

الإدارة المستدامة للنفايات الصلبة: نحو استراتيجية كاملة وفعالة

المقالة
الأصلية

جان الأشقر

قسم هندسة البترول ، كلية الهندسة ، الجامعة الأسترالية - الكويت

المستخلص

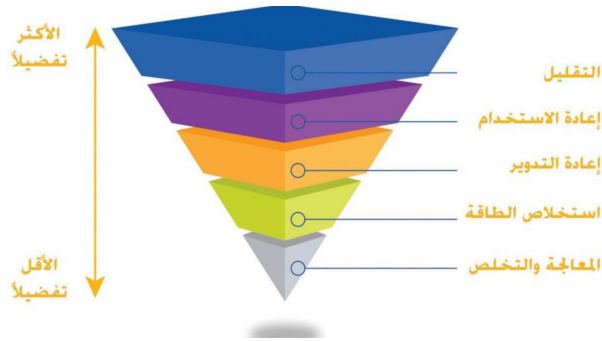
لا تزال مشكلة النفايات الصلبة في العالم مصدر قلق كبير لعدم وجود حل طويل الأمد. أدى النمو السكاني وتقلص المناطق المفتوحة وغياب الاستراتيجيات والسياسات الوطنية إلى حدوث هذه الأزمة الكبرى. لا يمكن للنظم الحالية التعامل مع الكميات الكبيرة من النفايات الناتجة، وهذا يؤثر على البيئة والصحة العامة. التحديات والعقبات مهمة ، وكذلك الفرص. يهدف هذا البحث إلى تسليط الضوء على ضرورة ضمان الإدارة الفعالة والسليمة للنفايات الصلبة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة. بالإضافة إلى ذلك، تشرح هذه الورقة الدوافع التاريخية والحديثة لإدارة النفايات الصلبة مع تقديم تصنيف عام وكامل للنفايات. علاوة على ذلك، تستعرض هذه الورقة مخططاً كاملاً للإدارة المستدامة للنفايات الصلبة، بدءاً من التجميع والنقل، إلى الفرز وإعادة التدوير، للوصول إلى التقنيات المختلفة المستخدمة لمعالجة النفايات الصلبة. أحدثت تقنيات المعالجة واستعادة الطاقة سوف تناقش مثل ترميد النفايات، التسيخ، التخلل الحراري، التغويز، تكنولوجيا البلازم، الهضم اللاهوائي وغيرها. أخيراً، يقدم هذا البحث توصيات عديدة، نظرية وعملية، مع استراتيجيات وسياسات مستدامة من أجل تعزيز خطة فعالة وكاملة لإدارة النفايات الصلبة، مما يساهم في تعزيز الاقتصاد الدائري المستدام. من المستحيل إقامة مجتمع مستدام يمكن العيش فيه من دون وجود إدارة رشيدة لنفاياته. ستوجه إدارة النفايات العالم بأسره للمساهمة معاً لتحقيق السلام والعدالة والعيش في ونام مع الطبيعة.

الإستلام: ١ نوفمبر ٢٠٢٢، القبول: ١ ديسمبر ٢٠٢٢

الكلمات الدالة: التنمية المستدامة ، معالجة النفايات ، التلوث ، التقنيات الناشئة ، الاقتصاد الدائري.

الباحث الرئيسي: جان الأشقر ، قسم هندسة البترول - كلية الهندسة - الجامعة الأسترالية - الكويت، بريد إلكتروني: j.achkar@au.edu.kw

على السواء. إدارة النفايات لها مكونات رئيسية مدرجة أدناه أدناه (شكل ١):



شكل ١: التسلسل الهرمي لإدارة النفايات

تركز أهداف التنمية المستدامة، التي وضعتها الجمعية العامة للأمم المتحدة، على إدارة النفايات التي يتم إدراجها بشكل مباشر أو غير مباشر في أكثر من نصف الأهداف السبعة عشر. فما هي هذه الأهداف وكيف ترتبط إدارة النفايات بكل هدف؟

جميع دول العالم تقريباً وعدت بتحسين كوكب الأرض وحياتنا مواطنينا

المقدمة

دفن النفايات وطمرها في الأرض، طريقة تمارس بشكل شائع في كثير من البلدان، في مناجم مهجورة أو محاجر الحجاره المستخرجة من الأرض. هذه الطرق تؤدي إلى تبعثر الفضلات الصلبة واجتذاب الحشرات وتسرب الفضلات السائلة إلى المياه الجوفية، ناهيك عن انبعاث الغاز الذي يتكون معظمه من الميثان وثنائي أكسيد الكربون. تعتبر هذه الغازات الدفيئة من العوامل الرئيسية المسببة لتغير المناخ.

إدارة النفايات هي عملية مراقبة وجمع ونقل ومعالجة وتدوير أو التخلص من النفايات، ويستخدم هذا المصطلح عادة للنفايات التي تنتج من قبل نشاطات بشرية. إن هذا الإجراء متبنى بشكل أساسي للحد من الضرر على صحة الإنسان والبيئة .

إدارة النفايات والتنمية المستدامة

إدارة النفايات هي مسؤولية الجميع، فضمن الإدارة الفعالة والسليمة أمر بالغ الأهمية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة (Arya et al., 2022).

إن النفايات التي تُلقى بدون إدارة في العراء أو يتم حرقها تضر بصحة الإنسان، والبيئة والمناخ، وتعرقل أيضاً النمو الاقتصادي في البلدان الفقيرة والغنية

الصناعة والابتكار والهياكل الأساسية

إن قطاع إدارة النفايات بحاجة إلى العديد من الأبحاث لزيادة أداء النظام بأكمله مما يعزز الصناعة والابتكار والبنية التحتية.

مدن ومجتمعات محلية مستدامة

لا يمكن تطوير المدن المستدامة بدون ضمان خطة لإدارة النفايات. وفي الواقع تعتبر الإدارة الذكية للنفايات عاملاً رئيسياً لبناء مدن أكثر ذكاءً وأكثر استدامة لمواطنيها.

الاستهلاك والإنتاج مسؤولان

يعتمد تحقيق هذا الهدف على الإدارة الفعالة للموارد الطبيعية، والطريقة التي يتخلص بها من النفايات والملوثات. كما يعتمد على تشجيع الصناعات والأعمال التجارية وحث المستهلكين على تقليل النفايات وإعادة تدويرها، وكذلك على دعم البلدان النامية في التحرك نحو أنماط استهلاك أكثر استدامة.

الحياة تحت الماء

يتم تصريف الكثير من المواد الكيميائية وغيرها من مخلفات النفايات في الأنهار والمحيطات وذلك يؤثر على النظام البيئي المائي. لذا ستخفف الإدارة السليمة تصريف هذه الأخيرة مما يحافظ على النظم الإيكولوجية المائية.

الحياة في البر

لا يمكن ضمان الحياة على الأرض من دون الحفاظ على النظام البيئي في كل مكان. إن الحد من التلوث وتوفير أرض نظيفة خالية من النفايات سيساعد أيضاً في الحفاظ على الحياة في البر.

السلام والعدل والمؤسسات القوية

كيف يمكن تطبيق السلام والعدل إذا لم تتمكن من الحفاظ على كوكبنا من التدهور. ستوجه إدارة النفايات العالم بأسره للمساهمة معاً لتحقيق السلام والعدالة والعيش بانسجام مع الطبيعة.

دفع النفايات العشوائي وحرقتها يعملان بشكل كامل ضد أغلبية أهداف التنمية المستدامة، وقد تسببا بكثير من المخاطر كتسرب السموم إلى المياه، وإنتاج المواد السامة والغازات الدفينة، وزيادة خطر الإصابة بالسرطان وارتفاع مستوى التلوث (Srivastav and Kumar, 2021).

تاريخ النفايات الصلبة

إن إدارة النفايات الصلبة البلدية هي خدمة عامة، عندما تفشل، يمكن أن تصبح ساحقة للمجتمعات والسلطات.

الدوافع التاريخية والحديثة لإدارة النفايات الصلبة

تكيفت إدارة النفايات تدريجياً مع المتطلبات الجديدة بشكل عام. ثلاث خطوات رئيسية يمكن وصفها. بدايةً، في أنظمة إدارة النفايات البدائية (حتى العشرينيات من القرن الماضي)، كان الشاغل الرئيسي الصحة العامة والنظافة. ولتخفيف الإزعاج، قضت الاستراتيجية الرئيسية بجمع النفايات ونقلها إلى المكبات البعيدة. جذبت هذه الأماكن الطبقات المحرومة التي كانت تكسب عيشها من إعادة التدوير وإعادة استخدام المواد الموجودة في مطامر القمامة.

مع زيادة كميات النفايات التي ترافقت مع زيادة السكان، وتغير تكوينها بسبب بداية القطاع الصناعي، وتركيز إنتاجها في المدن بسبب التحضر وزيادة

بحلول عام ٢٠٣٠، من خلال التزامها بسبعة عشر هدفاً حددتها الأمم المتحدة في عام ٢٠١٥. (شكل ٢) من أولويات هذه الأهداف إنهاء الفقر المدقع، وإعطاء الناس رعاية صحية فضلى، وتحقيق المساواة للمرأة ومحاربة تغيير المناخ.



شكل ٢: أهداف التنمية المستدامة

إن التنمية المستدامة هي السبيل لتنظيم المجتمع، وهذا يعني النظر في كل الضرورات الحالية والمستقبلية كالحفاظ على البيئة والموارد الطبيعية والموارد الاجتماعية والاقتصادية. فهي لا يمكن أن تتحقق بدون اعتبار إدارة النفايات عاملاً أساسياً.

سرى أدناه كيفية مساهمة إدارة النفايات في الكثير من أهداف التنمية المستدامة.

القضاء على الفقر

إنّ المواد التي تنتجها إدارة النفايات وإعادة تدويرها يمكن أن تساعد الناس في كسب معيشتهم وإنهاء حالة الفقر.

الصحة الجيدة والرفاه

غالباً ما يتم إلقاء النفايات أو حرقها في الهواء الطلق مما يؤدي إلى إنبعاث الغازات السامة، وامتصاص السموم في التربة، وزيادة التهديدات الميكروبية، وإنتاج المخلفات السامة وغيرها من الآثار المضرة بالصحة. لذلك تساهم إدارة النفايات في تقليص الآثار المضرة والمشاركة في تأمين شروط بيئية سليمة وعالم صحي.

المياه النظيفة والنظافة الصحية

إن الإدارة غير السليمة للمواد الكيميائية والنفايات الأخرى قد تؤدي إلى تلوث المياه. أما في ظل وجود إدارة مناسبة، سيتم معالجة جميع المواد الكيميائية ومياه الصرف الصحي لتجنب الخطر.

طاقة نظيفة بأسعار معقولة

يمكن أن ينتج عن ترمين النفايات العضوية كمية كبيرة من الطاقة التي يمكن اعتبارها مورداً متجدداً ونظيفاً.

العمل اللائق وهو الاقتصاد

توفر إدارة النفايات الكثير من الفرص والمهن التي يمكن أن تساعد ملايين الأشخاص في العثور على عمل لائق مما يساهم في تحسين الاقتصاد المحلي.

النتيجة عنها، على أي مواد أخرى. كذلك تعتبر من النفايات الخامدة الجزيئات الناعمة للرماد الذي لا يصفى رماداً متطابراً، لكنس الشوارع، للزجاج المكسور، للإسمنت، للقرميد، للبلاط والسيراميك، للتربة والصخور، للالياف الزجاجية، للمعادن التي يمكن أن تمر من خلال منخل صغير الحجم.

"النفايات القابلة للتحلل الحيوي": النفايات العضوية الناتجة عن الحدائق والمتنزهات، ونفايات الطعام والطبخ من المنازل والمطاعم و المصانع الغذائية.

- "النفايات الطبية": هي نفايات يتم توليدها كمنتج ثانوي لأعمال الرعاية الصحية في جراحات الأطباء وأطباء الأسنان والمستشفيات والمختبرات. وتشمل أي مادة يمكن أن تصادف الجسم أثناء التشخيص أو البحث أو إدارة الدواء أو أي نوع من العلاج.

"النفايات الإلكترونية": هي أشكال مختلفة من المعدات الكهربائية والإلكترونية التي لم تعد ذات قيمة لمستخدميها أو لم تعد تفي بالغرض الأصلي.

جمع ونقل النفايات

يتضمن الجمع والنقل الحديث للنفايات الصلبة العديد من الخطوات الفنية والتقنيات الناشئة. تداخل تكنولوجيا المعلومات مع نظام إدارة النفايات أدى إلى ظهور العديد من التقنيات المبتكرة مثل نظام التجميع تحت الأرض، وتكنولوجيا نظم المعلومات الجغرافية المستندة إلى الويب، وشاحنات جمع القمامة المدمجة.

نظام تجميع النفايات تحت الأرض

تقنيات تخزين النفايات الجديدة هي أنظمة تخزين تحت الأرض حيث تحل نقاط التجميع محل مستوعبات أو حاويات النفايات. ويشمل ذلك وضع حاوية في عمق ٢-٣ أمتار لجمع النفايات التي يتم نقلها باستخدام أنواع خاصة من الشاحنات. هذه التكنولوجيا مفيدة للمناطق ذات الظروف المناخية الحارة لأنه سيتم تخزين النفايات تحت الأرض في درجة حرارة منخفضة نسبياً، ما يحول دون تدهورها وانبعث الروائح الكريهة منها. من ناحية أخرى، تتطلب هذه التكنولوجيا صيانة أقل وهي مقبولة جمالياً.

تكنولوجيا نظم المعلومات الجغرافية GIS

في السنوات الأخيرة، اكتسبت تكنولوجيا نظم المعلومات الجغرافية شعبية في كافة المجالات تقريباً كما أصبح اقترانها مع جمع النفايات شائعاً خاصة في البلدان المتقدمة. بفضلها يمكن للبلديات إدارة دورة النفايات بأكملها من نقطة الإنتاج إلى مناطق التخلص، وتحسين كل مرحلة من المراحل (Gurjar and Gaur, 2022). أتاح تطوير هذه التكنولوجيا إنشاء أنظمة متكاملة فعالة، قادرة على تلبية متطلبات دورة النفايات. وفقاً لدراسات الحالة الإيطالية والأوروبية، فإن تنفيذ هذه التقنية قد ساعد على تحسين عملية جمع النفايات وفصلها من المصدر وإعادة التدوير بنسبة تصل إلى ٨٠٪.

شاحنات جمع النفايات المدمجة

في العديد من البلدان النامية، وبسبب الطرق الضيقة والمزدحمة، يتم استخدام شاحنات صغيرة لجمع القمامة. أدخلت أحدث التقنيات ما يسمى بالضاغطات في شاحنات التجميع من أجل زيادة قدرة التجميع. حققت هذه

الوعي (في الستينيات والسبعينيات من القرن العشرين)، كان لا بد من ملاحظة تأثيراتها السلبية على البيئة. آخذين بعين الاعتبار التلوث في مطامر القمامة وتأثيره على النظم الإيكولوجية، وعلى نوعية الهواء وموارد المياه وبالتالي على صحة الإنسان، أصبحت حماية البيئة المحرك الثاني الأساسي لإدارة النفايات.

المحرك الثالث، إدارة الموارد، الذي كان موجوداً دائماً لكن بشكل غير رسمي. في القرن الواحد والعشرين، تهتم الإدارة المستدامة للنفايات بإدارة الموارد بقدر اهتمامها في التخلص الآمن منها. يصل استهلاك الموارد الطبيعية إلى مستويات استثنائية، مما يجعل إعادة استخدامها وتدويرها خياراً قابلاً للتطبيق. هذا ما أدى إلى اعتبار النفايات مورداً قيماً يساهم في خفض تكاليف الإدارة وزيادة الفرص التجارية.

الإدارة المتكاملة للنفايات الصلبة هي إطار تم تطويره في الثمانينات. وفقاً للأمم المتحدة، فإن أي تحسين أو تغيير في نظام إدارة النفايات الصلبة لمدينة أو منطقة ما، يجب أن يعالج جميع الجوانب الرئيسة التالية: الصحة العامة من خلال الجمع المناسب، والبيئة من خلال التخلص الآمن، وإدارة الموارد من خلال إعادة التدوير والوقاية؛ مع الأخذ بعين الاعتبار الاستدامة المالية والتماسك المؤسسي.

تشكل النفايات الصلبة تحدياً في العديد من البلدان النامية التي شهدت تغييراً سريعاً في العقود الأخيرة وأبرزها التمدن السريع، النمو السكاني، النمو الاقتصادي وتغيير أنماط الاستهلاك، إلى جانب الموارد المالية المحدودة للقيام بالتكيف الهيكلي وسوء الإدارة والتخطيط، يمكن أن تصبح النفايات الصلبة عبئاً على المجتمعات، خاصة في المناطق الحضرية الكبيرة. قد يقلل السياق السياسي - الاقتصادي للبلد، مع الأهداف الإنمائية الأخرى وقضايا الاستقرار، من أولوية إدارة النفايات على جدول الأعمال الأساسي.

تصنيف النفايات

النفايات هي كل المواد التي تحتاج إلى التخلص منها والهدف من ذلك هو تجنب المشاكل الصحية أو البيئية. وبشكل عام يتم تصنيف النفايات كما يلي:

"النفايات المنزلية": النفايات الناتجة عن المنازل؛ وكذلك أي نوع آخر من النفايات المشابهة الناتجة عن المؤسسات التجارية، الصناعية والمؤسسات الإدارية وتشمل أيضاً النفايات الناتجة عن عمليات الكنس والصيانة البلدية.

"النفايات الصناعية": هي النفايات الصلبة الناتجة عن المؤسسات التجارية، الصناعية، أو الإدارية أو غيرها، باستثناء النفايات المنزلية حسب ما تم تعريفها اعلاه. وهي تتضمن على سبيل المثال لا الحصر النفايات الصناعية، النفايات الزراعية، نفايات المؤسسات الصحية، نفايات المسالخ، ونفايات البناء والهدم، الوحول الناتجة عن معالجة المياه المبتذلة، والعصارة الناتجة عن إدارة النفايات الصلبة، والخ ...

"النفايات الخطرة": النفايات الصلبة أو السائلة أو الغازية والتي بسبب سميتها أو قدرتها على الاشتعال أو الانفجار التي تؤثر على صحة البشر أو على عناصر البيئة.

"النفايات الخامدة" أو العوادم: هي النفايات الصلبة التي تقاوم التغيرات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، وبالتالي غير قابلة للذوبان، للاحتراق، للتفاعل الفيرياني والكيميائي، وللتحلل البيولوجي، ولا تؤثر، كما العصارة

(النباتات والنشا والسكريات والسليولوز) القابلة للتحلل في ظروف مناسبة بفعل البكتيريا، فينكك إلى غاز ثاني أكسيد الكربون أو غاز الميثان في مدة قد تصل إلى ستة أشهر. وثانياً، البلاستيك القابل للتحلل المصنوع من البتروكيماويات، وتتم هذه العملية في كافة الظروف، والبلاستيك هنا لا يحتاج إلى الميكروبات كي يتحلل ويتفكك (Ali et al., 2022).

إعادة تصنيع الزجاج

يشكل الزجاج عنصراً مهماً من النفايات المنزلية والصناعية بسبب وزنه وكثافته. تدوير الزجاج هي عملية تحويل نفاياته إلى منتجات قابلة للاستخدام. يجب فصل النفايات الزجاجية على أساس التركيب الكيميائي، وبعد ذلك، قد يتم فصلها إلى ألوان مختلفة وذلك اعتماداً على الاستخدام النهائي وعلى قدرات المعالجة المحلية. فالعديد من شركات تدوير النفايات تجمع الزجاج على أساس اللون لأنه يحتفظ به بعد إعادة التدوير.

تقنيات معالجة النفايات

الخطوة التالية في الإدارة المتكاملة للنفايات هي معالجة النفايات المجمعة. في ما يلي، سيتم مناقشة أحدث تقنيات المعالجة واستعادة الطاقة.

ترميد النفايات - Incineration

يعرف ترميد النفايات كتقنية تهدف إلى حرق المركبات العضوية وغيرها من المواد، باستخدام درجة حرارة عالية وهذا ما يسمى بالمعالجة الحرارية. تتضمن عملية الحرق تحويل النفايات إلى رماد يوجه إلى أسفل المدخنة أما الغازات المنطلقة والحرارة يتم الاستفادة منها في توليد الطاقة الكهربائية. يأتي الحرق مع فوائد في مجالات محددة مثل النفايات الطبية وغيرها من النفايات التي تهدد الحياة، حيث يتم تدمير السموم بالحرارة العالية.

يمكن استخدام الحرارة المنتجة بواسطة المحرقة لتوليد البخار الذي يستخدم لقيادة التوربينات من أجل إنتاج الكهرباء. قبل إدخال أنظمة تنظيف غاز المداخن، كان هذا الأخير ينتقل إلى الجو مما يؤدي إلى التلوث. إن أكبر مصدر للتلوث، الذي يستحوذ على أفكار البيئيين حول الترميد، هو إنتاج كميات كبيرة من الفوران والديوكسين الضارة والمسببة للسرطان. لذلك يتم تزويد المولدات الحديثة بمعدات خاصة لتنظيف انبعاثات هذه الغازات. كان هناك وقت لا توجد فيه قوانين لإنقاذ البيئة والغلاف الجوي من هذه الانبعاثات الخطيرة، ولكن اليوم وفي عديد من البلدان، هناك قواعد ولوائح صارمة وإلزامية لإجراء عملية الترميد هذه (Zhuang et al., 2022).

التسبيخ - Composting

التسبيخ هو الطريقة الطبيعية لإعادة تدوير النفايات العضوية، أي نفايات الطعام، والأوراق، والعشب، والريش، وبقايا المحاصيل وغيرها، وتحويلها إلى سماد عضوي قيم.

التسبيخ هو عملية بيولوجية تنفذ في ظل الظروف الهوائية التي تسيطر عليها (يتطلب الأوكسجين). في هذه العملية، تقوم الكائنات الحية الدقيقة المختلفة، بما في ذلك البكتيريا والفطريات، بتقسيم المادة العضوية إلى مواد أبسط. تعتمد فعالية التسبيخ على الظروف البيئية الموجودة داخل هذا النظام مثل الأوكسجين ودرجة الحرارة والرطوبة والمادة العضوية وحجم ونشاط المجموعات الميكروبية. تتراوح فترة المعالجة من حوالي 30 إلى 120 يوماً ودرجة الحرارة بين 16 و 60 درجة مئوية (Zhou et al., 2022).

الشاحات معدل ضغط عال حيث أصبح بإمكانها حمل نفايات أكثر بمقدار 1,5 مرة مقارنة بالشاحات التقليدية. لا تزيد التقنية من قدرة التجميع فحسب، بل وأيضاً من كفاءة استخدام الطاقة، وهو أمر مطلوب من الناحية البيئية والاقتصادية.

الفصل والفرز

بعد التجميع، تتمثل الخطوة الثانية في نظام إدارة النفايات الصلبة في فرز أو فصل أنواع مختلفة من النفايات لمزيد من المعالجة. من بين جميع الخطوات، الفرز هو الخطوة الحاسمة لإعادة الاستخدام وإعادة التدوير. تشمل أحدث التقنيات الفرز: الفرز الآلي، الصناديق المتعددة الحجرات، وتقنيات الفرز على أساس أجهزة الاستشعار البصرية.

الصناديق متعددة الحجرات

في الآونة الأخيرة، استخدمت الدول المتقدمة صناديق متعددة الأجزاء لفرز النفايات من المصدر. هذه الأنواع من الصناديق لديها مقصورات منفصلة لأنواع مختلفة من النفايات. لذلك، يمكن فصل النفايات العضوية ونفايات الورق والمواد القابلة لإعادة التدوير في مكان الإنتاج.

الفرز البصري

يتم فرز أنواع مختلفة من البلاستيك والمواد المركبة والنفايات الأخرى باستخدام كاميرات رقمية حساسة للألوان، أو أجهزة استشعار الأشعة فوق البنفسجية أو طيف بالأشعة تحت الحمراء (Wu et al., 2020).

الفرز الآلي

لتحسين كفاءة الفرز، يتم تحويل مصانع الفرز الحديثة إلى أنظمة قائمة على الفرز الآلي. هذه التكنولوجيا هي البديل الأنسب للفرز اليدوي فهي توفر معدل استرداد مرتفع للنفايات مع تكلفة تشغيل منخفضة.

إعادة التدوير

إن أفضل ممارسة إدارية هي تنفيذ مفهوم التخفيض، إعادة الاستخدام وإعادة تدوير النفايات. تحولت البلدان المتقدمة إلى هذا المفهوم منذ عقود، بينما لا تزال البلدان النامية تعمل عليه. فالنفايات الصلبة البلدية هي مزيج من المكونات مثل الورق والبلاستيك والزجاج والمعدن، التي يمكن إعادة تدويرها واستخدامها في أوقات معينة.

تقنية إزالة الأجرار لإعادة تدوير الورق

خلال هذه العملية، تتم إزالة حبر الورق من ملاط الورق المعاد تدويره. في أوروبا، زاد الإنتاج السنوي لللب منزوع الحبر بنسبة تصل إلى 15%. يمكن أن تؤثر إعادة التدوير المتكررة للصحف والورق الأبيض المطبوع على جودة الورق، فوفقاً للدراسات يمكن إعادة تدويرها حتى خمس مرات (Bajpai, 2014).

البلاستيك القابل للتحلل

هو نوع مطوّر من البلاستيك القابل للتحلل الحيوي بعد فترة زمنية معينة يمكن أن تطوّر أو تقصر بحسب طبيعة العوامل المساعدة على التحلل.

يمكن تقسيم البلاستيك القابل للتحلل إلى نوعين بحسب المادة المصنّعة منه: البلاستيك الحيوي المعتمد في مكوناته على الخامات النباتية المتجددة

الهضم اللاهوائي - Anaerobic Digestion

الهضم اللاهوائي هي العملية التي تقوم خلالها أنواع مختلفة من البكتيريا بهضم المواد العضوية المتكونة من بقايا النبات والحيوان والمنتجات الثانوية الصناعية وتحويلها إلى خليط جديد من المواد المفيدة على الصعيدين البيئي والاقتصادي، وهي:

- الغاز الحيوي (biogas) حيث يشكل غاز الميثان نسبة الثلثين منه وثاني أكسيد الكربون معظم النسبة المتبقية، إضافة إلى مجموعة بسيطة من الغازات الأخرى. إن استعمال هذا الغاز يمكن أن يشكل رافداً طاقوياً مهماً في بلد يدفع مئات ملايين الدولارات سنوياً مقابل البترول المستورد.

- سماد طبيعي سائل عالي الجودة من الممكن رشه في الحقول. فهو يتميز باحتوائه على نسبة كثيفة من المغذيات كالنيتروجين والفوسفات والبوتاسيوم، وخلوه من الجراثيم والديدان والحشرات الضارة، وجودة الخضار والفواكه المنتجة من الأراضي المسمدة به.

- سماد طبيعي صلب (digestate) يتميز بكونه محسن مثالي للتربة مما يقلل الاعتماد على الأسمدة الكيماوية. فمن الممكن استخدامه كمواد مضافة للأراضي الزراعية أو بيعه كسماد عضوي.

لذلك، الهضم اللاهوائي هو نهج واعد وقوي لتثمين النفايات العضوية في الاقتصاد الحيوي مستقبلاً. فهو يوفر مجموعة متنوعة من الفوائد البيئية والصحية بما في ذلك إنتاج الطاقة المتجددة، والحد من الغازات الدفينة، والحد من حجم النفايات وخفض الرائحة. أفادت الدراسات أن ١ م٣ من الغاز الحيوي يعادل ٢١ ميغا جول من الطاقة، ويمكن أن يولد ٢ كيلو واط/ساعة من الكهرباء (El Achkar et al., 2022, 2020, 2018b, 2018c, 2018a).

في الختام، تجدر الإشارة إلى أن هناك العديد من الأسباب للتفكير في الانتقال نحو مصادر الطاقة الخضراء بدلاً من استعمال الوقود الأحفوري، بما في ذلك:

- استخدام الوقود الأحفوري لإنتاج الطاقة هو غير مستدام.
- يمكن أن يكون للوقود الأحفوري المحروق آثار سلبية على صحة الإنسان والبيئة.
- الاعتماد على المصادر الأجنبية للوقود الأحفوري يمكن أن يشكل تهديداً للأمن القومي.
- حرق الوقود الأحفوري يؤدي إلى انبعاث غازات دفيئة، مما يساهم في تغيير المناخ.

طمر النفايات

مطمر النفايات landfill site هو مكان للتخلص من النفايات عن طريق دفنها وهذا ما كان يتبع قبل استحداث معالجة النفايات. تاريخياً، كان طمر النفايات من أكثر الطرق شيوعاً ولا يزال يمارس حتى اليوم.

تجدر الإشارة إلى أن النفايات التي تلقى في المطامر الصحية يمكن الاستفادة منها. فيمكن للمدن أن تجمع الميثان الذي يصدر في أثناء تحلل النفايات، وهي خطوة أفضل من إشعال (حرق) الغاز الناتج أو مجرد إطلاقه في الهواء، حيث يحتجز كميات من الحرارة تفوق كثيراً تلك التي تحتجزها الكميات نفسها من غاز ثاني أكسيد الكربون. ويمكن لمولدات الطاقة أن تجمع هذا الغاز وتحوله إلى كهرباء.

يعد التسبيخ أمراً بسيطاً نسبياً ويمكن إدارته في أي بيئة داخلية أو خارجية وفي أي موقع جغرافي تقريباً. لدى هذه التقنية القدرة على إدارة معظم المواد العضوية بما في ذلك نفايات المطاعم، ونفايات الأوراق والساحات، ونفايات المزارع، والسماد الحيواني، والمنتجات الورقية، وحمأة المجاري، والخشب وما إلى ذلك، ويمكن دمجها بسهولة في أي خطة إدارية للنفايات.

التحلل الحراري أو التكسير - Pyrolysis

التحلل الحراري هو تحلل للمواد العضوية عند درجات حرارة مرتفعة في غياب الأكسجين أو أي هالوجين، ويتضمن أيضاً تغير في التركيب الكيميائي الذي يصاحبه تغير في حالة المادة الفيزيائية (Potnuri et al., 2022).

تظهر هذه العملية في حرق الخشب عند تعرضه لدرجة حرارة (٢٠٠-٣٠٠ درجة مئوية) وتحوله لفحم، وأيضاً عند التقاء الغطاء النباتي مع الحمم البركانية. بشكل عام، التحلل الحراري أو التكسير ينتج الغازات غير المكثفة، والزيوت والفحم.

التغويز - Gasification

عملية التغويز هي تحويل المواد التي تحتوي على الكربون في تركيبها مثل الفحم والكتل الحيوية إلى أول أكسيد الكربون والهيدروجين وذلك بتفاعل المواد الخام عند درجات حرارة عالية مع كميات من الأكسجين. ينتج عن هذه العملية مزيج غازي يدعى غاز الاصطناع، وتعتبر هذه العملية من العمليات الفعالة لاستخراج الطاقة (Murugesan et al., 2022; Zallaya et al., 2023).

تكنولوجيا البلازما

التغويز مصطلح يعني تحويل المادة من الحالة السائلة أو الصلبة إلى الحالة الغازية. أما البلازما، فهي حالة المادة الرابعة، بعد الصلب والسائل والغاز (Bhatt et al., 2022). هي عبارة عن غاز مشحون إلكترونياً وشديد السخونة تولده النجوم في الكون بطريقة طبيعية ويمكن توليده اصطناعياً على الأرض عبر استخدام الطاقة الكهربائية.

التغويز بأسلوب البلازما هو عبارة عن معالجة النفايات العضوية وغير العضوية بواسطة مفاعل يستخدم موقد بلازما قوياً لرفع درجة حرارة النفايات لتصل إلى آلاف الدرجات. تؤدي هذه الحرارة الرهيبية إلى تكسير الروابط الكيميائية بين العناصر وتحويل النفايات المعالجة، بما فيها الخطرة بيئياً، إلى غازات.

الوقود البديل RDF

بشكل عام، يتم التفريق في بعض البلدان، خاصةً الأوروبية منها، بين ال RDF أو النفايات المنزلية أو الصناعية أو التجارية غير المتجانسة الناتجة عن المعالجة الميكانيكية-البيولوجية للنفايات والتي تتضمن بحسب اللائحة الصادرة عن الاتحاد الأوروبي المواد التالية: الورق والكرتون، المعادن، البلاستيك، الزجاج، الخشب، الأقمشة والمطاط.

يتم إنتاج RDF من النفايات الصلبة التي عادة ما تؤخذ من المواقع الصناعية أو التجارية. بعد التجميع، يتم تمزيق النفايات وتجفيفها وحرزها ثم حرقها أخيراً لإنتاج الكهرباء. يعد "الوقود المشتق المستخرج" مصدراً للطاقة المتجددة ويضمن ببساطة عدم إلقاء النفايات في المكب بل استخدامها بشكل جيد (Huang et al., 2022).

الثورة الصناعية الرابعة وإدارة النفايات

تمثل الثورة الصناعية الرابعة "IND 4.0" اتجاهًا سائدًا يغطي العالم كله تدريجيًا. ستغير هذه الثورة بشكل جذري طريقة عيشنا وعملنا وتفاعلنا مع بعضنا البعض. فهي تقدم مجموعة جديدة من الفرص للتحويل الاجتماعي، مع اختراقات في مجالات عدة مثل Internet of Things، والمركبات المستقلة، والروبوتات، والطابعات ثلاثية الأبعاد، وسلسلة الكتل "البلوك تشين" التي تعمل على زيادة دمج التكنولوجيا في حياتنا اليومية لتحسين طريقة عملنا (Fatimah et al., 2020).

تمثل الثورة الصناعية الرابعة والاستخدام الفعال لهذه التكنولوجيا الذكية خطوة كبيرة في إدارة وإعادة تدوير النفايات. من خلالها، ستراقب مئات الآلاف من المستشعرات جمع النفايات، ويتم اختبار مركبات التجميع بدون سائق، وتصبح الروبوتات مكونات أساسية لمرافق معالجة النفايات الجديدة، وتستخدم الطائرات بدون طيار لمراقبة المكب، ويتم اختبار الطابعات ثلاثية الأبعاد لإعادة تدوير أنواع مختلفة من البلاستيك.

لقد أحدثت هذه الثورة تأثيرًا كبيرًا على إدارة قطاع النفايات، ومن المتوقع أن تصبح بصمتها أكبر تدريجيًا وأكثر وضوحًا من حيث الكم والنوع. يعتقد الخبراء أن الوقت قد حان لدراسة هذا التأثير بعمق وتقديم أفكار رئيسية من شأنها مساعدة الصناعة على التكيف بشكل أفضل وتحفيز أنظمة إدارة النفايات بشكل أكثر استدامة.

نحو استراتيجية للإدارة المتكاملة للنفايات

لا تزال مشكلة النفايات الصلبة في العالم مصدر قلق كبير لعدم وجود حل طويل الأمد. النمو السكاني، تقلص المناطق المفتوحة وعدم وجود استراتيجيات وسياسات وطنية تسببت في هذه الأزمة الكبرى. لا يمكن للنظم الحالية التعامل مع الكميات الكبيرة من النفايات الناتجة، وهذا يؤثر على البيئة والصحة العامة. التحديات والعقبات مهمة، ولكن الفرص كذلك.

تتمثل الأولوية في الانتقال من الدفن العشوائي للنفايات الذي لا يوفر أي حماية بيئية، إلى أنظمة إدارة النفايات التي توفر موارد مفيدة من الممكن إعادة استخدامها. يلعب فصل النفايات من المصدر واستخدام مرافق معالجة النفايات المتخصصة لفصل المواد القابلة لإعادة التدوير دورًا رئيسيًا، مما يقلل من كميات النفايات التي تذهب إلى المطامر. كما يجب تطبيق اللامركزية، مما يقلل من تكلفة نقل النفايات، ويسمح للمناطق بالعثور على أماكن مناسبة بيئيًا لبناء مرافق الفرز والمعالجة والتخلص النهائي، ويفعل دور البلديات والاتحادات البلدية في إدارة هذا الملف.

تعد المعلومات المتعلقة بالكميات المستقبلية والتوصيف البيوكيميائي للنفايات مهمة للغاية لأنها تحدد مدى ملاءمة خيارات إدارة النفايات وتقنيات المعالجة المختلفة. بالنسبة للنفايات العضوية التي تشكل حوالي 50% من مجموع النفايات المنتجة، هناك ما يسمى "استعادة المواد" التي تهدف إلى استخراج المواد الموجودة في النفايات مثل الجزيئات النشطة بيولوجيا للاستخدامات الطبية والصيدلانية. بالإضافة إلى ذلك، يوفر التسبيخ سماداً مُحسِنًا للتربة، يمكنه تغذية الأراضي الزراعية ورفع إنتاجيتها، مع التخفيف من استخدام السماد الكيميائي الذي يزيد حموضة التربة.

من ناحية أخرى، هناك استعادة الطاقة النظيفة من النفايات، من خلال الهضم اللاهوائي مثلاً لإنتاج الطاقة المتجددة. في الواقع، ستؤدي هذه التقنية

الخضراء، بمجرد دمجها في المزارع والمصانع والبلديات، إلى إنتاج لامركزي للكهرباء من الميثان المنتج. بالإضافة إلى ذلك، تتيح الفرصة للمشاركة في الحد من ملوثات الهواء المنبعثة وقبل كل شيء للبدء بتطبيق سياسة بيئية مستدامة. لا يزال من الضروري إجراء المزيد من الدراسات الميدانية لفهم ظروف إدارة النفايات في البلديات بشكل أفضل. بناءً على النتائج، سيكون من الممكن تقديم التوصيات والاقتراحات وإيضاح الثغرات والعناصر المفقودة وتطوير نهج عملي ومتكامل، مع الأخذ بعين الاعتبار أنواع النفايات الناتجة وكمياتها والتكاليف وخيارات إعادة التدوير. في الواقع، يجب تكييف كل تقنية معالجة مع نوع النفايات والظروف الاجتماعية والاقتصادية للمنطقة المستهدفة. فإن خطط إدارة النفايات الصلبة ليست متشابهة، بل يجب أن تُبنى وفقاً لاحتياجات المجتمع.

من المستحيل إقامة مجتمع مستدام يمكن العيش فيه من دون وجود إدارة رشيدة لنفاياته. والأمر لم يعد يتعلق بالحلول الفنية فقط. فهناك آثار على المناخ والصحة والسلامة فضلاً عن الاعتبارات الاجتماعية المهمة، والحاجة إلى تغيير السلوكيات كي يتشجع الناس والمجتمعات على خفض كميات النفايات وإعادة تدويرها. بالإضافة إلى ذلك، كشفت دراسات عديدة أن استثمار دول العالم في خطط إعادة تدوير النفايات الصلبة، من الممكن أن يوفر فرص عمل جديدة للعمال المهرة وغير المهرة، وتدفعات جديدة للإيرادات للحكومات المحلية، وإمكانات لتحسين ظروف العمل للعاملين في هذا القطاع.

على صعيد آخر، هناك عدم إدراك كافي لطرق وتقنيات معالجة النفايات الصلبة. لذلك هناك حاجة ملحة لتوعية المسؤولين والشعب من أجل وضع استراتيجية جيدة وتنفيذها بنجاح. إن مشاركة القطاع الخاص عنصر أساسي في إدارة النفايات الصلبة. لذلك يمكن للجمعيات والمنظمات غير الحكومية والجامعات ومراكز الأبحاث أن تلعب دوراً مهماً في زيادة الوعي من خلال نقل وتشارك المعلومات ومن خلال حملات التوعية، إلخ.

علاوة على ذلك، يجب أن يعي تلاميذ المدارس والشباب والبالغون، أهمية إدارة النفايات وتأثير سوء الإدارة على البيئة والصحة العامة. سيؤدي ذلك إلى دمج قضايا المواطنة البيئية والتنمية المستدامة في عقول وممارسات وقرارات وقيم وسلوكيات كل مواطن وإعادة إيقاظ اهتمامهم في الحفاظ على البيئة وإعتبار النفايات مصدر موارد.

خاتمة

إن التخلص من النفايات لم يعد اليوم حلاً كافياً. فبعد تقليص حجمها، علينا أن نغلق الدائرة ونعيد استخدام ما تبقى منها مرة أخرى. لذا فإن الخطوة الأولى هي تقليل النفايات، ومن ثم إعادة استخدامها. ويدعم هذا الاتجاه أيضاً ما يسمى بحركة "صفر نفايات"، التي تهدف إلى كل من إعادة التدوير العالية والإنتاج المنخفض للنفايات. تتناسب هذه الفكرة أيضاً مع المفهوم الصديق للبيئة الذي يُعرف بالاقتصاد الدائري، الذي تغذي فيه العمليات والمعالجات المختلفة للمجتمع بعضها بعضاً بطريقة مفيدة.

فبعبارة بسيطة، إن النفايات هي الشيء الذي نحصل عليه عندما نفتقر إلى الخيال والابتكار...

قائمة المراجع

1. Ali, S.S., Elsamahy, T., Abdelkarim, E.A., Al-Tohamy, R., Kornaros, M., Ruiz, H.A., Zhao, T., Li, F., Sun, J., 2022. Biowastes for biodegradable bioplastics production and end-of-life scenarios in circular bioeconomy and biorefinery concept. *Bioresour. Technol.* 363, 127869. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127869>

9. El Achkar, J.H., Ziade, R., Louka, N., Maroun, R.G., Hobaika, Z., 2020. Treatment of dairy waste by anaerobic digestion to produce methane as green energy, in: 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC). Presented at the 2020 5th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REDEC49234.2020.9163848>
10. Fatimah, Y.A., Widiyanto, A., Hanafi, M., 2020. Cyber-physical System Enabled in Sustainable Waste Management 4.0: A Smart Waste Collection System for Indonesian Semi-Urban Cities. *Procedia Manuf., Sustainable Manufacturing - Hand in Hand to Sustainability on Globe: Proceedings of the 17th Global Conference on Sustainable Manufacturing* 43, 535–542. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.169>
11. Gurjar, S.K., Gaur, A., 2022. 21 - Application of remote sensing and GIS in integrated solid waste management - a short review, in: Hussain, C., Hait, S. (Eds.), *Advanced Organic Waste Management*. Elsevier, pp. 351–362. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00001-0>
12. Huang, T., Tang, Y., Sun, Y., Zhang, C., Ma, X., 2022. Life cycle environmental and economic comparison of thermal utilization of refuse derived fuel manufactured from land-filled waste or fresh waste. *J. Environ. Manage.* 304, 114156. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114156>
13. Murugesan, P., Raja, V., Dutta, S., Moses, J.A., Anandharamakrishnan, C., 2022. Food waste valorisation via gasification – A review on emerging concepts, prospects and challenges. *Sci. Total Environ.* 851, 157955. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157955>
14. Potnuri, R., Suriapparao, D.V., Rao, C.S., Kumar, T.H., 2022. Understanding the role of modeling and simulation in pyrolysis of biomass and waste plastics: A review. *Bioresour. Technol. Rep.* 20, 101221. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101221>
15. Srivastav, A.L., Kumar, A., 2021. An endeavor to achieve sustainable development goals through floral waste management: A short review. *J. Clean. Prod.* 283, 124669. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124669>
16. Wu, X., Li, J., Yao, L., Xu, Z., 2020. Auto-sorting commonly recovered plastics from waste household appliances and electronics using near-infrared spectroscopy. *J. Clean. Prod.* 246, 118732. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118732>
2. Arya, S., Chavan, D., Vishwakarma, S., Kumar, S., 2022. 20 - An approach for integrating sustainable development goals (SDGs) through organic waste management, in: Hussain, C., Hait, S. (Eds.), *Advanced Organic Waste Management*. Elsevier, pp. 331–350. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85792-5.00010-1>
3. Bajpai, P., 2014. 1 - Introduction*Some excerpts taken from Bajpai Pratima, 'Advances in Recycling and Deinking', 2006 with kind permission from Pira International, UK.*, in: Bajpai, P. (Ed.), *Recycling and Deinking of Recovered Paper*. Elsevier, Oxford, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-416998-2.00001-5>
4. Bhatt, K.P., Patel, S., Upadhyay, D.S., Patel, R.N., 2022. A critical review on solid waste treatment using plasma pyrolysis technology. *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.* 177, 108989. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2022.108989>
5. El Achkar, J.H., Baydoun, A., Salameh, D., Louka, N., Hobaika, Z., Maroun, R.G., 2018a. Can coffee grounds be considered as a potential for green energy production?, in: 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC). Presented at the 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REDEC.2018.8598105>
6. El Achkar, J.H., Husain, A.B., Alotaibi, N., Alhaddad, N., Alamgir, T., Alshamali, H., Alshammari, Y., Almuhanha, M., Albekheet, A., Alenezi, K., Alsaba, M.T., 2022. Could Petroleum Sludge be Used to Produce Biomethane as a Renewable Energy Source? Presented at the ADIPEC, OnePetro. <https://doi.org/10.2118/210953-MS>
7. El Achkar, J.H., Lendormi, T., Salameh, D., Louka, N., Maroun, R.G., Lanoisellé, J.-L., Hobaika, Z., 2018b. Anaerobic digestion of grape pomace: Effect of the hydraulic retention time on process performance and fibers degradability. *Waste Manag.* 71, 137–146. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.11.005>
8. El Achkar, J.H., Rohayem, C., Salameh, D., Louka, N., Maroun, R.G., Hobaika, Z., 2018c. Olive pomace, a source of green energy using anaerobic digestion, in: 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC). Presented at the 2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC), pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/REDEC.2018.8598079>

-
- ing technologies: A review. *Bioresour. Technol.* 360, 127591. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127591>
19. Zhuang, J., Tang, J., Aljerf, L., 2022. Comprehensive review on mechanism analysis and numerical simulation of municipal solid waste incineration process based on mechanical grate. *Fuel* 320, 123826. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123826>
17. Zallaya, S., El Achkar, J.H., Chacra, A.A., Shatila, S., El Akhdar, J., Daher, Y., 2023. Steam gasification modeling of polyethylene (PE) and polyethylene terephthalate (PET) wastes: A case study. *Chem. Eng. Sci.* 267, 118340. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2022.118340>
18. Zhou, Y., Xiao, R., Klammsteiner, T., Kong, X., Yan, B., Mi-hai, F.-C., Liu, T., Zhang, Z., Kumar Awasthi, M., 2022. Recent trends and advances in composting and vermicompost-
-

Abstract

Sustainable Solid Waste Management: Towards a Complete and Effective Strategy

Jean H. El Achkar

Petroleum Engineering Department, College of Engineering, Australian University (AU), Kuwait

The solid waste problem remains a major concern worldwide because there is no long-term solution. Population growth, shrinking open areas, and the absence of national strategies and policies have led to this major crisis. The current systems cannot handle the large amounts of waste generated, affecting the environment and public health. Challenges and obstacles are important, as are opportunities. This research aims to shed light on the need to ensure solid waste's effective and sound management to achieve sustainable development goals. In addition, this paper explains the historical and modern drivers of solid waste management while presenting a general and complete classification of waste. Furthermore, it reviews the entire sustainable solid waste management scheme, from collection and transportation to sorting and recycling, to accessing the different technologies used to treat solid waste. The latest treatment and energy recovery technologies will be discussed, such as waste incineration, composting, pyrolysis, gasification, plasma technology, anaerobic digestion, and others. Finally, this research presents several scientific and practical recommendations with sustainable strategies and policies to promote an effective and complete solid waste management plan, which contributes to promoting a sustainable circular economy. It is impossible to establish a sustainable and livable society without rational management of its waste. Waste management will guide the entire world to contribute together towards achieving peace and justice and living in harmony with nature.