 1.1-3.3 غرام لكل جيجاواط-ساعة (أو ما يمثل 85-95 في المائة من الضبط). وقد تم إثبات الامتثال التنظيمي لهذه القيم الحدية من خلال قياسات باستخدام نُظُم الرصد المستمر للانبعاثات أو أساليب المصائد الماصة (إدارة حماية البيئة في ولاية ماساتشوستس، 2015؛ مع ورود تقارير مشابحة من إدارات الحماية في ولايتي نيوجيرسي وكونيتيكت). ويستدعي حقن الكربون المنشط وجود جهاز ضبط جسيمات في المرحلة اللاحقة من النظام.

ويوضح الجدول 6 أدناه قيم انبعاثات أربع منشآت للطاقة تعمل بحرق الفحم وتُطبَّق تقنيات مخصصة لتخفيض الزئبق في الولايات المتحدة.

### الجدول 6 - مستويات انبعاثات منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم التي تُطبَّق حقن الكربون المنشط

الاسم	نوع الفحم	مستوى الانبعاثات بعد تسويته (ميللغرام/مترعادي <sup>3</sup> ) بعد تسويته إلى 6٪ من محتوى O <sub>2</sub>	فترة تحديد المتوسط	حجم المرجل	تقنية معالجة غاز المدخنة
Oak Grove، المرجل 1 الولايات المتحدة	اللغنيت	< 0,80 في 2012	شهرياً/مستمر	870	FF+SCR+FGD + ACI
PPI Montana Corette (الولايات المتحدة الأمريكية)	دون القيري	0,9	مستمر	163	C-PAC + مع ACI ESP
Brayton Point، الوحدات 1 و 2 و 3 (مجتمعة)، ماساتشوستس، الولايات المتحدة الأمريكية	القيري	0,2	سنوياً، متوسط متجدد كل 12 شهراً	1 350	ACI+ SCR+ESP+SD A
Bridgeport Harbor، الوحدة رقم 3، كونيتيكت، الولايات المتحدة الأمريكية	قيري	0,5-0,2	دورياً	400	ACI + ESP

ملحوظة: C-PAC: كربون منشط مسحوق موافق للإسمنت؛ البيانات عن سنة 2010 باستثناء Oak Grove.

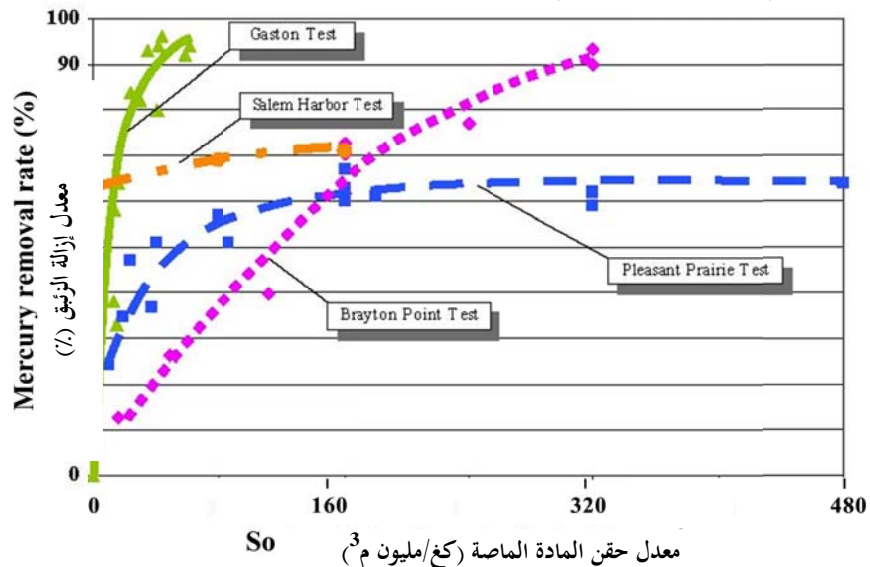
### 3-4-1 حقن المادة الماصة بدون معالجة كيميائية

تشمل العوامل التي تؤثر على أداء أي مادة ماصة بالنسبة لالتقاط الزئبق، الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة الماصة، ومعدل حقن هذه المادة، ومُعاملات غاز المدخنة (مثل درجة الحرارة وتركيزات أنواع الهالوجين وتركيز ثلاثي أكسيد الكبريت) وتشكيلة النظام القائم لضبط تلوث الهواء (بافليش وآخرون، 2003؛ وسريفاستافا وآخرون، 2006 ومارتن، 2009).

ويقدم الشكل ملخصاً لعدد من الاختبارات التي أُجريت منذ أكثر من 10 سنوات على حقن الكربون المنشط غير المعالج في أربع منشآت للطاقة (بليزانت بريري (Pleasant Prairie) وغاستون (Gaston)، وسالم هاربور (Salem Harbour) وبرايون بوينت (Brayton Point)). وكفاءة إزالة الزئبق بحقن الكربون المنشط غير المعالج تتوقف كثيراً على رتبة الفحم ونوع نظام ضبط الجسيمات المستعمل في المنشأة. وتستخدم منشأة الطاقة في بليزانت بريري فحم حوض ريفر باوذر (PRB) المنخفض الكبريت، وجُهزت منشأة الطاقة بمرسب كهروستاتيكي في الجانب البارد. وفحم PRB هو فحم دون قيرى منخفض الرتبة يتسم بمحتوى منخفض من الكلور ومحتوى مرتفع من الكالسيوم، وهو ما يجعل من العسير أكسدة الزئبق النقي بالكلور في غاز المدخنة. ولم يكن حقن الكربون المنشط فعالاً لضبط الزئبق في هذه المنشأة حيث استمرت انبعاثات الزئبق تتألف في الأغلب من الزئبق النقي، نظراً لأن الكربون المنشط غير المعالج لا يتسم بالفعالية في التقاط الزئبق النقي غير المتفاعل. وفي صورة معاكسة لذلك بوضوح نجد منشأة الطاقة في غاستون التي أثبتت أن حقن الكربون المنشط كان فعالاً للغاية في ضبط انبعاثات الزئبق من هذه المنشأة التي تعمل بحرق الفحم القيرى المنخفض الكبريت وكانت مجهزة بمرسب كهروستاتيكي في الجانب الساخن ووضع بعده مرشح نسيجي مصمم خصيصاً يسمى الجهاز الصغير المختلط لجمع الجسيمات (COHPAC). ويجري حقن الكربون المنشط غير المعالج في مخرج المرسب الكهروستاتيكي في الجانب الساخن لأن درجة الحرارة في المدخل مرتفعة للغاية. واستخدم جهاز COHPAC لإزالة الكربون المحقون. وأظهرت منشأة الطاقة في غاستون تطبيق جهاز COHPAC كوسيلة فعالة لضبط الزئبق في المنشأة.

وفي بعض الحالات كان انخفاض إزالة الزئبق بالكربون المنشط غير المعالج نتيجة الجمع بين المستويات الأقل من الكلور في الفحم دون القيرى في الولايات المتحدة وتحميد أنواع الهالوجين بارتفاع مستويات الصوديوم والكالسيوم في الرماد المتطاير من الفحم دون القيرى. ونتيجة لذلك لا يوجد الكثير من الكلور الحر في تيار غاز المدخنة من أجل أكسدة الزئبق. ومن الضروري أن تتم أكسدة الزئبق (بكلورة السطح كخطوة أولية) من أجل التقاط الزئبق النقي بواسطة الكربون المنشط غير المعالج، وعموماً تتزايد كفاءة التقاط الزئبق بالكربون المنشط غير المعالج حسب كمية الزئبق المؤكسد في غاز المدخنة (وزارة الطاقة، الولايات المتحدة، 2005).

وهكذا فإن التقاط الزئبق بالكربون المنشط غير المعالج قد يكون محدوداً في المنشآت التي تعمل بحرق أنواع منخفضة الرتبة من الفحم، مثل اللغنيث والفحم دون القيرى.





## الشكل 9 - اختبار كفاءة إزالة الزئبق كتابع لمعدل حقن الفحم المنشَّط غير المعالج

### 3-4-2 حقن مادة ماصة معالجة كيميائياً

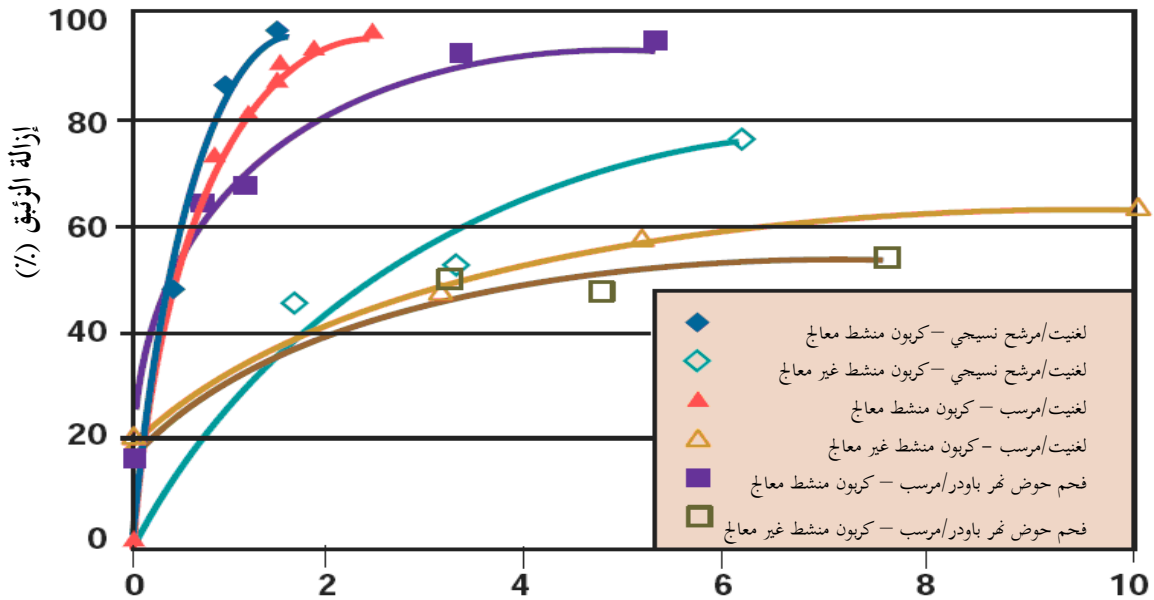
للتغلب على التقييدات الموصوفة أعلاه والمصاحبة لاستعمال الكربون المنشَّط غير المعالج لضبط الزئبق في منشآت الطاقة تم تطوير مواد ماصة من الكربون المنشَّط المعالج (نيلسون، 2004 ونيلسون وآخرون 2004). وكانت البرومة هي المعالجة الأكثر استعمالاً والتي أثبتت أنها أكثر فعالية في تعزيز أداء الكربون المنشَّط. ومقارنة بالكربون المنشَّط غير المعالج، فإن الكربون المنشط بالبروم:

(أ) يوسِّع فائدة حقن المادة الماصة إلى حالات قد لا يكون فيها الكربون المنشَّط غير المعالج فعالاً؛

(ب) يمكن عموماً تشغيله بمعدلات حقن أقل، مما يؤدي إلى تقليل عدد الآثار على المنشأة وتخفيض المحتوى الكربوني في الرماد المتطاير الملتقط؛

(ج) يؤدي إلى تحسين الأداء عند استخدام أنواع الفحم المنخفضة الكلور.

وقد لوحظ تحسن في أداء ضبط الزئبق أثناء الاختبارات الميدانية الكاملة النطاق على الكربون المنشَّط المعالج كيميائياً الذي يحقن في منبع جهاز قائم للحسيمات (فيلي وآخرون، 2008) ويتضح ذلك في الشكل 10. وكما يمكن أن يشاهد من هذا الشكل، تحقق تحسن في كفاءة التقاط الزئبق باستعمال معدلات حقن منخفضة نسبياً من الكربون المنشَّط المعالج في منشآت الطاقة التي تعمل بحرق الفحم المنخفض الكلور. وحقق الكربون المنشط المعالج ما يزيد عن 90 في المائة من التقاط الزئبق عند معدل حقن يبلغ حوالي 50 مغ/م<sup>3</sup> (فيلي، 2008). وتطلب الأمر معدلات حقن أعلى للوصول إلى كفاءة عالية لإزالة الزئبق عند استعمال كربون منشط غير معالج، وفي بعض الحالات، لم يكن من



الممكن تحقيق التقاط بنسبة 75 في المائة.

الشكل 10 - مقارنة بين أداء الكربون المنشط غير المعالج وأداء الكربون المنشط المعالج في إزالة الزئبق

### 3-4-3 تقييدات انطباق حقن الكربون المنشط

رغم أن أسلوب حقن الكربون المنشط يجري تنفيذه تجارياً في تطبيقات عديدة ومتنوعة فإن بعض القضايا لا تزال مطروحة، بما في ذلك إمكانية تسويق الرماد المتطاير لصانعي الخرسانة وتأثير ثلاثي أكسيد الكربون على أداء نُظُم حقن الكربون المنشط.

وتوضع الأنظمة النمطية لحقن الكربون المنشط في منبع أجهزة ضبط الجسيمات الدقيقة، وهو ما يؤدي إلى اختلاط المادة الماصة مع الرماد المتطاير. وفي حين أن هذا لا يشكل مصدر قلق في حالة عدم بيع الرماد المتطاير لإنتاج الخرسانة، فإن هذه الخلطة يمكن أن تؤثر سلباً على استعمال الرماد المتطاير في إنتاج الخرسانة. وتتسم نوعية الخرسانة بالحساسية بصورة خاصة إزاء المحتوى الكربوني، وتتأثر أيضاً بالمساحة السطحية للكربون الموجود في الرماد المتطاير.

ويتمثل أحد الأساليب الفعالة للقضاء على التلوث بالرماد المتطاير في وضع مرشح نسيجي إضافي في مخرج المرسب الكهروستاتيكي الموجود أو حقن الكربون المنشط بعد جهاز الجسيمات الدقيقة وفي النظام الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة، الذي قد يؤثر على نوعية الجبس الناتج من نظام إزالة الكبريت (ميلر وآخرون، 2014؛ وميمنا وآخرون، 2014). وبالإضافة إلى ذلك، فإن كمية الفحم المنشط المعالج المطلوبة لتخفيض الزئبق بمقدار يزيد عن 85 في المائة قد تنخفض لتصل إلى 8 مغ/م<sup>3</sup> في بعض المنشآت التي تعمل بحرق الفحم المنخفض الزئبق وتستخدم مرشحات نسيجية لضبط الجسيمات الدقيقة. وفي هذه الحالات، فإن وجود الكربون المنشط في الرماد المتطاير قد لا يؤثر على بيع الرماد المتطاير لأغراض الخرسانة.

وقد تم تطوير مواد كربونية ماصة متوافقة مع الخرسانة تسمح لبعض منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم بمواصلة تسويق الرماد المتطاير لأغراض إنتاج الخرسانة (نيلسون وآخرون، 2006؛ ولاندرث وآخرون، 2012). وتستخدم هذه المواد تجارياً في الولايات المتحدة.

وجرت أيضاً اختبارات على بعض المواد الماصة الأخرى غير الكربونية المخصصة للحفاظ على نوعية الرماد المتطاير وتسمح في الوقت نفسه بمعدلات حقن مواد ماصة قادرة على تحقيق ما يصل إلى قرابة 85 في المائة من إزالة الزئبق (كانغ وآخرون؛ 2007). وبالمثل، تم تطوير تقنيات للقيام بمعالجة لاحقة للرماد المتطاير من أجل إزالة الكربون غير المحروق والكربون المنشط. وتشمل هذه التقنيات المعالجة الحرارية للرماد المتطاير والفصل الكهروستاتيكي للكربون عن الرماد المتطاير.

وأظهرت الاختبارات أن ثلاثي أكسيد الكبريت في غاز المدخنة، حتى وإن كان بتركيزات منخفضة، يمكن أن يخل بأداء نُظُم حقن الكربون المنشط ويبدو أن ثلاثي أكسيد الكبريت يتنافس مع الزئبق على مواقع الامتزاز في سطح المادة الماصة، وبذلك يقلل من أدائه. وقد تكون هذه الظاهرة هامة بصورة خاصة بالنسبة لتطبيقات حقن الكربون المنشط في المنشآت العاملة بحرق الفحم الذي يحتوي على نسبة عالية من الكبريت. وأحد الحلول الممكنة لمسألة الخلط الذي قد يسببه ثلاثي أكسيد الكبريت يتمثل في الجمع بين حقن المواد الماصة للزئبق والمواد القلوية. ويجري استعمال بعض المواد القلوية كما أشير في فيلي وجونز (2009). وتشمل هذه المواد هيدروكسيد الكالسيوم (Ca(OH)<sub>2</sub>) وبيكربونات الصوديوم (NaHCO<sub>3</sub>) وسيسكيبونات الصوديوم (ترونا).

يمكن أن يؤدي حقن الكربون المنشط غير المتوافق مع الخرسانة إلى عدم القدرة على استعمال الرماد المتطاير في الخرسانة ولذلك يمكن أن تزيد كميات الرماد المتطاير المرسل إلى مدافن القمامة. وتشير الاختبارات التي أجريت على نوعين من الكربون المنشط التجاري إلى أن الزئبق الملتقط بواسطة الكربون المنشط مستقر بدرجة كافية لتوفير عزل دائم للزئبق في المواد الماصة من الكربون المنشط بعد التخلص منه (غرايدون وآخرون، 2009؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2006؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2009).

وحقن الكربون المنشط في منبع جهاز ضبط الجسيمات يؤثر على نوعية الرماد المتطاير كنتيجة لخلط الكربون المنشط والرماد المتطاير. ويوجد احتمال لانبعاث زئبق ثانوي من الرماد المتطاير عند تعرضه لدرجات حرارة مرتفعة أثناء إعادة استعمال الرماد المتطاير، وذلك مثلاً عند استعمال الرماد المتطاير لصناعة الأسمت أو صناعة الطوب (فلوغوفت - هاسيت وآخرون، 2007).

### 3-5 تكلفة تكنولوجيا ضبط الزئبق

يمكن تحقيق ضبط انبعاثات الزئبق كمنفعة مشتركة لإزالته في المعدات القائمة بالفعل والتي قد تكون أقيمت لأغراض مختلفة. وتحديد تكلفة إزالة الزئبق في سياق المنافع المشتركة أمر معقد لأن الأمر يتطلب دراسة توزيع النفقات بين تكاليف ضبط الزئبق وتكاليف ضبط الملوثات الأخرى مثل الجسيمات أو ثاني أكسيد الكبريت أو أكاسيد النيتروجين (سلوس، 2008). وعادة يمكن النظر إلى تخفيض الزئبق من خلال آثار المنافع المشتركة (إقامة تكنولوجيا مثل أجهزة إزالة الكبريت من غاز المدخنة والاختزال الحفزي الانتقائي التي تقلل أيضاً انبعاثات الزئبق) باعتباره ضئيلاً من ناحية التكلفة بل وقد يكون بدون تكلفة. ويرجع ذلك إلى أن التكنولوجيا ذات التكلفة الرأسمالية العالية مثل الاختزال الحفزي الانتقائي وأجهزة إزالة الكبريت من غاز المدخنة تضاف عموماً لغرض ضبط أكاسيد النيتروجين أو أكاسيد الكبريت، على التوالي، ولن تضاف لأغراض ضبط الزئبق فقط. وبدلاً من ذلك، فإن ضبط الزئبق يمكن أن يتحقق من خلال تكنولوجيا مخصصة مثل حقن الكربون المنشط وبتكلفة أقل كثيراً شريطة وجود جهاز لضبط الجسيمات. ويكون تخصيص التكاليف لهذا الغرض الأخير أكثر سهولة.

وهناك ثلاثة عناصر من التكلفة تنشأ عن تطبيق تكنولوجيا مخصصة لضبط انبعاثات الزئبق: التكلفة الرأسمالية، والتكلفة الثابتة للتشغيل والصيانة، والتكلفة المتغيرة للتشغيل والصيانة. وبالنسبة لحقن الكربون المنشط، يقدر أن التكلفة المتغيرة للتشغيل والصيانة صغيرة رغم أنها تشكل عنصراً كبيراً من مجموع التكلفة (وكالة حماية البيئة، 2005؛ وأمار وآخرون، 2010) وأن التكاليف الرأسمالية منخفضة نسبياً. ويتوقف ذلك على نوع التطبيق. ويمكن أن تتباين المتطلبات للمواد الماصة تبايناً كبيراً بين مختلف المواقع. والعناصر الكبرى للتكلفة المتغيرة للتشغيل والصيانة هي تكاليف المادة الماصة وتكاليف التخلص. وقد يكون هناك أيضاً ضياع لبعض الإيرادات من مبيعات الرماد المتطاير بسبب تلوث الرماد المتطاير بالكربون المنشط. وللتغلب على ذلك، تم تطوير ما يسمى الكربونات المنشطة "المتوافقة مع الخرسانة"، إلى جانب تكنولوجيا لفصل الكربون المنشط عن الرماد المتطاير.

### 3-5-1 تكاليف تكنولوجيايات ضبط الزئبق في إطار المنافع المشتركة

التكاليف الرأسمالية الفعلية لضبط تلوث الهواء في أي مرفق بعينه هي في أكثر الأحيان تكاليف الملكية وتكاليف متفق عليها أثناء المفاوضات المباشرة بين بائعي التكنولوجيا وعملائهم. ولكن جانباً كبيراً من المعلومات المتعلقة بالتكاليف متاح للجمهور وترد هذه المعلومات أدناه. وينبغي الالتزام ببعض المبادئ التوجيهية العامة عند تقييم هذه البيانات:

- قد تتباين التكاليف الرأسمالية لأي إنشاء جديد حسب عوامل الزيادة عن الحاجة المستخدمة للتصميم وحسب خيارات التمويل المتاحة السائدة محلياً (مثل معدلات الرسوم الرأسمالية)؛
- قد تتباين التكاليف الرأسمالية لتركيبة أي تعديل رجعي حسب الأحوال القائمة في الموقع مثل توفر المساحة وما يسمى "عامل صعوبة التعديل الرجعي"؛
- تتباين التكلفة المتوسطة لمعدات الضبط مع عامل قدرة المصنع، حيث تتناقص التكلفة المتوسطة عموماً مع زيادة عامل القدرة (سليبي، 2014).

وتتباين تكاليف تكنولوجيايات الضبط تبايناً واسعاً عند التطبيق في البلدان المختلفة. ويوضح الجدولان 7 و 8 تكاليف تكنولوجيايات المنافع المشتركة في الصين والولايات المتحدة. ويمكن أن نرى أن التكلفة الرأسمالية لجهاز التنظيف الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة الذي يقام في وحدة طاقتها 600 ميغاواط قد تكون أقل بمقدار 20 ضعفاً في الصين عنها في الولايات المتحدة. وينبغي أن يلاحظ أنه عند النظر في نشر أفضل التكنولوجيا المتاحة على الصعيد الوطني أو حتى على صعيد المنطقة فإنه ينبغي أن يوضع في الاعتبار نطاق التكاليف لأي تكنولوجيا من أفضل التكنولوجيا المتاحة وليس رقماً محدداً. وفي هذا السياق، ينبغي اعتبار القيم الواردة في الجدولين 7 و 8 إرشادية فقط، وينبغي أيضاً الإشارة إلى بيانات التكاليف الأخرى (مثل وزارة التجارة والصناعة في الولايات المتحدة (2000)؛ وسرحت ولوندي (2007)).

ومع ذلك، فإن نُظم ضبط تلوث الهواء التقليدية غير مخصصة لضبط انبعاثات الزئبق ولذلك فإن مجموع تكاليف تكنولوجيايات ضبط الزئبق في إطار المنافع المشتركة يتعَيَّن توزيعها على ملوثات الهواء المختلفة. واستخدمت دراسة صينية (أنكورا وآخرون، 2015) أسلوب توزيع معادل التلوث على أساس الأثر الصحي والبيئي لكل ملوث من الملوثات ووزعت مجموع التكلفة الثانوية على الزئبق العالق بالجسيمات (PM<sub>10</sub>) وثاني أكسيد الكبريت وأكاسيد النيتروجين (انظر الجدول 9).

الجدول 7- تكاليف أجهزة ضبط تلوث الهواء في منشآت الطاقة (يوان/كيلوواط، يوان عام 2010)، الصين (أنكورا وآخرون، 2015)

أجهزة ضبط تلوث الهواء	القدرة (ميغاواط)	التكلفة الرأسمالية (يوان ريميمب/كيلوواط)	تكلفة التشغيل والصيانة (يوان ريميمب/كيلوواط-سنة)
مرسب كهروستاتيكي	>100	8±108	2±7
مرسب كهروستاتيكي	>300	7±100	2±6
مرسب كهروستاتيكي	>300	7±94	2±5
مرشح نسيجي	>100	8±91	4±10
مرشح نسيجي	>300	7±80	3±9
مرشح نسيجي	>300	6±71	3±9
جهاز رطب لإزالة الكبريت	>100	178±736	29±74
جهاز رطب لإزالة الكبريت	>300	99±410	22±56

14±36	37±151	300>	جهاز رطب لإزالة الكبريت
18±43	29±123	100>	اختزال حفزي انتقائي
13±31	23±99	300>	اختزال حفزي انتقائي
8±20	18±75	300>	اختزال حفزي انتقائي

**الجدول 8 - التكلفة الرأسمالية لتكنولوجيا المنافع المشتركة في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدورات عام 2012) (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2013)**

التكنولوجيا	حجم الوحدة، ميغاواط	نوع الفحم	مجموع التكلفة الرأسمالية (دولار/كيلوواط)	مجموع تكاليف الصيانة والتشغيل الثابتة والمغيرة (دولار/ميغاواط ساعة)
الجهاز الرطب لإزالة الكبريت	500	قبيري	531	11,52
جهاز إزالة الكبريت بواسطة امتصاص التحفيف بالرش	500	دون القبيري	470	10,45
اختزال حفز انتقائي	500	قبيري	274	1,85
مرشح نسيجي	500	قبيري	195	1,02

**الجدول 9 - تكاليف مجموعات أجهزة ضبط تلوث الهواء موزعة على مختلف الملوثات في وحدة طاقتها 600 ميغاواط، الصين (ملايين يوان ريميني، يوان عام 2010) (أنكورا وآخرون، 2015)**

مجموعة أجهزة ضبط تلوث الهواء	مجموع التكلفة السنية	التكاليف موزعة على إزالة Hg	التكاليف موزعة على إزالة PM10	التكاليف موزعة على إزالة SO2	التكاليف موزعة إزالة أكاسيد النيتروجين NOx
مرسب كهروستاتيكي	8,324	0,479	7,845	-	-
مرشح نسيجي	9,241	1,167	8,075	-	-
مرسب + جهاز تنظيف رطب لإزالة الكبريت	39,871	1,613	11,571	26,687	-
اختزال حفزي انتقائي + مرسب + تنظيف رطب إزالة الكبريت	56,992	2,200	14,636	33,759	6,396
مرشح نسيجي + تنظيف رطب لإزالة الكبريت	40,789	2,181	11,759	26,849	-
اختزال حفزي انتقائي + مرشح نسيجي + تنظيف رطب لإزالة الكبريت	57,909	2,874	14,811	33,817	6,407

### 3-5-2 تكاليف تقنيات تعزيز المنافع المشتركة وحقن الكربون المنشط

تتألف تكاليف حقن الكربون المنشط من عنصرين: العنصر الأول هو التكاليف الرأسمالية اللازمة لتخزين المادة الماصة ومعدات الحقن؛ والعنصر الثاني هو التكاليف الثابتة والمتغيرة للتشغيل والصيانة (المصاحبة للمادة الماصة المستهلكة). ولتقييم تكلفة إزالة الزئبق عن طريق المنافع المشتركة، يجب التمييز بين تكاليف الاستثمار والتشغيل والصيانة في نظم ضبط تلوث الهواء، مثل أجهزة إزالة الكبريت من غاز المدخنة والاختزال الحفزي الانتقائي، وهي تكاليف محددة بصورة واضحة، وتكاليف تعزيز أو تحسين إزالة الزئبق في هذه النظم.

ويصعب عموماً تقييم تكاليف تقنيات تعزيز المنافع المشتركة نظراً لأن هذا التقييم يتوقف على متغيرات عديدة مثل مصدر الفحم ونوعيته، ومدى التجديدات المطلوبة في الأجهزة القائمة لضبط الجسيمات (في حالة المرسب) أو أنظمة

التشغيل الخاصة بالموقع لنظام إزالة الكبريت من غاز المدخنة. ونتيجة لذلك، تم التوصل إلى تكاليف نسبية أولاً للأنهج التي جرت مناقشتها في هذه الوثيقة؛ وتظهر هذه النهج في الجدول 10، وهي تستند في جملة أمور إلى المعلومات المعروضة في الوثيقة التوجيهية للتحسين الأمثل للعمليات (برنامج الأمم المتحدة للبيئة، 2010). والتكاليف الرأسمالية النسبية وتكاليف التشغيل والصيانة الإضافية التي تظهر في الجدول 10 ينبغي أن تعامل باعتبارها مؤشرات على الاتجاهات ولا ينبغي تفسيرها بأنها مبادئ توجيهية منطبقة عالمياً على اختيار النهج التي تحقق فعالية التكلفة لضبط الانبعاثات الرئيق من منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم أو المراحل الصناعية العاملة بحرق الفحم التي قد توجد في بلدان مختلفة. إذ أن الظروف الاقتصادية السائدة محلياً (مثل تكلفة اللوازم والمواد وكفاءة العمالة وتكلفتها وتكلفة النقل، إلخ)، ينبغي أن تؤخذ في الاعتبار دائماً عند اختيار أحد خيارات ضبط الرئيق، مع الاعتراف بأن الكثير من الأسواق لمعدات ضبط الانبعاثات وشركات البناء الهندسية هي أسواق عالمية أيضاً (باسينا وآخرون، 2010).

### الجدول 10 - التكلفة النسبية لمختلف أساليب إزالة الرئيق

النهج	التكلفة الرأسمالية	تكلفة التشغيل والصيانة	تعليقات
غسل الفحم	معتدلة	منخفضة	الغسل أقل تكلفة عن المعالجة الكيميائية
خلط الفحم	منخفضة جداً	منخفضة جداً	قد تتطلب تعديلاً و/أو تجديداً في أجهزة السحق
إضافات أكسدة الرئيق	منخفضة جداً	منخفضة	المضافات المهلجنة تزيد كثيراً من أكسدة والتقاط الرئيق
إضافات ضبط إعادة الانبعاث	منخفضة جداً	منخفضة	ينبغي التخفيف من إمكانية إعادة انبعاث الرئيق
حفاز الأكسدة الانتقائية للرئيق وحفاز الاختزال الحفزي الانتقائي*	منخفضة	منخفضة	يشير فقط إلى الحفاز الخاص بالرئيق، وقد يتطلب خلط الفحم
حقن الكربون المنشط	منخفضة	منخفضة إلى معتدلة	توجد مشكلة في الحفاظ على نوعية الرماد. وتكاليف إضافية أعلى بسبب المواد الماصة "المتوافقة مع الخرسانة"

\* مع نظام رطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة في المرحلة التالية.

**الجدول 11 - التكلفة الرأسمالية لحقن الكربون المنشط في الولايات المتحدة (دولار/كيلوواط، بدولارات عام 2007)**

التكنولوجيا	حجم الوحدة، ميغاواط			
	700	500	300	100
حقن الكربون المنشط	5-2	5-2	6-2	8-3

ملاحظات:

البيانات في الجدول 11 مأخوذة من الجداول 5-16 في وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2010 نطاقات التكلفة تنطبق على حقن الكربون المنشط المسحوق المعدل مع استخدام مرشح نسيجي أو مرسب كهروستاتيكي في الجانب البارد الحالة موضع النظر تنطبق على الفحم القيري والافتراضات الأخرى في EPA Base Case v.4.10 والحساسية المنخفضة نسبياً للتكلفة الرأسمالية لحقن الكربون المنشط بالنسبة لحجم الوحدة، كما يتضح من الجدول 11، قد يمكن تفسيرها بأنها ناتجة عن فعالية التكلفة المقارنة لإزالة الزئبق عن طريق حقن الكربون المنشط (تكلفة إزالة كتلة وحدة من الزئبق) في الوحدات الصغيرة والكبيرة (مثل المراحل الصناعية الصغيرة مقابل مراحل المرافق الكبيرة في منشآت الطاقة). والتحليلات المتعمقة لتكاليف حقن الكربون المنشط لضبط انبعاثات الزئبق (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2010) التي أخذ منها الجدول 11، أظهرت التكاليف الرأسمالية في عام 2007 في نطاق يتراوح من 2 إلى 8 دولار/كيلوواط حسب التشكيلة ونوع الفحم المنشط (عادي أو معدل) وحجم الوحدة (من 100 إلى 700 ميغاواط). وينبغي أن يلاحظ أن قيم التكلفة الواردة في الجدول 11 لا تشمل التكلفة الرأسمالية للمرشحات النسيجية أو المرسبات الكهروستاتيكية. وتكلفة إنشاء مرشح نسيجي جديد أو حجرة مرشحات كيسيية هي 55-70 دولار/كيلوواط بغض النظر عن حجم المنشأة. وبالنسبة لنفس نطاق المتغيرات، توصلت الدراسة إلى تكلفة ثابتة للتشغيل والصيانة تتراوح من 0,03 إلى 0,1 دولار/كيلوواط/سنة

والتكلفة الفعلية لضبط الزئبق بالكربون المنشط تتوقف أيضاً على نظام ضبط الجسيمات المستعمل. ويوضح الجدول 12 تكاليف التشغيل للمرشحات النسيجية الخاصة بالمرسب الكهروستاتيكي والجهاز المتطور المختلط لجمع الجسيمات (COHPAC). وتنطبق التقديرات على منشأة طاقتها 250 ميغاواط بقدرة 80 في المائة على حرق الفحم القيري وتفترض أن تكلفة النظام المتطور المختلط لجمع الجسيمات ستكون حوالي 50 دولار/كيلوواط (12,5 مليون دولار).

**الجدول 12 - تكاليف التشغيل لنظم حقن الكربون المنشط (في منشأة طاقتها 250 ميغاواط) يعقبها إما مرسب كهروستاتيكي أو مرشح نسيجي للفحم القيري (اللجنة الدولية المشتركة، 2005)**

مرسب كهروستاتيكي	جامع جسيمات هجين متقدم	
70	90	إزالة الزئبق، النسبة المئوية
160	48	معدل حقن مسحوق الكربون المنشط، kg/Macm
790 000	790 000	تكلفة حقن مسحوق الكربون المنشط، بالدولار
2 562 000	796 000	تكلفة الكربون المنشط، بالدولار

وتتوقف تكاليف المادة الماصة على خصائص الفحم ونوع نُظْم ضبط تلوث الهواء الموجودة في المنشأة ومستوى التقاط الزئبق المطلوب. وأورد جونز وآخرون (2007) تكاليف الكربون من مختلف جهات التوريد وهي تتراوح من 0,37 دولار/كغ إلى 2,11 دولار/كغ.

ويؤثر نوع الفحم المنشط على كل من معدل الحقن وتكلفة التشغيل. ويمكن أن يصل سعر وحدة الكربون المنشط المبروم إلى 30 في المائة أعلى من الكربون المنشط غير المعالج. ولكن أداء الكربون المنشط المبروم يمكن أن يكون أفضل كثيراً من أداء الكربون المنشط غير المعالج في بعض أنواع الفحم (شانغ وآخرون، 2003).



#### 4- أفضل التقنيات المتاحة وأفضل الممارسات البيئية لحرق الفحم

يرد في الفصل التمهيدي لهذه الوثيقة التوجيهية، وصف المبادئ العامة لاختيار أفضل التقنيات المتاحة لفئات المصادر الثابتة المدرجة في المرفق دال. ونركز هنا على اختيار وسائل ضبط الزئبق في قطاع حرق الفحم.

#### 4-1 أفضل التقنيات المتاحة

توجد أربعة أنواع من تدابير ضبط انبعاثات الزئبق في الجو من منشآت الطاقة والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم.

#### 4-1-1 التدابير الأولية لتقليل محتوى الزئبق في الفحم

ينطوي النوع الأول على إزالة الزئبق قبل الحرق. ويمثل غسل الفحم أو اختياره أو خلطه تكنولوجيات فعالة لتحسين كفاءة استعمال الفحم وتقليل انبعاثات ملوثات الهواء. ولكن مدى تطبيق غسل الفحم في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم كان منخفضاً إلى حد بعيد، وظلت نسبة غسل الفحم تنمو ببطء لأن غسل الفحم بحد ذاته لا يشكل إحدى أفضل الممارسات المتاحة. ومع ذلك، فإن الجمع بين غسل الفحم وتدابير الضبط الأخرى الموصوفة أدناه يمكن أن يوفر تخفيضاً معقولاً في انبعاثات الزئبق.

#### 4-1-2 تدابير تقليل انبعاثات الزئبق أثناء الاحتراق

ينطوي النوع الثاني من تدابير الضبط على إزالة الزئبق أثناء الاحتراق. واستخدام مرجل القاعدة المميعة يؤدي دوراً هاماً في إزالة الزئبق في المراحل التالية. ومن المهم بصفة خاصة النسب المئوية المرتفعة لزئبق الجسيمات في غاز المدخنة من الطبقة المميعة مقارنة بحرق الفحم المسحوق. ويؤدي ارتفاع الزئبق الموجود في شكل جسيمات إلى ارتفاع كفاءة إزالة الزئبق في المرشحات النسيجية أو المرسبات الكهروستاتيكية في المراحل التالية. ولكن ينبغي أن يلاحظ أن استعمال مرجل القاعدة المميعة لا يشكل بحد ذاته إحدى أفضل التقنيات المتاحة.

#### 4-1-3 إزالة الزئبق بواسطة المنافع المشتركة لنظم ضبط تلوث الهواء التقليدية

النوع الثالث من تدابير إزالة الزئبق ينطوي على استعمال نُظم ضبط تلوث الهواء، والتي تستعمل أساساً لإزالة الجسيمات (المرسبات الكهروستاتيكية أو المرشحات النسيجية أو الجمع بينهما) وثاني أكسيد الكبريت (التنظيف الجاف أو الرطب لإزالة الكبريت من غاز المدخنة) وأكاسيد النيتروجين (الاختزال الحفزي الانتقائي)، ولكنها يمكن أن تؤدي إلى تخفيضات كبيرة لانبعاثات الزئبق على سبيل المنافع المشتركة. وفي بعض البلدان، تكون إزالة الزئبق في إطار المنافع المشتركة هي التدبير الأول الذي يتم النظر فيه من أجل تخفيض انبعاثات الزئبق من منشآت الطاقة والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم.

ويوضح القسم 3-2 أعلاه مستويات الانبعاثات وكفاءة الإزالة التي تتحقق من خلال تطبيق نُظم ضبط تلوث الهواء. ويثبت ذلك أن الجمع بين الاختزال الحفزي الانتقائي والمرسبات الكهروستاتيكية وتنظيف الكبريت من غاز المدخنة، والتي تستعمل على نطاق واسع في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في أوروبا والولايات المتحدة والصين واليابان، يمكن أن تحقق كفاءة في إزالة الفحم تصل إلى 95 في المائة وتصل بالزئبق إلى تركيز يقل عن 1 ميكروغرام/متر مكعب عادي في غاز المدخنة من المنشآت التي تحرق فحم اللغيت.

#### 4-1-4 التكنولوجيات المخصصة لضبط الزئبق

ينطوي النوع الرابع من تدابير الضبط على تكنولوجيات مخصصة لتخفيض انبعاثات الزئبق في الغلاف الجوي، بما في ذلك تكنولوجيا حقن الكربون المنشط أو استعمال المواد المضافة. وفي الوقت الحاضر، يتم تسويق تكنولوجيا حقن الكربون المنشط تجارياً واعتمادها على نطاق واسع في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم في الولايات المتحدة، حيث امتثلت هذه التكنولوجيات بنجاح للقيم الحدية التنظيمية للانبعاثات التي تُمثل 85-95 في المائة من الضبط على مدى يزيد عن خمس سنوات (إدارة حماية البيئة في ولاية ماساتشوسيتس، 2015). وتوضح عمليات تكنولوجيا حقن الكربون المنشط المستخدمة في الولايات المتحدة أن تركيز الزئبق في غاز المدخنة بعد حقن الكربون المنشط والمرشحات النسيجية قد تنخفض لتكون أقل من 1 ميكروغرام/متر مكعب عادي.

#### 4-2 أفضل الممارسات البيئية

إن استراتيجيات إدارة ضبط التلوث الفعالة والمرافق ذات الصيانة الجيدة والمشغّلون المدربون تدريباً جيداً واستمرار الاهتمام بالعمليات جميعها عوامل هامة في الضبط والتخفيض، حيثما أمكن، لانبعاثات الزئبق أو مركبات الزئبق الناجمة عن حرق الفحم. ولهذا فإن هذه الممارسات، المنطبقة على المصادر القائمة والجديدة، تعتبر من أفضل الممارسات البيئية وينبغي القيام بها بطريقة تتسق مع تطبيق أفضل التقنيات المتاحة.

#### 4-2-1 مُعامِلات العمليات الرئيسية

الخطوة الأولى في تحديد أفضل الممارسات البيئية لعملية حرق الفحم هي تعيين معاملات العمليات الرئيسية (بما في ذلك ضبط مدخلات الزئبق في الفحم والرصد المتصل بذلك)، سواء من عمليات التحري الخاصة بكل موقع أو من الاختبارات التي تجري في مرافق مشاهمة في أماكن أخرى. واستناداً إلى عمليات التحري والاختبار، ينبغي إدخال التدابير التي تمكّن من ضبط مُعامِلات العمليات الرئيسية في نظام الإدارة.

#### 4-2-2 اعتبارات كفاءة الطاقة في المنشأة بأكملها

تعرف كفاءة الطاقة في منشأة تعمل بحرق الفحم بأنها النسبة بين ناتج المنشأة (أي الكهرباء الصافية والحرارة الصافية أو كلاهما) ومقدار طاقة المصدر (بالفحم) التي تزوّد بها المنشأة في نفس الوقت. وتباين كفاءة التوربين البخاري (التي تستند إلى قيمة أكثر انخفاضاً لتسخين الفحم) في منشأة جديدة تعمل بحرق الفحم المسحوق من 39 إلى 47 في المائة، حسب ظروف البخار (رابطة صناعة الكهرباء في أوروبا - Eurelectric، 2003). والمنشآت المقامة حديثاً والمصممة لظروف البخار دون الحرج تعمل في الطرف الأدنى، في حين أن المنشآت المصممة لظروف البخار فوق الحرج وفوق الحرج للغاية تعمل في الطرف الأعلى من نطاق الكفاءة المذكور. أما مراحل الاحتراق ذات القاعدة المميّعة الدوارة فتعمل نمطياً بمعدل يزيد عن 40 في المائة من الكفاءة. وحتى وقت قريب في عام 2014 لم يصمم سوى حوالي النصف من جميع منشآت الطاقة الجديدة العاملة بحرق الفحم للتشغيل المرتفع الكفاءة بانبعاثات منخفضة (وكالة الطاقة الدولية، 2012).

وتقل كفاءة المنشآت مع تقدمها في العمر بما يتطلب مزيداً من الفحم لتوليد نفس مقدار الناتج. وبالنسبة لأي منشأة طاقة أو مرجل صناعي يعمل بحرق الفحم، فإن مقدار انبعاثات الزئبق غير الخاضعة للضبط من المنشأة أو المرجل يتصل اتصالاً مباشراً بمقدار الفحم المحروق. ويعني ذلك أنه إذا أمكن تقليل كمية الفحم المحروق فسوف يتم أيضاً تخفيض

إجمالي انبعاثات الزئبق من منشأة الطاقة أو المرجل الصناعي. وهذا التخفيض في مقدار الفحم المحروق يمكن تحقيقه بالتدابير المتخذة لتحسين كفاءة الطاقة في منشأة الطاقة أو المرجل الصناعي القائم.

وكذلك فإن التصميم الذي يتسم بكفاءة الطاقة وصيانة المعدات وتحسين الكفاءة يتيح تخفيض جميع الملوثات المنبعثة من نفس مقدار الفحم المستعمل، بما في ذلك غازات الاحتباس الحراري مثل ثاني أكسيد الكربون، بالإضافة إلى تخفيض انبعاثات الزئبق. وإذا تم ترقية مستوى المنشأة لأسباب تجارية أو اقتصادية فإن ذلك سيؤدي إلى طاقة أكثر وانبعاثات أقل من نفس مقدار الفحم المستعمل (سلوس، 2009).

ويمكن أن تشمل أمثلة تدابير تحسين كفاءة الطاقة في منشآت الطاقة العاملة بحرق الفحم أو في المراحل الصناعية، القياسات التفصيلية لتعيين الفاقد الحراري وإصلاح التسريبات في أنابيب غاز المدخنة وتحديث أجهزة تسخين الهواء وتركيب صفائح جديدة للتوربينات وإصلاح أو ترقية جهاز التكثيف ووضع تغليف جديد لبرج التبريد أو تحسين الكفاءة الكهربائية للمنشأة.

ويتيسر الاحتراق عالي الكفاءة من خلال وضع نظام لرصد معاملات التشغيل الرئيسية، مثل أول أكسيد الكربون، ومعدل التدفق الحجمي ودرجة الحرارة والمحتوى من الأكسجين. ويرتبط المستوى المنخفض من أول أكسيد الكربون بارتفاع كفاءة الاحتراق من حيث اكتمال احتراق فحم التغذية. وتتوقف كفاءة الاحتراق على عدة عوامل تشمل ظروف البخار ونوع الفحم والمناخ المحلي في الموقع وعمر المنشأة وقدرتها الإنتاجية وأسلوب تشغيلها (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، 2013).

#### 4-2-3 صيانة أجهزة ضبط تلوث الهواء وكفاءتها في الإزالة

بالإضافة إلى تحسين كفاءة الطاقة، يتيح تحسين كفاءة أجهزة ضبط تلوث الهواء فرصة لتحقيق أكبر قدر ممكن من إزالة الزئبق. وتتحقق كمية إضافية من إزالة الزئبق نتيجة تشغيل المعدات القائمة بالفعل في منشآت الطاقة أو المراحل الصناعية من أجل ضبط تلوث الهواء والمصممة أصلاً للحد من الانبعاثات غير الزئبقية مثل الجسيمات أو ثنائي أكسيد الكبريت أو أكاسيد النيتروجين. ويمكن، حسب معدات ضبط تلوث الهواء المتاحة، أن تشمل هذه النهج تخفيض متطلبات الطاقة الطفيلية لأجهزة ضبط تلوث الهواء وتحديث أو ترقية مستوى المرشحات الكهروستاتيكية أو المرشحات النسيجية، وتغيير تصميم وتشغيل الاختزال الحفزي الانتقائي أو الجمع بين هذه النهج (سلوس، 2006).

#### 4-2-4 الإدارة السليمة بيئياً للمنشأة

من أجل تحسين منع انبعاثات الزئبق وضبطها يلزم نظام إدارة بيئية لمنشأة الطاقة العاملة بحرق الفحم أو المرجل الصناعي العاملة بحرق الفحم ليحدد بوضوح المسؤوليات على جميع المستويات. وبعض التدابير المنطبقة بصورة شائعة تختص بتحسين تشغيل المرجل، مثل تنفيذ دورات التفتيش والصيانة الملائمة. وتنطوي ممارسات التشغيل والصيانة على إمكانية تحسين أداء المنشأة، بما في ذلك تحسين الكفاءة والموثوقية، وكذلك تخفيض تكاليف التشغيل والصيانة الشاملة نفسها. ولكن ليس من الممكن تجنب تدهور معدات المنشأة، ويتوقف معدل حدوث هذا التدهور كثيراً على ممارسات التشغيل والصيانة. وتشمل بعض ممارسات التشغيل والصيانة الجيدة على سبيل المثال صيانة خط البخار ومعالجة المياه ووجود بروتوكول يمكن الاعتماد عليه للقيام بالرصد والتبليغ. وبالإضافة إلى ذلك، قد تكون تحسينات العمليات ضرورية لتقليل الاختناقات والتأخيرات.

وينبغي تخصيص الموارد الكافية لتنفيذ أفضل الممارسات البيئية ومواصلة تطبيقها، وينبغي تدريب العاملين تدريباً ملائماً يتصل بواجباتهم. ومن الأمور الهامة وجود برتوكولات للتدقيق عن بُعد وفي الميدان من جانب طرف ثالث مستقل من أجل كفاءة اتباع أفضل الممارسات البيئية في الواقع.

#### 4-2-5 الإدارة السليمة بيئياً لمخلفات احتراق الفحم

الإدارة السليمة بيئياً لمخلفات احتراق الفحم أمر هام من أجل تقليل احتمالات زيادة مخاطر إعادة انبعاث الزئبق وغير ذلك من المشاكل المحتملة.

وطوال عملية ضبط انبعاثات الزئبق من المصادر العاملة بحرق الفحم تجرى إزالة الزئبق من غاز المدخنة وتحويله إلى مخلفات حرق الفحم، بما في ذلك رماد قاعدة المرجل والرماد المتطاير والحمأة الناشئة عن التنظيف الرطب للكبريت من غاز المدخنة. والحمأة الناشئة عن التنظيف الرطب للكبريت من مخلفات حرق الفحم يتم تخزينها في الموقع أو إعادة استخدامها، بوسائل منها مواصلة تجهيزها وتحويلها إلى ألواح تبطين من الجبس. وفي هذه الحالة الأخيرة، قد يكون من الضروري، بعد ترشيح الحمأة من الجبس الناشئ عن جهاز تنظيف الكبريت، القيام باستخراج الزئبق من الفضلات السائلة حسب المستويات الموجودة. ويمكن أن يتحقق ذلك عن طريق المعالجة الكيميائية أو التبادل الأيوني أو الترشيح الغشائي. وفي عمليات إنتاج ألواح التبطين المصنوعة من الجبس، وهو الاستخدام الآخر لمخلفات حرق الفحم، بما في ذلك تخزين مخلفات حرق الفحم في الموقع، يوجد احتمال إعادة إطلاق الزئبق الذي تحتويه هذه المخلفات.

وفي عمليات إنتاج ألواح الجبس قد ينطلق جزء من الزئبق مرة أخرى لأن عمليات الإنتاج تشمل في كثير من الأحيان وحدات عالية الحرارة. وتبيّن من إحدى الدراسات أن مجموع فقدان الزئبق عبر منشأة إنتاج ألواح التبطين يمثل حوالي 5 في المائة من محتوى الزئبق الداخل إلى جبس جهاز تنظيف الكبريت من غاز المدخنة (مارشال، 2005). ولكن أشارت دراسة أخرى قام بها ليون وآخرون (2013) إلى أن 12-55 في المائة من مجموع الزئبق في جبس تنظيف الكبريت من غاز المدخنة سينبعث أثناء عملية إنتاج ألواح الجبس وأظهرت دراسة ثالثة أن الإطلاقات تتراوح من 2 إلى 66 في المائة من الزئبق الداخل إلى جبس تنظيف الكبريت من غاز المدخنة (ساندرسن وآخرون، 2008). ونظراً للتباين الممكن في معدلات الإطلاق فإن إنتاج ألواح التبطين باستخدام جبس تنظيف الكبريت لا يعتبر من أفضل الممارسات البيئية إلا إذا ثبت أن إعادة إطلاقات الزئبق ستكون بالحد الأدنى أو سيتم التقاطها أثناء عملية إنتاج ألواح التبطين.

وفي حالة تخزين مخلفات حرق الفحم في الموقع قد تنشأ إمكانية الآثار الشاملة لعدة وسائط (مثل نض الزئبق في المياه الجوفية). وخلصت دراسة استمرت لعدة سنوات وتناولت خصائص مخلفات حرق الفحم إلى أن أي إطلاق محتمل للمعادن من مخلفات حرق الفحم في البيئة يتأثر بظروف النض (وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2006؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2008؛ ووكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة، 2009)<sup>(1)</sup>. وتتأثر ظروف النض بدرجة الحموضة وبمقدار الاتصال بالمياه (أي نسبة السوائل إلى الجوامد). وعند التقييم على نطاق درجة حموضة يمتد من 5.4 إلى 12.4 (النطاق المعقول لإدارة مخلفات حرق الفحم) لم تتعد نتائج نض الزئبق المعايير القائمة بشأن تركيز الزئبق في مياه الآبار في الولايات المتحدة. وفي هذه الدراسات نفسها تبيّن أن بعض نتائج نض بعض المعادن الثقيلة

(1) قامت وكالة حماية البيئة في الولايات المتحدة بصياغة أساليب اختبار النض المستخدمة في هذه الدراسة في اختبارات معيارية تُعرف باسم أساليب "LEAF". وهذه الأساليب تحمل الأرقام 1316-1313 ويمكن الاطلاع عليها في:

[http://epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/new\\_meth.htm](http://epa.gov/wastes/hazard/testmethods/sw846/new_meth.htm)

الأخرى، مثل الزرنيخ، كانت تتجاوز المعايير القائمة بشأن التركيز في مياه الآبار في الولايات المتحدة. وينبغي أن يلاحظ أن البيانات المعروضة لا تشمل أي محاولة لتقدير كمية أي من العناصر المكونة التي قد تصل إلى خزان للمياه الجوفية أو بئر لمياه الشرب. وسيطلب الأمر وضع نماذج لنقل المياه الجوفية ومآلها، بحيث تشمل النظر في عوامل إضافية كثيرة - بما في ذلك طريقة إدارة الرماد المتطاير- من أجل تقييم المخاطر المحتملة. ويمكن النظر في تخزين مخلفات احتراق الفحم بأسطح صماء في الموقع باعتبار ذلك أحد جوانب الإدارة السليمة بيئياً.

## 5 - رصد انبعاثات الزئبق

تناقش الجوانب العامة والشاملة للاختبار والرصد والتبليغ في الفصل التمهيدي لهذه الوثيقة. وهذا القسم يقتصر على الجوانب المحددة لرصد انبعاثات الزئبق ومنشآت الطاقة والمراجل الصناعية العاملة بحرق الفحم.

### 1-5 الرصد المستمر للانبعاثات

رصد الزئبق باستعمال أدوات الرصد المستمر للانبعاثات هو رصد فعال لتيارات غاز المدخنة الناتجة عن الاحتراق (ساروناك، 2007). ولأغراض الامتثال للانبعاثات توضع أجهزة الرصد المستمر للانبعاثات في أنبوب المدخنة لتقيس تيار غاز بتركيز جسيمات منخفض.

ولأغراض التحسين الأمثل للعمليات المتعلقة بالزئبق تستعمل أجهزة الرصد المستمر للانبعاثات أحياناً لأخذ عينة من تيار الغاز المحمل بالجسيمات قبل جهاز ضبط الجسيمات. وتكنولوجيا مجس الترشيح التي يشيع استعمالها لهذا الغرض هي مرشح القصور الذاتي. وتستعمل هذه التكنولوجيا تقنية تسريع غاز العينة وتعتمد على قوى القصور الذاتي للجسيمات وعلى استخدام مرشح ملبد لفصل الغاز والجسيمات.

والرصد المستمر لغاز العينة المشبع بالماء من جهاز تنظيف رطب هو أسلوب يمارس بصورة شائعة رغم أنه يتطلب إجراءات أكثر تفصيلاً. ويستعمل مجس مرشح ثابت خاص لتجنب الانسداد من تكثف المياه ويستخدم هذا المرشح نمطياً دورة تنظيف متكررة لوسائط المرشح باستعمال الهواء المضغوط. وتستعمل جميع تطبيقات الرصد المستمر خطوط عينات مسخنة مع تنظيم دقيق لدرجة حرارة العينة من أجل تجنب تكثف المياه وامتزاز الزئبق المؤكسد في هذا الماء نتيجة ذلك.

ويوفر جهاز الرصد المستمر للانبعاثات لمشغل حرق الفحم تحليلاً للزئبق في الوقت الحقيقي ويمكن أن يستعمل هذا التحليل في حلقة التأثيرات المرتدة مع معدات حقن المادة الماصة أو معدات تلقيح المواد المضافة إلى الفحم. وتسمح هذه السمة بالضبط الدقيق لتركيز انبعاثات الزئبق رغم التغيرات في تركيز الزئبق في الوقود.

ويتيح الرصد المستمر أيضاً مزايا تتمثل في الحساسية للتركيزات المنخفضة من الزئبق التي تصل إلى 0.5 ميكروغرام/م<sup>3</sup>، والقياسات القائمة على تنوعات الزئبق والموثوقية العالية للنتائج عند معايرتها بمنهجية دينامية لتسمير الزئبق.

### 2-5 رصد المصيدة الماصة

أثبتت المصائد الماصة لرصد الزئبق في تيارات غاز حرق الفحم أنها توفر بيانات دقيقة وقابلة للاستنساخ عن انبعاثات الزئبق، حتى عند تركيزات منخفضة جداً (ساروناك، 2007). ومن الممكن القيام بالرصد باستعمال مجموعة من المصائد خلال فترة أخذ عينات تمتد عدة أيام في منشآت حرق الفحم.

### 3-5 أخذ العينات بجهاز الارتطام

كان استخدام أساليب الارتطام لرصد الزئبق في منشآت احتراق الفحم هو الأسلوب الأبرز تاريخياً. وأساليب الارتطام غير ملائمة للفترة الطويلة لأخذ العينات وهي تقتصر في الممارسة العملية على عدة ساعات (ساروناك، 2007).

وتستخدم أساليب كثيرة من أساليب الارتطام لجمع الزئبق العالق بالجسيمات والزئبق المؤكسد والزئبق النقي بصورة منفصلة وهي لذلك مفيدة في منشآت حرق الفحم من أجل تحديد تنوع الزئبق.

وتستعمل أساليب الارتطام سلسلة من أجهزة ارتطام متعددة لتسمح بقدر معيّن من مراقبة الجودة.

#### 4-5 توازن الكتلة

قياسات توازن الكتلة في منشآت حرق الفحم ليست أسلوبياً مباشراً لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء ويمكن أن نتوقع انخفاض دقة الانبعاثات المحسوبة من توازن الكتلة.

والبيانات المطلوبة للقيام بقياس توازن الكتلة للزئبق في منشآت حرق الفحم متوافرة بسهولة في بعض المناطق لأن محتوى الزئبق من تيارات النفايات الصلبة والسائلة من المنشأة يخضع للتنظيم. وتشمل تيارات النفايات رماد القاعدة والرماد المتطاير ونفايات مياه أجهزة التنظيف ومنتجات أجهزة التنظيف مثل الجبس والنفايات الصلبة لأجهزة التنظيف. ويجري قياس الزئبق من الفحم المحترق بانتظام أيضاً في بعض المناطق وهو ضروري لحساب توازن الكتلة.

وتتوقف دقة توازن الكتلة بشدة على أخذ العينات التمثيلية من الفحم وتيارات النفايات وعلى الاستقرار الصحيح للعينات. ويجب اتباع إجراءات خاصة لتجنب ضياع الزئبق من العينات التي يتم جمعها. ويمكن تحقيق دقة أكبر لنتائج توازن الكتلة بزيادة عدد العينات التي يتم جمعها وتحليلها. ويمكن توقع حدوث تباين كبير في محتوى الفحم من الزئبق، ولهذا يتطلب الأمر تحليلاً متكرراً للفحم للحصول على القيمة الدقيقة لمُدخلات الزئبق. ويجب القيام برصد دوري لانبعاثات الزئبق في الهواء من أجل إثبات صحة حسابات توازن الكتلة.

وبالنظر إلى عدد تيارات المواد التي تتطلب الرصد وتواتر أخذ العينات من أجل التوصل إلى توازن كتلة دقيق، فقد يكون استعمال أسلوب توازن الكتلة لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء في منشآت حرق الفحم أكثر صعوبة من استعمال أسلوب الرصد المباشر لغاز المدخنة.

#### 5-5 النظم التنبؤية لرصد الانبعاثات

الرصد التنبؤي للانبعاثات هو أداة فرز جيدة لمنشآت حرق الفحم ولكنها ليست وسيلة دقيقة لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء بسبب التباين الواسع لمحتوى الزئبق في الفحم.

والنظم التنبؤية لرصد الانبعاثات مفيدة لتقدير انبعاثات الزئبق في الهواء استعداداً لوضع المصيدة الماصة أو غير ذلك من أنشطة الرصد. ويسمح التقدير الجيد لنطاق الانبعاثات في الهواء بزيادة كفاءة اختبار المصيدة الماصة.

#### 6-5 عوامل الانبعاثات

لا تمثل عوامل الانبعاثات وسيلة دقيقة لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء في تيارات غاز حرق الفحم. ويرجع ذلك إلى تباين محتوى الزئبق في الفحم والتباين الواسع لالتقاط الزئبق داخل معدات ضبط الانبعاثات المقامة في منشأة حرق الفحم. وهذه النقطة الأخيرة تجعل من الصعب جداً تطبيق عوامل الانبعاثات عبر أسطول منشآت حرق الفحم.

#### 7-5 التقديرات الهندسية

التقديرات الهندسية ليست أسلوبياً دقيقاً لرصد انبعاثات الزئبق في الهواء من منشآت حرق الفحم.

- ACAP (2004). Assessment of mercury releases from the Russian Federation. Russian Federal Service for Environmental, Technological and Atomic Supervision, Danish Environment Protection Agency for Arctic Council, COWI, December 2004.
- Ake, Terrence; Sulfur Dioxide Control for Small Utility Boilers, Air and Waste Management Association, 2009.
- Amar, P, C. Senior and R. Afonso (2008). NESCAUM Report: Applicability and Feasibility of NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, and PM Emissions Control Technologies for Industrial, Commercial, and Institutional (ICI) Boilers (<http://www.nescaum.org/activities/major-reports>).
- Amar, P, C. Senior, R. Afonso and J. Staudt (2010). NESCAUM Report “Technologies for Control and Measurement of Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in the United States: A 2010 Status Report”.
- Ancora, M. P., L. Zhang, S.X. Wang, J. Schreifels and J.M Hao (2015). Economic Analysis of Atmospheric Mercury Emission Control for Coal-Fired Power Plants in China. *Journal of Environmental Sciences* vol. 27, issue 7, pp125–134..
- ASTM D388 (2012). Standard Classification of Coals by Rank.
- Babcock Power, Circulating Dry Scrubbers (CDS) Webinar Presentation, 2012 Mid-Atlantic Regional Air Management Association, 19 July 2012.
- Bertole, C., 2013; SCR Catalyst Management and Improvement to Achieve and Maintain Mercury Oxidation Levels, May 2013 (2013).
- Bojkowska, I., Sokolowska, G., 2001. Mercury in mineral raw materials exploited in Poland as potential sources of environmental pollution (In Polish), *Biuletyn PIG*, No. 5, p. 53.
- Brown, T. D., D.N. Smith, R.A. Hargis, Jr., W.J. O’Dowd. (1999). 1999 Critical Review: Mercury Measurement and Its Control: What We Know, Have Learned, and Need to Further Investigate, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol., 49, pp. 1–97.
- Buschmann, J., Lindau, L., Vosteen, B.W. (2006). The KNXTM Coal Additive Technology –a Simple Solution for Mercury Emissions Control, *Power Gen USA*, December 2005.
- Celebi, M. (2014). "Coal Plant Retirements and Market Impacts", The Brattle Group, presented to Wartsila Flexible Power Symposium, Vail, CO, February 2014.
- Chang, R., Dombrowski, K., Senior, C. (2008). Near and Long-Term Options for Controlling Mercury Emissions from Power Plants, *The MEGA Symposium*, Baltimore, MD, 2008.
- Chathen, A., Blythe, G., Richardson, M., Dene, C., (2014). Scrubber Additives for Mercury Re-Emission Control, *The MEGA Symposium*, Baltimore, MD, August 2014.
- Chu, P. (2004). Effects of SCRs on Mercury, *Mercury Experts Conference*, Glasgow, Scotland, May 2004.
- Clack, H.L. (2006). Mass Transfer within ESPs: Trace Gas Adsorption by Sorbent-covered Plate Electrodes, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 56, pp. 759–766.
- Clack, H.L. (2009). Mercury Capture within Coal-Fired Power Plant Electrostatic Precipitators: Model Evaluation, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 43, pp. 1460–1466.
- CRIEPI and FEPC (2012). Data evaluated by CRIEPI (Central Research Institute of Electric Power Industry) in 2012, based on the data provided by FEPC (the Federation of Electric Power Companies of Japan).
- DeVito, M.S., Rosenhoover, W.A. (1999). Hg Flue Gas Measurements from Coal-fired Utilities Equipped with Wet Scrubbers, 92nd Annual Meeting of the Air & Waste Management Association, St. Louis, MO, June 1999.
- Deye, C.S., Layman C.M. (2008). A Review of Electrostatic Precipitator Upgrades and SO<sub>2</sub> Reduction at the Tennessee Valley Authority Johnsonville Fossil Plant, *The MEGA Symposium*, Baltimore, MD, 2008.
- Dombrowski, K., S. McDowell, et al. (2008). The balance-of-plant impacts of calcium bromide injection as a mercury oxidation technology in power plants. *A&WMA Mega Symposium*. Baltimore, MD.
- Duan, Y. F. , Zhuo, Y. Q., Wang, Y. J. , Zhang, L. , Yang, L. G., Zhao, C. S., 2010. Mercury Emission and Removal of a 135MW CFB Utility Boiler. *Proceedings of the 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion 2010*, 189–194.



- Eurelectric, 2003, Efficiency in Electricity Generation, EURELECTRIC "Preservation of Resources" Working Group, in collaboration with VGB, July 2003.
- European IPPC Bureau (EIPPCB) (2013). Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Large Combustion Plants—first draft (not adopted), June 2013  
[http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP\\_D1\\_June2013\\_online.pdf](http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/LCP_D1_June2013_online.pdf).
- Favale, A., Nakamoto, T, Kato, Y., and Nagai Y. (2013), Mercury Mitigation Strategy through the Co-Benefit Of Mercury Oxidation With SCR Catalyst, Power Engineering, January 2013.
- Feeley, T., III, Brickett, L.A., O’Palko, B.A., Jones, A.P. (2008). DOE/NETL’s Mercury Control Technology R&D Program – Taking Technology from Concept to Commercial Reality, presented at the MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2008.
- Feeley, T. J. and Jones, A. P. (2009). An Update on DOE/NETL’s Mercury Control Technology Field Testing Program. U.S. Department of Energy, available at  
<https://www.netl.doe.gov/File%20Library/NewsRoom/Updated-netl-Hg-program-white-paper-FINAL-July2008.pdf>.
- Feng, W., Kwon, S., Feng, X., Borguet, E., M.ASCE, R. D. V. (2006). Sulfur Impregnation on Activated Carbon Fibers through H<sub>2</sub>S Oxidation for Vapor Phase Mercury Removal. Journal of Environmental Engineering, 292–300.
- Finkelman B. Personal communication: USGS, 2003 // United Nations Environment Programme (UNEP). Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Releases. Geneva, Switzerland: UNEP, 2005.
- Finkelman B. Personal communication: USGS, 2004 // United Nations Environment Programme (UNEP). Toolkit for Identification and Quantification of Mercury Releases. Geneva, Switzerland: UNEP, 2005.
- Galbreath, K.C. and Zygarlicke, C.J. (2000). Mercury Transformations in Coal Combustion Flue Gas, Fuel Process. Technol, 65–66, 289.
- GAO (2009). Preliminary Observations on the Effectiveness and Costs of Mercury Control Technologies at Coal-fired Power Plants, United States Government Accountability Office, GAO-09-860T, Washington, DC, 2009.
- Ghorishi, S. B., Keeney, R. M., Serre, S. D., Gullett, B. K., Jozewicz, W. S. (2002). Development of a Cl-Impregnated Activated Carbon for Entrained-Flow Capture of Elemental Mercury, Environ. Sci. Technol., vol. 36, pp. 4454.
- Graydon J. W., Zhang, X. Z., Kirk, D. W., Jia, C.Q. (2009). Sorption and stability of mercury on activated carbon for emission control. Journal of hazardous materials, 168(2-3): 978–82
- ICAC (2010). Enhancing Mercury Control on Coal-fired Boilers with SCR, Oxidation Catalyst, and FGD, Institute of Clean Air Companies. Available at: [www.icac.com](http://www.icac.com).
- ICAC (2010a). Commercial Bookings List, June 2010. Available at:  
[www.icac.com/files/members/Commercial\\_Hg\\_Bookings\\_060410.pdf](http://www.icac.com/files/members/Commercial_Hg_Bookings_060410.pdf).
- ICAC (2012). Sorbent Injection Technology for Control of Mercury Emissions from Coal-Fired Boilers. Available at: [www.icac.com](http://www.icac.com).
- IEA, 2012, High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation-Technology Roadmap, International Energy Agency, Paris, France, 2012.
- IJC, International Joint Commission (2005) Consultation on emissions from coal-fired electrical utilities. Background report from the International Joint Commission and the Commission for Environmental Cooperation, International Air Quality Advisory Board, Montreal, QC, Canada, vp (Apr 2005).
- Institution of Chemical Engineers, Controlling Industrial Emissions-Practical Experience SS143 (Symposium). 1997.
- Ito S., Yokoyama T., Asakura K. (2006). Emission of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan, Science of the Total Environment, vol.368, pp. 397–402.
- Jia B J, Chen Y, Feng Q Z, Liu L Y (2013) Research progress of plasma technology in treating NO, SO<sub>2</sub> and Hg<sub>0</sub> from flue gas. Applied Mechanics and Materials, 295-298: 1293–1298.

- Jones A P, Hoffman JW, Smith D N, Feeley T J, Murphy J T (2007) DOE/NETL's Phase II mercury control technology field testing program: preliminary economic analysis of activated carbon injection. *Environmental Science and Technology*; 41 (4); 1365–1371.
- Kang, S.; Edberg, C.; Rebula, E.; Noceti, P. (2007). Demonstration of Mer-Cure™ Technology for Enhanced Mercury Control, DOE/NETL Mercury Control Technology Conference, Pittsburgh, PA, 11–13 December 2007.
- Keiser, B., Glesmann, S., Taff, B., Senior, C., Ghorishi, B., Miller, J., Mimna, R., Byrne, H., Improving Capture of Mercury Efficiency in WFGDs by Reducing Mercury Reemissions, ICAC, June 2014
- Kilgroe, J. D., C. B. Sedman, R. K. Srivastava, J. V. Ryan, C. Lee and S. A. Thorneloe (2001). Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers: interim report including errata dated 3-21-02. Carbon, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Air Pollution Prevention and Control Division, 5: 33.
- Ko K B, Byun Y, Cho M, Hamilton I P, Shin D N, Koh D J, and Kim K T (2008) Pulsed Corona Discharge for Oxidation of Gaseous Elemental Mercury. Chemistry Faculty Publications. Paper 2. [http://scholars.wlu.ca/chem\\_faculty/2](http://scholars.wlu.ca/chem_faculty/2).
- Landreth, R. and Royer, D., (2012). Extended use of concrete-friendly C-PAC sorbent at PPL Montana Corette Station, MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2012.
- Laudal, D.L.; Thompson, J.S.; Pavlish, J.H.; Brickett, L.; Chu, P.; Srivastava, R.K.; Lee, C.W.; Kilgroe, J.D. (2002) Evaluation of Mercury Speciation at Power Plants Using SCR and SCR NOx Control Technologies, 3rd International Air Quality Conference, Arlington, Virginia, September 9–12, 2002.
- Lawless, P. (1996). Particle Charging Bounds, Symmetry Relations, and Analytic Charging Rate Model for the Continuum Regime. *J. Aerosol Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 191–215, 1996.
- Leaner, J.J., Dabrowski, J.M., Mason, R.P., Resane, T., Richardson, M., Ginster, M., Gericke, G., Petersen, C.R., Masekoameng, E., Ashton, P.J., Murray, K., (2009). Mercury Emissions from Point Sources in South Africa. In: Pirrone, N., and Mason, R. (eds.) *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*, Springer.
- Leitfaden zur energetischen Verwertung von Abfällen in Zement- Kalk und Kraftwerken in Nordrhein-Westfalen, 2. Auflage Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, September 2005.
- Liu X.L., Wang S.X., Zhang L., Wu Y., Duan L., Hao J.M. (2013) Speciation of mercury in FGD gypsum and mercury emission during the wallboard production in China. *Fuel*, vol. 111, pp. 621–627.
- Lu, Y., Rostam-Abadi, M., Chang, R., Richardson, C., Paradis J. (2007). Characteristics of Fly Ashes from Full-Scale Coal-Fired Power Plants and Their Relationship to Mercury Adsorption, *Energy & Fuels*, vol. 21, pp. 2112–2120.
- Marshall, J., Blythe, G.M., and Richardson, M. (2005). Fate of Mercury in Synthetic Gypsum Used for Wallboard Production. Topical report, Task 1 Wallboard Plant Test Results, DE-TC26-04NT42080, April 2005.
- Martin, C. (2009). Activated Carbon Injection for Mercury Control from Coal-Fired Boilers, An Overview, Presented at the Energy Efficiency and Air Pollutant Control Conference, Wroclaw, Poland, September 2009.
- Massachusetts Department of Environmental Protection (2015). Annual Compliance Reports for SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, and Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants (also, similar annual compliance reports from power plants in States of New Jersey and Connecticut).
- McTigue, N. E., Cornwell, D. A., Graf, K., & Brown, R. (2014). Occurrence and consequences of increased bromide in drinking water sources. *JOURNAL AWWA*, 106, 11.
- Miller, C., Feeley, III, T., Aljoe W., Lani, B., Schroeder, K., Kairies, C., McNemar, A., Jones A., Murphy, J. (2006). Mercury Capture and Fate Using Wet FGD at Coal-Fired Power Plants, DOE/NETL Mercury and Wet FGD R&D, Pittsburgh, PA, August 2006.
- Nakayama, Y., Nakamura, S., Takeuchi, Y., Itoh, M, Okino, S., Honjo, S. (2006). MHI High Efficiency System; Proven technology for multi pollutant removal, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, 2006.
- Napolitano, S. (1998). "Analyzing Electric Power Generation under the CAAA", US EPA, March 1998.
- Nelson P. F. (2007) Atmospheric emissions of mercury from Australian point sources. *Atmospheric Environment*, vol. 41, pp. 1717–1724.

- Nelson, S., Landreth, R., Zhou, Q., Miller, J. (2004). Accumulated Power-Plant Mercury-Removal Experience with Brominated PAC Injection, Joint EPRI DOE EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium, The MEGA Symposium, Washington, DC, 2004.
- Nelson, S.; Landreth, R.; Liu, X.; Tang, Z.; Miller, J.; Brickett, L. (2006). Brominated Sorbents for Small Cold-Side ESPs, Hot-Side ESPs, and Fly Ash Use in Concrete, DOE/NETL Mercury Control Technology Conference, Pittsburgh, PA, December 11–13, 2006.
- Niksa, S., Fujiwara, N. (2004). The Impact of Wet FGD Scrubbing On Hg Emissions From Coal-Fired Power Stations, The MEGA Symposium, Washington, DC, 2004.
- Nolan, P., Downs, W., Bailey, R., Vecchi, S. (2003). Use of Sulfide Containing Liquors for Removing Mercury from Flue Gases, US Patent 6,503,470, 7 January 2003.
- Pacyna, J., Sundseth, K., Pacyna, E.G., Jozewicz, W., Munthe, J., Belhaj, M., Astrom, S. (2010). An Assessment of Costs and Benefits Associated with Mercury Emission Reductions from Major Anthropogenic Sources, *Journal of the Air & Waste Management*, vol. 60, pp. 302–315, 2010.
- Peters, H. James (2010) Regenerative Activated Coke Technology with No Water Consumption, RMEL Spring Conference, Santa Fe NM, 17 March 2010 (<http://www.hamonusa.com/sites/default/files/Regenerative%20Activated%20Coke%20Technology%20with%20No%20Water%20Consumption.pdf>).
- Pirrone N, Munthe J, Barregård L, Ehrlich H C, Petersen G, Fernandez R, Hansen J C, Grandjean P, Horvat M, Steinnes E, Ahrens R, Pacyna J M, Borowiak A, Boffetta P., Wichmann-Fiebig M. EU ambient air pollution by mercury (Hg) - position paper. Italy: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- Redinger, K.E., Evans, A., Bailey, R., Nolan, P. (1997). Mercury Emissions Control in FGD Systems, EPRI/DOE/EPA Combined Air Pollutant Control System, Washington, DC, 1997.
- Richardson, S. D., Plewa, M. J., Wagner, E. D., Schoeny, R., & DeMarini, D. M. (2007). Occurrence, genotoxicity, and carcinogenicity of regulated and emerging disinfection by-products in drinking water: a review and roadmap for research. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 636(1), 178–242.
- Rini, M.J., Vosteen, B.W. (2008). Full-scale Test Results From a 600 MW PRB-fired Unit Using Alstom's KNX™ Technology for Mercury Emissions Control, The MEGA Symposium 2008, Baltimore, MD, 2008.
- Rini, M.J., Vosteen, B.W. (2009). Full-Scale Test Results from a 600 MW PRB-fired Unit Using Alstom's KNX™ Technology for Mercury Control, MEC-6 Conference, Ljubljana, Slovenia, April 2009.
- Romanov, A., Sloss, L. and Jozewicz, W. (2012). Mercury emissions from the coal-fired energy generation sector of the Russian Federation. *Energy & Fuels*, vol. 26, pp. 4647–4654.
- Rupesh, K. (2013). Fuels and its Combustion in Boiler, Steag, 2013. Available at: <http://www.eecpowerindia.com/codelibrary/ckeditor/ckfinder/userfiles/files/Session%20%20%20module%20-%20Fuels%20and%20its%20Combustion%20in%20Boiler.pdf>.
- Sargent & Lundy (2007). Flue Gas Desulfurization Technology Evaluation (Dry Lime vs. Wet Limestone FGD), Project Number 11311-001 (2007).
- EPRI (2006). Status of Mercury Control Technologies: Activated Carbon Injection and Boiler Chemical Additives, Technical Report of EPRI (2006).
- Sarunac, Nenad, Evaluation and Comparison of US and EU Reference Methods for Measurement of Mercury, Heavy Metals, PM2.5 and PM10 Emission From Fossil-Fired Power Plants, Lehigh University, February 2007.
- Satyamurty, M. (2007). Coal Beneficiation Technology – 2007 Initiatives, Policies and Practices, presented at Workshop on Coal Beneficiation and Utilization of Rejects: Initiatives, Policies and Practice, Ranchi, India, 22–24 August 2007.
- Senior, C.L. (2000). Behavior of Mercury in Air Pollution Control Devices on Coal-fired Utility Boilers, Power Production in the 21st Century Conference, Snowbird, UT, USA, 2000.
- Senior, C. (2004). Modelling Mercury Behavior in Combustion Systems: Status and Future Prospects, In Proceedings of the Mercury Experts Conference MEC-1, Glasgow, Scotland, May 2004.
- Senior, C., Fry, A., Cauch, B. (2008). Modeling Mercury Behavior in Coal-Fired Boilers with Halogen Addition, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, August 2008.

- Senior, C., Johnson, S. (2008). Impact of Carbon-in-Ash on Mercury Removal across Particulate Control Devices in Coal-Fired Power Plants, *Energy & Fuels*, vol. 19, pp. 859–863, 2005.
- Serre, S., Lee CW, Chu, P., Hastings T. (2008). Evaluation of the Impact of Chlorine on Mercury Oxidation in a Pilot-Scale Coal Combustor — The Effect of Coal Blending, The MEGA Symposium, Baltimore, MD, August 2008.
- Singer, J.G. (1991). *Combustion Fossil Power*, 1991.
- Sloss, L. (2008). *Economics of Mercury Control*, Clean Coal Centre, ISBN: 978-92-9029-453-5, January 2008.
- Sloss, L. (2009). *Implications of emission legislation for existing coal-fired plants*, Clean Coal Centre, ISBN: 978-92-90290464-1, February 2009.
- Sloss, L. (2015). *The emerging market for mercury control*, IEA, CCC, February 2015.
- Srinivasan, N. and Dene. C. (2013). Bromine Related Corrosion Issues, July 2013. Available at: <http://aepevents.com/files/presentations/2013-general-session-bromine-additon-for-mercury-capturesrinivasan-and-dene-epri-1378922295.pdf>.
- Srivastava, R., Martin, B., Princiotta, F, Staudt, J. (2006). Control of Mercury Emissions from Coal-Fired Electric Utility Boilers, *Environ. Sci. Technol.*, vol. 40, pp. 1385–1392, 2006.
- Srivastava, R.K., Jozewicz, W. (2001). Flue Gas Desulfurization: The State of the Art, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol.51, no.12, pp.1676–1688, 2001.
- Tewalt, S.J., Belkin, H.E., SanFilipo, J.R., Merrill, M.D., Palmer, C.A., Warwick, P.D., Karlsen, A.W., Finkelman, R.B., and Park, A.J., comp., 2010, *Chemical analyses in the World Coal Quality Inventory*, version 1: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010-1196, <http://pubs.usgs.gov/of/2010/1196/>.
- Timpe, R.C.; Mann, M.D.; Pavlish, J.H. (2001). Organic Sulfur and HAP Removal from Coal Using Hydrothermal Treatment, *Fuel Process. Technol.*, vol. 73, no.2, pp.127–141, 2001.
- Toole-O’Neil, B., Tewalt, S.J., Finkleman, R.B., Akers. R. (1999). Mercury Concentration in Coal-Unraveling the Puzzle, *Fuel*, vol. 78, pp. 47–54, 1999.
- UK Department of Trade and Industry (2000), *Flue Gas Desulphurization (FGD) Technologies*, Technology Status Report No.12.
- UNEP (2008). *The Global Atmospheric Mercury Assessment: Sources, Emissions and Transport*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, DTIE, Geneva, Switzerland, December, 2008.
- UNEP (2010). *Process Optimization Guidance Document*, United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva, Switzerland, January 2011.
- UNEP (2011). *Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva, Switzerland, February 2011. Available at: [http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/coal/FINAL%20Chinese\\_Coal%20Report%20-%2011%20March%202011.pdf](http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/coal/FINAL%20Chinese_Coal%20Report%20-%2011%20March%202011.pdf).
- UNEP (2013a). *Global mercury assessment 2013: sources, emissions, releases, and environmental transport*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva. Available at: <http://www.unep.org/PDF/PressReleases/GlobalMercuryAssessment2013.pdf>.
- UNEP (2013b). *Reducing mercury emissions from coal combustion in the energy sector of the Russian Federation*. United Nations Environmental Programme, Chemicals Branch, Geneva. Available at: <http://www.unep.org/chemicalsandwaste/Portals/9/Mercury/Documents/coal/Report%20Demo-Toliatti%20FINAL%20Report%2027%20Nov%202013.pdf>.
- US DOE (2005). Feeley, J. III, Brickett, L.A, O’Palko A., Murphy J.T., *Field Testing of Mercury Control Technologies for Coal-Fired Power Plants*, Mercury R&D Review Meeting, December 2005.
- USEPA (1997). *Mercury Study Report to Congress, Volume I*, Office of Air Quality Planning and Standards and Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC, EPA-452/R-97-004b, December 1997.
- USEPA (2001). *Database of information collected in the Electric Utility Steam Generating Unit Mercury Emissions Information Collection Effort*, OMB Control No. 2060–0396, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC, April 2001. Available at: <http://www.epa.gov/ttn/atw/combust/utiltox/utoxpg.html>.

- USEPA (2002). Control of Mercury Emissions from Coal-Fired Electric Utility Boilers: Interim Report Including Errata Dated 3-31-02, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-01-109, April 2002.
- USEPA (2005). Multipollutant Emission Control Technology Options for Coal-fired Power Plants, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-05-034, March 2005.
- USEPA (2006). Characterization of Mercury-Enriched Coal Combustion Residues from Electric Utilities Using Enhanced Sorbents for Mercury Control, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-06-008, February 2006.
- USEPA (2008). Characterization of Coal Combustion Residues from Electric Utilities Using Wet Scrubbers for Multi-Pollutant Control, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-08-077, July 2008.
- USEPA (2009). CUECost Workbook Development, Documentation, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-09-131, September 2009. <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1005ODM.pdf>.
- USEPA (2009a). Characterization of Coal Combustion Residues from Electric Utilities-Leaching and Characterization Data, Air Pollution Prevention and Control Division, National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, EPA-600/R-09-151, December 2009.
- USEPA (2010). Documentation for EPA Base Case v.4.10 Using the Integrated Planning Model, EPA 430R10010.
- USEPA (2013). Documentation for EPA Base Case v.5.13 Using the Integrated Planning Model EPA# 450R13002. <http://www.epa.gov/airmarkets/programs/ipm/psmodel.html>.
- USGS (2014). Collaborative Studies for Mercury Characterization in Coal and Coal Combustion Products, Republic of South Africa, U.S. Geological Survey, Eastern Energy Resources Science Center, Reston, VA 20192, USA, January 2014.
- Vassileva, S.V.; Eskenazy, G.M.; Vassileva, C.G. (2000). Contents, modes of occurrence and origin of chlorine and bromine in coal. *Fuel*, vol. 79, pp 903–921.
- Vosteen, B.W., Beyer, J. et al. (2002). Process for Removing Mercury from Flue Gases, Patent Application DE 102 33 173, July 2002.
- Vosteen, B.W., Beyer, J., Bonkhofer, Th.-G., Pohontsch, A., Wieland, A. (2003). Hg-Rückhaltung im reingasseitigen SCR-Katalysatorbett hinter der Rauchgaswäsche einer Sonderabfallverbrennungsanlage, *VGB PowerTech* 4/2003, 76-91. April 2003.
- Vosteen, B. W., Beyer, J., Bonkhofer, Th.-G., Kanefke, R. , Ulrich, R. (2003b). Mercury-Related Chemistry in Waste Incineration and Thermal Process Flue Gases, Poster, Air Quality Conference VI, Arlington VA, September 2003.
- Vosteen, B. W., Kanefke, R. (2003c). Bromgestützte Quecksilberabscheidung aus den Abgasen von Verbrennungsanlagen, Studie im Auftrag des Landesumweltamts Nordrhein-Westfalen, Cologne, Germany, December 2003, available at: [http://vosteen-consulting.de/sites/Vosteen-Consulting/de\\_1958.asp](http://vosteen-consulting.de/sites/Vosteen-Consulting/de_1958.asp).
- Vosteen, B.W., Lindau, L. (2006). Bromine Based Mercury Abatement-Promising Results from Further Full Scale Testing, MEC-3 Conference, Katowice, Poland, June 2006.
- Vosteen, B.W.; Kanefke, R.; Koeser, H. (2006b). Bromine-enhanced Mercury Abatement from Combustion Flue Gases – Recent Industrial Applications and Laboratory Research, *VGB PowerTech* 3/2006, 70-75. March 2006.
- Vosteen, B.W. (2010). Chinese Coals Need Bromine for Co-Benefit Mercury Capture, paper # C2-8 in Proceedings of 13th Electric Utilities Environmental Conference (EUEC), Phoenix, AZ, February 1-3, 2010. Wang Y., Duan Y., Yang L., Jiang Y., Wu C., Wang Q., Yang X. (2008). Comparison of Mercury

- Removal Characteristic between Fabric Filter and Electrostatic Precipitators of Coal-fired Power Plants, *J Fuel Chem Technol*, vol. 36, no. 1, pp. 23–29, 2008.
- Wang, S., Zhang, L., Wu, Y., Ancora, M., Zhao, Y., Hao, J. (2010). Synergistic Mercury Removal by Conventional Pollutant Control Strategies for Coal-fired Power Plants in China, *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol. 60, no.6, pp. 722–730.
- Wang, S. X., Zhang, L., Li, G. H., Wu, Y., Hao, J. M., Pirrone, N., Sprovieri, F., Ancora, M. P. (2010) Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(3): 1183–1192.
- WCA (2014). World Coal Association. Available at <http://www.worldcoal.org/coal/what-is-coal/>
- Xu F, Luo Z, Cao W, Wang P, Wei B, Gao X, Fang M, Cen K (2009) Simultaneous oxidation of NO, SO<sub>2</sub> and Hg<sup>0</sup> from flue gas by pulsed corona discharge, *Journal of Environmental Sciences*, 21: 328–332.
- Zhang, L., Wang, S. X., Meng, Y., Hao, J.M. (2012). Influence of Mercury and Chlorine Content of Coal on Mercury Emissions from Coal-Fired Power Plants in China. *Environ. Sci. Technol.*, 46 (11), pp. 6385–6392.
- Zhang, L., Wang, S. X., Wang, F. Y., Yang, H., Wu, Q. R., Hao, J. M. (2013). Mercury transformation and removal in three coal-fired power plants with selective catalytic reduction systems. The 11th International Conference on Mercury as a Global Pollutant, Edinburgh, Scotland, UK, 2013.
- Zhang, L., Wang, S.X., Wang, L., Wu, Y., Duan, L., Wu, Q.R., Wang, F. Y., Yang, M., Yang, H., Hao, J.M, Liu, X. (2015). Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China. *Environ Sci Technol.*, 49(5):3185-94. doi: 10.1021/es504840m.
- Zhang, L. (2015). Mechanism of mercury transformation and synergistic removal from coal combustion. Postdoctoral Research Report, Beijing, China, 2015.
- Zhuo, Y. (2007). Hg Emission from Six Coal-fired Power Plants in China and Its Implications, Mercury Emission from Coal, The 4th International Experts' Workshop MEC-4, Tokyo, Japan, 13 –15 June 2007.
- ZMWG (2015) ZMWG Comments on Guidance on BAT/BEP for Coal-fired power plants and Coal-fired industrial boilers 1 August 2015; [http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/BAT-BEP%20draft%20guidance/Submissions/ZMWG\\_3.pdf](http://mercuryconvention.org/Portals/11/documents/BAT-BEP%20draft%20guidance/Submissions/ZMWG_3.pdf)
- Zykov, A.M., Kolchin, K.I., Tumanovsky, A.G., Jozewicz, W. (2004). Joint Russian-American Project to Enhance Performance of Electrostatic Precipitators Used at Power Plants in the Newly Independent States, The MEGA Symposium, Washington, DC, 2004.