

النظافة وإدارة النفايات الصلبة

حلول مستدامة لليمن مستوحاة من التجارب
العالمية

SANITATION AND SOLID WASTE MANAGEMENT

Sustainable and Economical
Solutions for Yemen Inspired by
Global Experiences

د. عبد الرحمن صلاح

أستاذ مساعد - كلية الزراعة - جامعة صنعاء

فؤاد الشويح

طالب دكتوراه - كلية الزراعة - جامعة صنعاء

Dr. Abdulrahman Salah

Assistant Professor - Faculty of Agriculture -
Sana'a University

Fuad Al-Shuwaia

PhD Candidate - Faculty of Agriculture -
Sana'a University

ملخص

تعد النظافة عنصرًا أساسيًا في تعزيز الصحة العامة، إلا أن إدارة النفايات تشكّل تحديًا عالميًا يختلف بين الدول المتقدمة والنامية. بينما تعتمد الدول المتقدمة على أنظمة الاقتصاد الدائري لإعادة تدوير النفايات وتقليل المخرجات البيئية.

تركز هذه الدراسة على تحليل واقع إدارة النفايات الصلبة في اليمن، مع التركيز على العاصمة صنعاء، من خلال مراجعة الأبحاث العلمية والتقارير الدولية. تستعرض الدراسة تجارب دولية في إدارة النفايات بهدف تحديد حلول مناسبة تتلاءم مع الظروف الاقتصادية والتكنولوجية في اليمن، وتكشف نتائجها عن تحديات أساسية، أبرزها نقص الوعي والاستثمارات، حيث تشكل النفايات العضوية أكثر من 60٪ من إجمالي المخلفات، ما يجعل تدويرها إلى أسمدة خيارًا أكثر استدامة. كما توصي الدراسة بإجراء دراسات مسحية، تحسين البنية التحتية، وتعزيز دور القطاع الخاص لتحقيق إدارة نفايات أكثر كفاءة واستدامة.

كلمات مفتاحية: النظافة، الصحة العامة، إدارة النفايات الصلبة، التدوير، الاستدامة، التحديات البيئية، الاقتصاد الخطي والاقتصاد الدائري في إدارة النفايات، اليمن، صنعاء.

Abstract

Cleanliness is a fundamental element in promoting public health; however, waste management remains a global challenge that varies between developed and developing countries. While developed nations rely on circular economy systems to recycle waste and reduce environmental outputs, developing countries face structural challenges that hinder sustainable waste management.

This study analyzes the current state of solid waste management in Yemen, with a focus on the capital, Sana'a, through a review of scientific research and international reports. It examines global waste management experiences to identify suitable solutions that align with Yemen's economic and technological conditions. The findings highlight key challenges, primarily the lack of awareness and investment, as organic waste constitutes more than 60% of total waste. This makes composting a more sustainable option compared to other disposal methods. The study recommends conducting comprehensive surveys, improving infrastructure, and enhancing private sector involvement to establish a more efficient and sustainable waste management system.

Keywords: cleanliness, public health, solid waste management, recycling, sustainability, environmental challenges, linear and circular economy in waste management, Yemen, Sana'a.

1. الإطار العام للدراسة

1-1. أهمية الدراسة

تُعد إدارة النفايات الصلبة أحد التحديات البيئية والاقتصادية والاجتماعية الأكثر إلحاحًا في العصر الحديث، خاصة في الدول النامية مثل اليمن. تشكل هذه القضية أساسًا لتحسين الصحة العامة وتعزيز الاستدامة البيئية من خلال تقليل التلوث، والحفاظ على الموارد الطبيعية، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

2-1. هدف الدراسة

يهدف هذا البحث إلى تحليل شامل للوضع الحالي لإدارة النفايات الصلبة في اليمن، مع التركيز على مدينة صنعاء كنموذج رئيسي. كما يسعى إلى اقتراح توصيات عملية مستمدة من التجارب الدولية، يمكن تكييفها مع السياق المحلي لتحقيق إدارة أكثر كفاءة واستدامة للنفايات.

3-1. أسئلة الدراسة

1. ما التحديات الرئيسية التي تواجه إدارة النفايات الصلبة في اليمن؟
2. ما أفضل الممارسات العالمية في إدارة النفايات الصلبة التي يمكن تكييفها في اليمن؟
3. كيف يمكن تحسين البنية التحتية ورفع الوعي المجتمعي لدعم الإدارة المستدامة للنفايات في اليمن؟

4-1. منهجية الدراسة

1-4-1. منهج جمع البيانات

تم استخدام منهجية تعتمد على مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة ذات الصلة بموضوع إدارة النفايات الصلبة في اليمن والدول المقارنة. شملت عملية جمع البيانات المصادر التالية:

1. الأدبيات العلمية المنشورة: البحث في قواعد بيانات أكاديمية مثل «Scopus» و«PubMed» للحصول على دراسات حول تقنيات إدارة النفايات والتحديات البيئية.
2. التقارير الدولية: مثل تقارير البنك الدولي وبرنامج الأمم المتحدة الإنمائي لتحديد مؤشرات الأداء المتعلقة بإدارة النفايات في الدول النامية.
3. المصادر المحلية: مراجعة التقارير الحكومية والتقارير غير المنشورة التي تناولت الوضع الحالي لإدارة النفايات في اليمن.

2-4-1. منهج تحليل البيانات

1. التحليل الوصفي: تم تحليل البيانات المتعلقة بكميات النفايات الصلبة وتكوينها، بالإضافة إلى التحديات الرئيسية، مثل نقص البنية التحتية والتمويل.

2. المقارنة الدولية: تم إجراء مقارنة بين اليمن ودول أخرى في مناطق مشابهة جغرافيًا واقتصاديًا لتحديد الفجوات وأفضل الممارسات.
3. النمذجة التنبؤية: تم استخدام معادلات تقديرية لحساب معدلات نمو النفايات الصلبة وكميات النفايات العضوية المتوقعة حتى عام 2030، بناءً على البيانات المتوفرة من التقارير السابقة.

3-4-1. خطوات التحقق من موثوقية البيانات

1. مقارنة البيانات من مصادر متعددة لضمان الدقة والتوافق.
2. استشارة خبراء محليين ودوليين في إدارة النفايات للتحقق من صلاحية التوصيات.
3. تطبيق منهجية «SWOT» «نقاط القوة، نقاط الضعف، الفرص، والتهديدات» لتحليل السياق المحلي ومدى توافقه مع الحلول المقترحة.

4-4-1. حدود المنهجية

1. نقص البيانات الحديثة: اقتصرت بعض التحليلات على بيانات قديمة بسبب غياب إحصائيات حديثة.
2. تأثيرات الصراع: أثرت الظروف السياسية والاقتصادية على دقة بعض التقارير المحلية.
3. القيود الزمنية: تطلبت بعض النماذج الافتراضية تقديرات تقريبية بسبب غياب المسوح الميدانية.

5-1. لماذا اليمن؟

تتسم اليمن بظروف اقتصادية وسياسية استثنائية تجعل إدارة النفايات تحديًا معقدًا. لذلك، فإن دراسة هذه المشكلة من منظور علمي يُعد خطوة أساسية نحو توفير حلول عملية قابلة للتطبيق.

2. النظافة والمجتمع

1-2. أهمية النظافة في حياة الإنسان والمجتمع

تلعب النظافة دورًا حيويًا في حياة الإنسان، ولها تأثيرات متعددة على الصحة والرفاهية، وتساعد النظافة الشخصية، مثل غسل اليدين بانتظام وتنظيف الأسنان والاستحمام، والنظافة العامة، مثل «جمع النفايات والتخلص منها بطرق سليمة» في الحفاظ على الصحة العامة وتقليل انتشار الأمراض التي تسببها البكتيريا والجراثيم المعدية التي تتكاثر في غياب النظافة⁽¹⁾⁽²⁾، كما أن البيئة النظيفة تعزز الشعور بالراحة النفسية وتقلل من التوتر والقلق⁽³⁾، وقد أثبتت الدراسات أن العيش في مكان نظيف ومنظم يمكن أن يزيد من التركيز والإنتاجية سواء في الدراسة أو العمل⁽⁴⁾. إضافة إلى ذلك، يمكن للنظافة الشخصية أن تؤثر على كيفية تفاعل الأشخاص مع بعضهم البعض، الشخص النظيف يكون أكثر قبولًا في المجتمع ويعزز من علاقاته الاجتماعية⁽⁵⁾. تؤدي النظافة أيضًا إلى تحسن الوضع الاقتصادي سواء للأفراد أو للمجتمعات عن طريق تحسن الحالة الصحية وتقليل تكاليف العلاج وزيادة الإنتاجية وبالتالي زيادة الدخل، ونمو القطاع السياحي، وتقليل التكاليف البيئية⁽⁶⁾. لذلك فإن النظافة ليست مجرد عادة صحية، بل هي جزء أساسي من حياة الإنسان تؤثر على جوانب متعددة من حياته.

2-2. تعريف النظافة وأبعادها المختلفة

يُعتبر مفهوم النظافة مفهوماً متعدد الدلالات، يشمل الأبعاد المادية والبيئية والأخلاقية، وله آثار نفسية واجتماعية كبيرة⁽⁷⁾. يشير المفهوم الشائع للنظافة إلى تجنب الأوساخ والتخلص منها، وهو أمر بالغ الأهمية في الحفاظ على الصحة، سواء الشخصية أو المجتمعية. إضافة إلى ذلك، يمكن الإشارة إلى الارتباط بين الحالة الفيزيائية للأشياء، كطاولة نظيفة، ومدى ارتباطها بالسلوكيات الأخلاقية للأفراد ومدى تقبلهم للعيش في بيئة غير نظيفة⁽⁸⁾. لذلك، تترايب أبعاد مفهوم النظافة -الطبية والمادية والأخلاقية والجمالية- مع بعضها البعض بشكل كبير ومتداخل.

لقد ارتبطت النظافة بالمعتقدات الدينية والسلوكية للمجتمعات عبر التاريخ [7]، ففي الدين الإسلامي، تُعتبر النظافة وتطهير الثوب والبدن ركناً أساسياً، إذ لا يمكن للمسلم أداء الصلوات والعبادات المختلفة إلا بعد تحقيقها. أما في الهندوسية، فتُعدّ النظافة جزءاً من الطقوس اليومية، حيث يقوم الهندوس بالاستحمام في الأنهار التي يعتبرونها مقدسة، مثل نهر الغانج⁽⁹⁾. كما تحتوي الديانة اليهودية على العديد من القوانين المتعلقة بالنظافة، مثل غسل اليدين والاعتسال في حوض الطهارة.

إذًا، فالنظافة ليست مجرد مسألة صحية، بل تُعدّ جزءاً من الممارسات الدينية التي تهدف إلى تحقيق الطهارة الروحية والجسدية. ومع ذلك، لا تزال هناك فجوة كبيرة في التطبيق العملي للنظافة العامة⁽¹⁰⁾. لذا، فإن الفهم الجيد للطبيعة المتعددة لمفهوم النظافة يُعدّ أمراً بالغ الأهمية في مختلف المجالات، بما في ذلك الطب، والهندسة المعمارية، والعلوم الاجتماعية. [7].

3-2. تطور مفهوم النظافة عبر الزمن

لقد تغير معنى النظافة والأساليب المستخدمة لتحقيقها بشكل كبير بمرور الوقت⁽¹¹⁾. استخدم المصريون القدماء القش والرماد في عمليات التنظيف، وبدأ البابليون في صناعة الصابون تقريباً في عام 2800 قبل الميلاد⁽¹²⁾، كما شيّد الرومان الحمامات العامة لتعزيز النظافة الشخصية قبل آلاف السنين.

في العصور الوسطى، تراجعت ممارسات الاستحمام في الحمامات العامة في أوروبا بسبب اعتقادهم بأنها مصدرٌ للتلوث وبؤرٌ للذئبة، وبدأوا باستخدام العطور والنباتات العطرية للتخلص من روائح الجسد الكريهة [11]. في القرن التاسع عشر، أدت الثورة الصناعية إلى ابتكار أدوات جديدة لتحقيق النظافة، مثل المكناس الكهربائية والمطهرات الكيميائية، والتي تطورت بشكل كبير نتيجة للتقدم الهائل في مجالات العلوم والتكنولوجيا [7]، في الوقت الحالي، بات الإنسان ينظر إلى النظافة بشكل مختلف. تكشف الدراسات التاريخية أن مفاهيم النظافة قد تطورت من مجرد واجبات والتزامات اجتماعية في العصور القديمة إلى مشاريع نظافة قائمة بذاتها في العصر الحديث⁽¹³⁾. على سبيل المثال، ليس كل الميكروبات التي تعيش داخل جسم الإنسان أو على جلده ضارة، بل هناك أنواع منها يجب الحفاظ عليها لضمان صحة جيدة. أكبر مثال على ذلك هو استخدام بعض الميكروبات الممرضة

في تلقيح الإنسان لحمايته من الأوبئة التي قد تسببها نفس تلك الميكروبات⁽¹⁴⁾. أدى هذا التقدم غير المسبوق في تاريخ البشرية إلى الحد بشكل كبير من انتشار الأوبئة، مثل الطاعون الأسود الذي اجتاحت أوروبا في القرن الرابع عشر بسبب قلة النظافة، وأدى إلى وفاة ملايين الأشخاص. كما كان من أسباب انتشار وباء الكوليرا في القرن التاسع عشر في المدن الأوروبية الكبرى المياه غير النظيفة. كذلك، يرجع انتشار السل والإنفلونزا الإسبانية بصورة أساسية إلى ضعف مستوى النظافة، سواء الشخصية أو البيئية⁽¹⁵⁾. خلال جائحة «كوفيد-19» التي اجتاحت العالم في عام 2020، لعبت النظافة الشخصية، وعلى وجه الخصوص غسل اليدين، دورًا مهمًا في السيطرة على انتشار الفيروس، حيث كانت من أكثر الطرق فعالية في الحد من انتقاله⁽¹⁶⁾. ونتيجة لهذه التطورات في العلوم والتكنولوجيا والطب، والتي ساهمت في اكتشاف المضادات الحيوية، وتطوير اللقاحات، وتحسين الرعاية الصحية، وتعزيز ممارسات النظافة، وتوفير مياه الشرب النظيفة، وتطوير أنظمة الصرف الصحي، انخفضت معدلات الوفيات وارتفع متوسط العمر المتوقع للإنسان⁽¹⁷⁾. ونتيجة لذلك فقد تضاعف عدد سكان العالم من 2.5 مليار في عام 1959 إلى 8 مليار تقريبًا في عام 2022.⁽¹⁸⁾

4-2. التحديات الحالية في مجال النظافة

من الوهلة الأولى، قد يتبادر إلى الذهن أن العالم بكل ما حققه من إنجازات في مختلف المجالات ومنها النظافة والتي انعكست إيجابًا على الصحة العامة للأفراد والمجتمعات، من خلال الزيادة الكبيرة في عدد السكان على مستوى العالم، إلا أن هذا النمو غير المسبوق قد خلق تحديات بيئية وصحية واقتصادية واجتماعية جديدة.⁽¹⁹⁾ يؤدي النمو السكاني المتسارع وأنماط الاستهلاك والإنتاج غير المستدامة، إلى تضاعف الضغوط على النظم البيئية، بما في ذلك الاحتباس الحراري، وخسارة التنوع البيولوجي، وانعدام الأمن الغذائي.⁽²⁰⁾ أحد التحديات التي تواجه البشرية اليوم تتعلق بتوليد النفايات الذي أصبح يفوق قدرة البيئة على استيعابه.⁽²¹⁾

تعد إدارة النفايات أمرًا بالغ الأهمية للحفاظ على الصحة العامة وحماية البيئة وتعزيز التنمية الحضرية المستدامة. يمكن أن يؤدي التخلص غير السليم من النفايات إلى تلوث التربة والمياه والهواء، ويؤدي تراكم النفايات في المناطق الحضرية إلى بيئة غير نظيفة وتفشي الأمراض المنقولة بالنواقل. يمكن تصنيف نظم الإدارة الحالية للنفايات إلى نوعين رئيسيين: النوع الأول هو نظام الإدارة القائم على نهج الاقتصاد الخطي، وهو نظام تقليدي يتعامل مع الموارد وكأنها لانهائية، يبدأ بالاستخراج ثم الإنتاج ثم الاستهلاك وينتهي بالتخلص من النفايات دون النظر إلى إعادة التدوير أو إعادة الاستخدام أو استرجاع الموارد، لذلك، أصبح ينظر إليه اليوم كنهج غير مستدام.⁽²²⁾ إضافة إلى ذلك، يؤدي الاقتصاد الخطي إلى استنفاد الموارد الطبيعية المحدودة وتراكم الملوثات وتدهور النظم البيئية والصحة العامة.⁽²³⁾ النوع الثاني نظام إدارة النفايات القائم على منهجية الاقتصاد الدائري الذي يعطي الأولوية للحد من توليد النفايات من المصدر وإعادة استخدام وتدوير واسترجاع الموارد من النفايات المتولدة، وإعادتها إلى سلاسل الإنتاج المختلفة بناء علاقة تبادل منفعة بين النمو الاقتصادي والاستدامة البيئية [22].

لذلك يعد نظام إدارة النفايات القائم على مبادئ الاقتصاد الدائري نظام فعال في الحفاظ على سلامة البيئة ويوفر مصادر ثمينة للمواد الثانوية والطاقة اللازمة للنمو الاقتصادي. على الرغم من المزايا العديدة للإدارة الفعالة للنفايات، إلا أن هناك العديد من التحديات، مثل البنية التحتية الضعيفة ونقص التمويل والوعي العام المنخفض، لا تزال قائمة في العديد من الدول النامية. تتطلب مواجهة هذه التحديات تظافر الجهود بين الحكومات والقطاعات الصناعية والمجتمعات المحلية لتنفيذ استراتيجيات فعالة لإدارة النفايات كشرط أساسي لتحقيق التنمية المستدامة.

بعد توليد النفايات البلدية الصلبة، تبدأ عمليات الإدارة المختلفة بما في ذلك عملية الفرز والجمع والنقل وأخيراً المعالجة أو التخلص النهائية. الشركاء الرئيسيون في تنفيذ تلك المهام هم المواطنون وجامعي النفايات غير الرسميين، والسلطات المحلية أو الحكومات، والجهات أو المنظمات الخاصة. يتشارك المواطنون وجامعي النفايات والحكومات في عملية الفرز، وتتشارك الحكومة والمنظمات الخاصة وجامعي النفايات في عملية الجمع، وتتولى الحكومات غالباً عملية النقل وقد تشارك أيضاً المنظمات الخاصة في المعالجة النهائية. يحدث الفشل في تنفيذ مرحلة واحدة أو أكثر من المراحل الأربع المذكورة في الغالب بسبب نقص الموارد المالية والبشرية والمعدات وقلة الوعي والإهمال وعدم وجود قوانين وتشريعات ضابطة. السيناريوهات المتوقعة نتيجة لذلك هي أما وجود أكوام من النفايات المختلطة، أو تراكم النفايات في الأحياء السكنية وعلى جوانب الطرقات، أو الدفن في مدافن النفايات المفتوحة، أو كل ما سبق. المخاطر المترتبة عن ذلك الخلل هي انبعاث الغبار والروائح الكريهة وتسرب العصارة وتلوث التربة والمياه الجوفية المحيطة وتولد غازات الاحتباس الحراري وانتشار الأمراض والأوبئة بين السكان.⁽²⁴⁾

3. المراحل الأساسية لإدارة النفايات البلدية الصلبة

3-1. توليد النفايات البلدية الصلبة

النفايات البلدية الصلبة هي خليط غير متجانس من المواد غير المرغوبة الناتجة عن الأنشطة اليومية للأفراد والمجتمعات في المناطق الحضرية والتجمعات السكانية.⁽²⁵⁾ ⁽²⁶⁾ ووفقاً لبيانات البنك الدولي، يبلغ المتوسط العالمي لتوليد النفايات البلدية الصلبة للفرد الواحد 0.74 كجم/يوم، ففي عام 2016 بلغت كمية النفايات المتولدة حول العالم حوالي 2.01 مليار طن، ما يعني 5.5 مليون طن يومياً، ومن المتوقع أن يصل الرقم إلى 3.4 مليار طن في عام 2050 [26]، وتشمل النفايات البلدية الصلبة: نفايات المنازل والمحلات التجارية والمرافق والمؤسسات المختلفة، وحمأة الصرف الصحي الصلبة، ونفايات التقليل وتربية الماشية والدجاج، كما أن اللوائح الهندية تصنف مخلفات البناء والهدم، ونفايات الرعاية الصحية المعالجة ضمن النفايات البلدية الصلبة، تتكون النفايات البلدية الصلبة، على المستوى العالمي، من بقايا الطعام والمخلفات الخضراء «55-32%»، المعادن «6-2%»، الورق والكرتون «25-7%»، البلاستيك «13-6.4%»، الزجاج «5-3%»، «4-1%»، المطاط والجلود «4-0%»، وبعض المواد الأخرى «11-27%» [26].

تختلف النفايات المتولدة في الدول المتقدمة اختلافاً كبيراً عن تلك المتولدة في الدول النامية سواء من حيث الكمية أو النوعية، حيث تنتج الدول المتقدمة كميات أكبر من النفايات للفرد الواحد بمتوسط يتراوح بين «521.95»-«759.2» كجم للفرد سنوياً، مقارنة بـ «109.5»-«525.6» كجم في الدول النامية، أما من حيث النوعية، فكمية النفايات العضوية في الدول المتقدمة منخفض، وهي تنتج نسبة أعلى من المواد القابلة لإعادة التدوير، أما في الدول النامية فالعكس تماماً، أي أنها تنتج كميات أعلى من النفايات العضوية وبقايا الطعام 65% وكميات أقل من النفايات القابلة لإعادة التدوير⁽²⁷⁾، ويعكس هذا الاختلاف في نوعية النفايات التحديات الاقتصادية وتحديات البنية التحتية الكبيرة التي تواجهها الدول النامية في إدارة نفاياتها بفعالية، إذ تتطلب الأنواع المختلفة من النفايات طرق معالجة مختلفة، ولذلك، ينبغي لكل بلد ومنطقة أن يُقيّم الواقع ويكمل قاعدة بياناته الخاصة بتوليد النفايات الصلبة البلدية وتركيبها الفيزيائي، لوضع استراتيجية وطنية واقعية للإدارة السليمة للنفايات الصلبة.⁽²⁸⁾

يعد فهم أنماط توليد النفايات البلدية الصلبة وتركيبها أمراً ضرورياً لتطوير أنظمة إدارة النفايات المستدامة التي تقلل من الآثار البيئية وتعزز الصحة العامة، وتختلف أنماط توليد النفايات بشكل كبير بحسب الأوقات والمواقع المختلفة، إذ يمكن ملاحظة كميات نفايات أعلى عادة في عطلات نهاية الأسبوع والمناسبات العامة والأعياد، وخلال مواسم معينة مثل الصيف، كما تؤثر عوامل مثل التعليم والدخل والجنس على معدلات توليد النفايات وسلوكيات التخلص منها، حيث يرتبط التعليم العالي ومستويات الدخل المرتفعة بزيادة إعادة التدوير وتقليل توليد النفايات، ولتحقيق إدارة فعالة، يعد التنبؤ الدقيق بنوعية ومعدل توليد النفايات أمراً بالغ الأهمية، ولهذا تستخدم الدول المتقدمة طرق النمذجة الديناميكية للتنبؤ بالاتجاهات لأجل تصميم أنظمة إدارة نفايات فعّالة.

2-3. فرز النفايات

تعد عملية الفرز عنصراً أساسياً في الإدارة الفعالة للنفايات، ويتم فيها تصنيف النفايات إلى فئات مختلفة مثل البلاستيك والمعادن والورق والنفايات العضوية، مما يساهم في تحسين دقة العمليات اللاحقة مثل إعادة التدوير بنسبة قد تصل إلى 92%⁽²⁹⁾، كما أن هذا التصنيف يساعد في تقليل التلوث البيئي والمحافظة على الموارد الطبيعية عبر إعادة استخدام المواد القابلة لإعادة التدوير⁽³⁰⁾، وهناك عدد من الطرق قيد الممارسة لفرز وفصل النفايات مثل الفرز اليدوي وغربال الأسطوانة الدوارة والفرز الهوائي، في حين تعتمد بعض الأنظمة الحديثة على تقنيات متقدمة مثل إنترنت الأشياء والفرز الآلي، مما يعزز الدقة والكفاءة في فصل النفايات⁽³¹⁾، بالإضافة إلى المزايا البيئية، تُسهم عملية الفرز في تحقيق فوائد اقتصادية عن طريق تقليل حجم النفايات التي يتم إرسالها إلى المكبّ وخفض تكاليف التخلص منها، فضلاً عن توفير فرص لبيع المواد المُعاد تدويرها.

يؤثر فرز النفايات الصلبة البلدية بشكل كبير على تكلفة وكفاءة عمليات إدارة النفايات، يعزز الفصل من المصدر استعادة الموارد ويقلل من كميات النفايات الإجمالية [28]، ويمكن أن يؤدي إلى تحسين جودة الهواء وتقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون⁽³²⁾، وقد بدأت بعض الدول المتقدمة مثل اليابان في

إجراء عملية الفرز من المصدر قبل أكثر من 30 سنة، واليوم تمتلك تلك الدول بنية تحتية كافية لجمع النفايات المفصولة ومعالجتها كلاً على حدة⁽³³⁾، كما أن بعض تلك الدول التي تطبق هذا النظام مثل السويد وبلغاريا والصين وألمانيا وسنغافورا والولايات المتحدة تستخدم نظام الحاويات أو الأكياس الملونة لتشجيع السكان على وضع النفايات في الأماكن المخصصة لها [28]، ويتطلب فصل النفايات وجود مرافق مجهزة للتعامل مع مفصولات النفايات، لأن عدم وجودها سوف يؤدي إلى إعادة خلط النفايات من جديد عند عملية النقل وينتهي بها المطاف في مكبّ النفايات المختلط.

في الدول النامية، تعتبر عملية الفرز ضعيفة بسبب النمو السكاني الكبير والتحضر السريع وعدم كفاية البنية التحتية ونقص التمويل وانخفاض مستوى الوعي⁽³⁴⁾، ورغم ذلك، يتم ممارسة عملية الفرز كوسيلة من وسائل العيش لفئات معينة من السكان، وتتم عادة بصورة غير رسمية، مدفوعة بالعوائد المالية التي يمكن تحقيقها من بيع المواد القابلة لإعادة التدوير مثل البلاستيك والزجاج والحديد والألمنيوم والنحاس [34]، ويوفر الالتقاط النوعي للنفايات مصدر دخل للأشخاص الذين لا يمتلكون مهارات أو تعليم لتسويق أنفسهم، وليس لديهم مصدر دخل يمكنهم من البقاء على قيد الحياة، ولكن ذلك يرتبط بظروف معيشية مزرية ومخاطر صحية عالية.⁽³⁵⁾

وقد بدأ الاهتمام العالمي بدور جامعي النفايات بعد الزيادة الكبيرة في توليد النفايات البلاستيكية حول العالم، حيث تم إنشاء أول حركة لجامعي النفايات عام 2002 في البرازيل، وشارك جامعو النفايات في المؤتمر الدولي الأول لهم عام 2008 وأصبح يطلق عليهم مصطلح «جامعي النفايات Waste Picker» بدلا من مصطلح «الزبّالين Scavenger»، وكمثال على دور جامعيّ النفايات غير الرسميين في عملية الفرز، قامت الجهات الرسمية في مدينة هونغ كونغ، باعتماد نقاط تجميع تعرف باسم «Green Community» يحصل فيها المواطنين على 10 عملات رقمية «Green\$»، يمكن استبدالها بالطعام أو السلع الاستهلاكية الأخرى مقابل كل كيلوجرام يسلمونه من المواد القابلة لإعادة التدوير إلى تلك النقاط، ورغم ذلك، فقد كان جامعي النفايات غير الرسميين أكثر كفاءة من القطاع الرسمي في فرز واسترداد الورق من النفايات البلدية الصلبة، وحققوا معدل استرداد بلغ 5.7 أضعاف الكميات المستردة من قبل القطاع الرسمي، ما مكّنهم من تحقيق قيمة مضافة تبلغ حوالي 243.9 دولار/طن من الورق المسترد⁽³⁶⁾، وبحسب نفس المصدر، ترجع أسباب ضعف فعالية النظام الرسمي إلى ارتفاع تكاليف التشغيل بما في ذلك بند أجور العاملين، كما أن انخفاض قيمة العملة الرقمية تدفع السكان إلى العزوف عن تسليم المواد القابلة لإعادة التدوير إلى تلك النقاط [36].

وبالرغم من الفوائد الاجتماعية والاقتصادية والبيئية التي يوفرها جامعي النفايات، ومساهماتهم في تحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري، إلا أن دورهم في تحقيق الاستدامة لا يزال محورا للنقاش⁽³⁷⁾، حيث يؤدي النشاط غير الرسمي للفرز وإعادة التدوير والمتطلبات البيئية المتساهلة في الدول النامية إلى استقبال النفايات والمواد المستخدمة من الدول المتقدمة، طمعا في العمالة الرخيصة وتكاليف التخلص المنخفضة [37].

3-3. جمع ونقل النفايات

يعتبر جمع ونقل النفايات الصلبة من العناصر الأساسية في إدارة النفايات الصلبة البلدية، حيث يشمل جمع النفايات من مصادر متعددة مثل المنازل والمحلات التجارية والصناعية والأسواق والمؤسسات، ومن ثم نقلها إلى مواقع المعالجة أو التخلص، وتلعب هذه العملية دوراً حيوياً في الحفاظ على الصحة العامة وتحقيق الاستدامة البيئية والنظافة في المدن.⁽³⁸⁾

يتم جمع النفايات الصلبة بعدة طرق، مثل الجمع من باب لباب والجمع من مداخل الأحياء والأزقة والجمع من العقارات والممتلكات الخاصة والجمع من أماكن تكويم مخصصة والتجميع الهوائي، والتجميع الهوائي يتم تطبيقه في الدول المتقدمة، حيث يتم شفط النفايات من الحاويات عبر أنابيب تحت الأرض إلى نقاط تجميع مؤقتة أو إلى أماكن المعالجة أو التخلص النهائي⁽³⁹⁾، أما في الدول النامية، فمن الشائع رؤية أكوام النفايات على الأرصفة في الطرقات، وحتى في الجزر الخضراء في المدن الرئيسية، حتى مع وجود البراميل والحوايات المخصصة للنفايات، حيث يؤدي ضعف عملية التجميع والنقل إلى امتلائها وتكوم النفايات حولها ونبشها من قبل جامعي النفايات، والحيوانات الأليفة مثل الأغنام والقطط والكلاب الضالة.

الآليات والمركبات هي المعدات الأساسية لنقل النفايات والتي تتنوع بحسب المهمة المنوطة بها، من الصغيرة ذات الثلاث عجلات والتي تجمع النفايات من الطرقات الضيقة، إلى المركبات الثقيلة التي تنقلها إلى أماكن المعالجة أو التخلص النهائي⁽⁴⁰⁾، وتبلغ معدلات الجمع في الدول المتقدمة حوالي 100% من نسبة المخلفات في حين لا تتعدى 38% في الدول النامية والأقل نموًا [22]، وتمثل تكلفة الجمع والنقل الجزء الأكبر من التكلفة الكلية لعملية إدارة النفايات بسبب الاستخدام المكثف للأيدي العاملة والآليات⁽⁴¹⁾، حيث يتم إنفاق «50-75%» في البلدان المتقدمة من إجمالي نفقات إدارة النفايات على عملية الجمع والنقل، في حين تصل هذه النسبة إلى «70-90%» في الدول النامية مثل الهند [41]، ويمكن تقليل تلك التكلفة عن طريق زيادة كفاءة آليات النقل وتحسين المسار الذي يعمل على تقليل المسافة الإجمالية المقطوعة.⁽⁴²⁾

بالإضافة إلى الخدمات اللوجستية وفعالية التكلفة، من الأهمية بمكان النظر في التداعيات البيئية والاجتماعية لجمع ونقل النفايات، مما يستلزم تطوير أنظمة صديقة للبيئة ومسؤولة اجتماعياً للنمو الحضري المستدام، وعلاوة على ذلك، يمكن أن يؤدي دمج التقنيات والممارسات المبتكرة إلى تحسين أنظمة نقل النفايات الصلبة، ويسهم في بيئة حضرية أنظف وأكثر صحة.

4-3. التخلص من النفايات البلدية الصلبة

التخلص من النفايات هي المرحلة الأخيرة في عملية إدارة النفايات. على الرغم من وجود العديد من الطرق للتخلص من النفايات، فإن الدفن في مكبات النفايات لا يزال الطريقة الأكثر شيوعاً على مستوى العالم، وبالأخص في الدول النامية والأقل نموًا، ويرجع ذلك إلى قدرتها الاستيعابية الكبيرة، وتكلفتها

المنخفضة، وسهولة تنفيذها مقارنةً بطرق التخلص الأخرى.⁽⁴³⁾

يمكن تصنيف مكبات النفايات إلى نوعين رئيسيين، الأول: المكب الهندسي أو الصحي، وهو المكب المصمم لتقليل الآثار البيئية لدفن النفايات إلى أدنى المستويات، ابتداءً بالاختيار الصحيح للموقع، وتجهيزه بوسائل الحماية اللازمة مثل الطبقات العازلة في الأسفل لمنع تسرب العصارة إلى المياه الجوفية والتربة المحيطة، ونظام جمع العصارة ومعالجتها، وجمع الغازات المتولدة، وضغط وتغطية النفايات الواردة إلى المكب نهاية كل يوم بطبقة ترابية لمنع الروائح الكريهة وعزل النفايات عن الظروف الجوية الخارجية، ووجود ضوابط تمنع استقبال أي نوع من أنواع النفايات الخطرة⁽⁴⁴⁾، والنوع الثاني من المكبات هو المكب المكشوف غير المراقب أو المكب العشوائي الذي يفتقر إلى وجود وسائل الحماية الأزمنة، والذي يستقبل النفايات المختلطة وحتى الخطرة مثل نفايات العناية الصحية غير المعالجة والمبيدات والأسمدة الكيميائية التالفة والنفايات الصناعية وغيرها.⁽⁴⁵⁾

يؤدي التخلص من النفايات في مكبات النفايات وخصوصاً المكبات المكشوفة إلى ثلاث قضايا رئيسية هي: تلوث مصادر المياه والتربة المحيطة؛ المساهمة في الاحتباس الحراري؛ وانبعاث الروائح الكريهة والغبار المحمل بالملوثات⁽⁴⁶⁾، ويحدث التلوث لمصادر المياه وخصوصاً المياه الجوفية القريبة من موقع مكب النفايات بسبب تشكل العصارة نتيجة لتحلل المواد العضوية المدفونة ومياه الغسيل بمياه الأمطار، ثم تتغلغل هذه العصارة المحملة بالملوثات العضوية والمعدنية والعناصر الثقيلة والميكروبات في طبقات التربة حتى تصل إلى المياه الجوفية أو مصادر المياه الأخرى القريبة، وقد أظهرت عديد من الدراسات في دول مختلفة مستويات متفاوتة للتلوث في المياه الجوفية القريبة من مكبات النفايات ما جعلها في بعض المواقع غير صالحة للاستخدام الآدمي^{(47) (48) (49) (50) (51) (52)}.

إضافةً إلى ذلك، تُعدّ مكبات النفايات من أكبر العوامل المساهمة في زيادة ظاهرة الاحتباس الحراري عن طريق توليد كميات كبيرة من ثاني أكسيد الكربون والميثان وبعض الغازات العضوية الأخرى غير الميثان. ففي الولايات المتحدة الأمريكية، مثلاً، تُعدّ مكبات النفايات الصلبة البلدية ثالث أكبر مصدر بشري لانبعاثات غاز الميثان، وفقاً لتقرير الفريق الحكومي الدولي المعني بتغير المناخ. ووفقاً للمصدر نفسه، تبلغ فعالية غاز الميثان في حبس الحرارة في الغلاف الجوي على مدى 100 عام أكثر بـ 28 مرة من فعالية غاز ثاني أكسيد الكربون⁽⁵³⁾، إضافةً إلى ذلك، تنبعث الروائح الكريهة والغبار المحمل بالملوثات من مكبات النفايات المكشوفة، مما يؤدي إلى مشاكل صحية خطيرة، مثل أمراض الجهاز التنفسي والربو للعاملين في المكبات والمقيمين في المناطق القريبة منها، إضافةً إلى مشاكل اقتصادية تتمثل في تدهور قطاع السياحة وانخفاض أسعار العقارات المجاورة لمكبات النفايات.

4. إدارة النفايات الصلبة بناء على مبادئ الاقتصاد الدائري

تتمثل الرؤية الجوهرية للاقتصاد الدائري في الحد من توليد النفايات واستعادة الموارد منها وإبقائها في الخدمة لأطول فترة ممكنة [23]، ويساهم هذا النهج في تقليل الضغط على مصادر المواد الأولية التقليدية وإغلاق دائرة الإنتاج، ويمكن استعادة الموارد من تيار النفايات البلدية الصلبة في عدة أشكال، أهمها الطاقة والأسمدة والمعادن الثمينة، وهناك العديد من التقنيات المطبقة حالياً لإنتاج الطاقة من النفايات البلدية الصلبة بما في ذلك التقنيات الكيمائية الحرارية مثل التحلل الحراري والحرق والتقنيات البيولوجية مثل الهضم اللاهوائي وتقنية جمع غازات المكب، كما يستخدم التسميد الهوائي لإنتاج الأسمدة العضوية الصلبة.

من أجل تطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري في إدارة النفايات البلدية الصلبة يجب أولاً فصل النفايات في المصدر، وثانياً معالجتها وتنظيفها وتحويلها إلى مواد قابلة لإعادة التدوير أو الاستخدام، وثالثاً تحويلها إلى طاقة أو إلى أسمدة عضوية، ورابعاً خلق أسواق للمنتجات المعاد تدويرها والطاقة والأسمدة المنتجة من النفايات.

لا يؤدي تبني مبادئ الاقتصاد الدائري في إدارة النفايات البلدية الصلبة إلى حل المشكلات البيئية والصحية والاجتماعية المترتبة عليها فقط، بل يجعل من تلك النفايات فرصة لخلق فرص عمل جديدة وتوفير مصادر متجددة للطاقة والمواد الثانوية اللازمة للإنتاج وتحقيق نمو اقتصادي مستدام [23]، ففي 2022 بلغ حجم سوق النفايات العالمي 1.3 تريليون دولار أمريكي، ومن المتوقع أن يحقق هذا السوق نمو سنوي مركب بمعدل 5.4% ليصل إلى 1.96 تريليون دولار أمريكي في 2030.⁽⁵⁴⁾

1-4. الحد من توليد النفايات

يشكل تقليل النفايات ومنع توليدها أساساً مهماً في إدارة النفايات الصلبة البلدية، حيث يركز على الحد من إنتاج النفايات من المصدر، ويمكن الحد من توليد النفايات من المصدر من خلال التركيز على أساليب الاستهلاك والإنتاج المستدامة، بما في ذلك حظر المواد والمنتجات غير الضرورية التي يتولد عنها كميات كبيرة من النفايات، وإخضاع المنتجات المختلفة للرقابة طبقاً لمعايير جودة عالية، وتفعيل آلية المسؤولية الممتدة على المنتجات والتي تلزم المنتجين بالتخلص من نفايات منتجاتهم بعد انتهاء عمرها الافتراضي، وفرض ضرائب على التخلص من النفايات في المكب [35]، حيث يمكن تخفيض كمية النفايات المنتجة في مدينة طهران مثلاً بنسبة 60% عبر تنفيذ استراتيجيات الحد من توليد النفايات من المصدر لمواد مختلفة، مثل مواد التعبئة والتغليف والورق ونفايات التغليف والنفايات المنزلية المختلطة والنفايات المنزلية الخطيرة والنفايات الصناعية.⁽⁵⁵⁾

وتساهم هذه الاستراتيجية في تقليل التدهور البيئي والحفاظ على الموارد الطبيعية وتخفيف الضغط على أنظمة إدارة النفايات، مما يؤدي إلى بيئات حضرية أكثر استدامة، ويتمثل أحد أبرز الفوائد البيئية لهذه الاستراتيجية في تقليل كميات النفايات التي تصل إلى مكب النفايات، وبالتالي الحد من انبعاث

غازات الاحتباس الحراري وتقليل تكوين العسارة التي تضر بالنظام البيئي وتزيد من آثار تغير المناخ، أما من الناحية الاقتصادية، فتقلل البلديات والشركات والأسر من تكاليف إدارة النفايات، بما في ذلك الجمع والنقل والتخلص، كما يتم الحفاظ على الموارد الطبيعية من خلال تقليل الطلب على المواد الخام عبر إعادة التدوير وإعادة الاستخدام، كما أن التوعية العامة والتعليم تعتبر عناصر حاسمة في تشجيع الممارسات المسؤولة بين السكان لزيادة فعالية منع النفايات وإعادة التدوير.

2-4. استعادة الموارد من النفايات البلدية الصلبة

تلعب عملية استعادة الموارد من النفايات البلدية الصلبة دورًا محوريًا في تحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري والاستدامة البيئية، وتنطوي على العديد من الفوائد البيئية والاقتصادية والاجتماعية، من الناحية البيئية، تساهم عملية استعادة الموارد من النفايات في تقليل انبعاث الغازات المسببة للاحتباس الحراري وحماية الموارد الطبيعية وتحسين جودة الهواء والماء، ومن الناحية الاقتصادية يعمل قطاع استعادة الموارد من النفايات على خلق فرص عمل جديدة وتعزيز الأمن الغذائي وتوفير الطاقة ويحفز على الابتكار والتطوير ويقلل من تكاليف إدارة النفايات، كما تتمثل الفوائد الاجتماعية في تحسين الصحة العامة ورفع مستوى الوعي البيئي وتعزيز المسؤولية والمشاركة المجتمعية في برامج الفرز وإعادة التدوير وتحسين المشهد الحضري العام، كما تساهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة خاصة الهدف 6 «توفير المياه والصرف الصحي للجميع وإدارتها إدارة مستدامة» والهدف 8 «تعزيز النمو الاقتصادي المستدام وتوفير العمل اللائق للجميع» والهدف 11 «مدن ومجتمعات محلية مستدامة» والهدف 12 «ضمان وجود أنماط استهلاك وإنتاج مستدامة».⁽⁵⁶⁾

على ضوء هذه الأهمية المتعددة الأبعاد، يتحتم على صُنّاع القرار وراسمي السياسات تبني استراتيجيات شاملة لاستعادة الموارد من النفايات البلدية الصلبة، ويتطلب ذلك الاستثمار في البنية التحتية والمجالات التكنولوجية، وتفعيل وتطوير القوانين والتشريعات الداعمة، وتعزيز الشراكة بين مختلف القطاعات الرسمية والخاصة، وتنفيذ برامج توعية مكثفة، ودمج مفاهيم استعادة الموارد في المناهج التعليمية.

3-4. نظرة عامة على طرق استعادة الموارد من النفايات البلدية الصلبة

تتنوع طرق استعادة الموارد من النفايات لتشمل مجموعة واسعة من التقنيات، كل تقنية تستهدف نوع محدد من النفايات كمدخلات وتحقق مخرجات محددة منها، وتعد طريقة إعادة التدوير واستعادة الطاقة واستعادة المغذيات من أكثر الطرق شيوعاً على مستوى العالم، وفي تلك العملية يتم فرز النفايات البلدية الصلبة وفصل النفايات القابلة لإعادة التدوير مثل الورق والبلاستيك والزجاج والمعادن، ومعالجتها لإنتاج مواد ثانوية يمكن استخدامها لإنتاج مواد جديدة، أما طرق استعادة الطاقة فتتضمن الحرق والتحلل الحراري والهضم اللاهوائي وجمع غازات المكب، تحويل النفايات ذات القيمة الحرارية العالية إلى طاقة وإنتاج الكهرباء والحرارة، مما يقلل من الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.

كما يمكن استعادة المغذيات وإنتاج الأسمدة العضوية من الجزء العضوي من النفايات البلدية الصلبة عبر التحلل الهوائي. بالإضافة إلى ذلك، تتم عملية استعادة الموارد من النفايات من خلال إعادة استخدام ما يمكن استخدامه إما في نفس الغرض أو في أغراض أخرى جديدة مثل نفايات الأثاث ومواد البناء والأجهزة الإلكترونية... الخ، ويمكن أيضاً استعادة المواد والمعادن الثمينة مثل الحديد والنحاس والذهب والفضة والبلاتين، من النفايات الإلكترونية والكهربائية.

وتعتبر عملية اختيار الطريقة الملائمة لتخلص من النفايات البلدية الصلبة عملية معقدة للغاية، وتتداخل فيها العديد من الاعتبارات بما في ذلك الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، حيث تعتمد عملية الاختيار تلك على مجموعة من المعايير الأساسية التي تضمن فعالية وكفاءة العملية، تشمل:

- كمية وتركيب النفايات الصلبة البلدية، حيث يجب مراعاة نسب المكونات المختلفة للنفايات وكمياتها لتحديد الطريقة الأكثر ملاءمة.
- الجدوى الاقتصادية، إذ يجب أن تكون تكاليف التنفيذ والتشغيل متناسبة مع العوائد المتوقعة.
- التأثير البيئي، حيث ينبغي أن تساهم الطريقة المختارة في تقليل الآثار البيئية السلبية.
- المجتمع، حيث يعتبر القبول المجتمعي والتوافق مع الثقافة المحلية عامل حاسم لضمان نجاح التنفيذ.
- الإمكانيات، حيث تعد القدرات التقنية والبنية التحتية والموارد المالية المتاحة من العوامل الحاسمة في تحديد إمكانية تطبيق طريقة واحدة أو أكثر بنجاح في سياق منطقة أو مدينة معينة.

تختلف المعايير الأساسية لاختيار الطريقة المثلى للتخلص من النفايات من بلد إلى آخر بناءً على الوضع الاقتصادي والتكنولوجي، ومستوى التعليم والوعي البيئي والصحي لكل بلد، ففي الدول الغنية، تعطى الأولوية للمعايير البيئية مثل الحد من تلوث المياه والتربة والهواء، والصحة مثل السلامة المهنية للعاملين والصحة العامة للمجتمع، وفي المقابل، تكون تكلفة الاستثمار هي المعيار الأساسي لاختيار أنسب طريقة للتخلص من النفايات في الدول الفقيرة، ففي دراسة حديثة أجريت في الكويت وشملت 18 معياراً من معايير التخلص من النفايات، تم التركيز بشكل أساسي على صحة وسلامة العاملين والحد من تلوث المياه والهواء كمعايير أساسية، بينما كانت التكلفة الاستثمارية والجدوى الاقتصادية أقل أهمية في اختيار طريقة التخلص من النفايات، ما يعكس الوعي المتنامي والمرونة المالية التي تسمح بإعطاء المعايير البيئية والصحية الأولوية على التكلفة⁽⁵⁷⁾، وفي دراسة أخرى أجريت في بنغلادش وشملت 21 معياراً، كانت كفاءة طريقة المعالجة والتكاليف الاستثمارية والوصول إلى التكنولوجيا هي المعايير الأكثر تأثيراً على عملية اختيار التقنية المناسبة للتخلص من النفايات، ما يعكس القيود الاقتصادية والتقنية التي تعاني منها دولة بنغلادش بشكل خاص والدول النامية التي تعيش نفس الظروف تقريباً⁽⁵⁸⁾، وهو ما يعني أنه يجب أن تعتمد كل دولة طريقة اختيار التقنية الملائمة للتخلص من النفايات بناءً على دراسات حديثة وواقعية تراعي الجوانب الاقتصادية والبيئية والتقنية والاجتماعية الفريدة لكل بلد، مع التأكيد على أنه لا توجد طريقة واحدة تلائم الجميع.

5. إدارة النفايات الصلبة في اليمن

اليمن هي واحدة من أفقر الدول في الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، فوفقاً لتقديرات البنك الدولي لنصيب الفرد من إجمالي الدخل القومي لعام 2015، كانت تصنف ضمن الشريحة الدنيا من الاقتصاديات المتوسطة الدخل، حيث يتراوح نصيب الفرد فيها من إجمالي الدخل القومي بين 1,026 و4,035 دولار أمريكي، أو 1,120 دولار كمتوسط، كما انخفض تصنيف الجمهورية اليمنية في 2023 لتصبح ضمن الشريحة المنخفضة الدخل التي يكون فيها نصيب الفرد من إجمالي الدخل القومي أقل من 1,026 دولار، و820 دولار كمتوسط.⁽⁵⁹⁾

ويعد العثور على معلومات دقيقة وحديثة عن الوضع الحالي لإدارة النفايات في اليمن مسألة صعبة للغاية بسبب ندرة البيانات والدراسات في هذا الجانب، فخلال الفترة «1990-2022» كان هناك 13 مستند فقط يتناول قضية إدارة النفايات البلدية الصلبة في اليمن ما بين مقالة علمية وتقرير وفصل في كتاب⁽⁶⁰⁾، ومع ذلك، تشير الدراسات القليلة المتاحة إلى وجود مشكلة كبيرة في إدارة النفايات، وهي تتفاقم بسبب الظروف الاقتصادية والسياسية التي تمر بها البلاد، وقد اعتمدت معظم الدراسات التي تناولت موضوع إدارة النفايات البلدية الصلبة في اليمن على البيانات والإحصائيات التي قدمها Al-Mahdi and Al-Eryani كتقرير قطري بشأن إدارة النفايات الصلبة في اليمن للعام 2014⁽⁶¹⁾، ويرد في الجدول «1» ملخص للإحصائيات والبيانات المتعلقة بحالة إدارة النفايات البلدية الصلبة في اليمن حسب التسلسل الزمني من الأقدم إلى الأحدث، والتي تعود معظمها إلى الفترة بين 2008 و2014.

العاملان الرئيسيان المؤثران على توليد النفايات الصلبة البلدية هما عدد السكان والتحضر، ففي حين يكون نوع النفايات المتولدة مدفوعاً بالحالة الاقتصادية والثقافية ومستوى الوعي لدى الأفراد، يمثل التحديد الكمي والنوعي الدقيق حجر الزاوية في تحقيق الإدارة الفعالة للنفايات البلدية الصلبة، ورغم أنه لم يتم إجراء تعداد سكاني يشمل جميع محافظات الجمهورية منذ 2004 إلا أن التقديرات تشير إلى أن عدد السكان وصل في 2024 إلى حوالي 34,164,028 إنسان، يقطن أكثر من 70% منهم في المناطق الحضرية، ويعتبر معدل توليد النفايات الصلبة في اليمن من أدنى المعدلات في المنطقة [26]، فبحسب «Mahdi & Al-Eryani» - 2014 - يبلغ معدل توليد النفايات في اليمن «0.6» و«0.35» كجم/فرد/يوم، في المناطق الحضرية والريفية على التوالي، مع معدل نمو سنوي يبلغ 3% [61]، وبحسب المصدر نفسه، كان عدد سكان اليمن في 2012 حوالي 24.5 مليون إنسان، وكمية النفايات البلدية الصلبة المتولدة في نفس العام 3.8 مليون طن [61]، وفي 2016 كان عدد السكان وكمية النفايات المتولدة 27.5 مليون إنسان و4.84 مليون طن على التوالي [26]. وبعملية حسابية بسيطة يتضح أن معدل النمو السنوي في توليد النفايات في اليمن بين 2012 و2016 كان 6.23%، أي ضعف معدل النمو السنوي المبلغ عنه 3%، والذي يمثل معدل الزيادة السنوية في عدد السكان خلال نفس الفترة أيضاً، وبناء على معدل الزيادة السنوية المبلغ عنه 3% والمحسوب 6.23% فإن كمية النفايات

البلدية الصلبة المتوقع توليدها خلال العام 2024 ستكون حوالي «5.99» و«7.85» مليون طن/عام على التوالي، وشكل «1» يشير إلى ذلك، ذلك مع مراعاة أن البيانات المحدودة المتوفرة غير دقيقة وقديمة وهناك غياب تام للبيانات المتعلقة بالتغيرات الموسمية في توليد النفايات، ومن المحتمل أن تؤدي حالة عدم اليقين تلك إلى إعاقاة الجهود المستقبلية في وضع الخطط والاستراتيجيات الملائمة للإدارة المستدامة للنفايات البلدية الصلبة في البلاد.

جدول «1»

الإحصائيات المتوفرة المتعلقة بإدارة النفايات البلدية الصلبة في اليمن

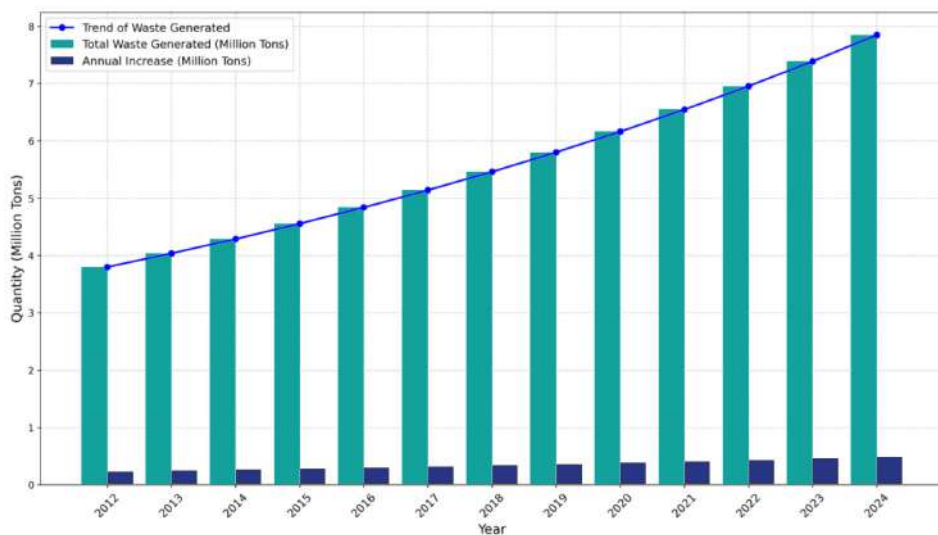
المرجع	العام	الكمية	البند
[62]	2000	36,000 طن/عام	النفايات الخطرة
[63]	2008	16.5 دولار أمريكي/طن	تكلفة الجمع والتخلص من النفايات في المدن
[63]	2008	8.3 دولار أمريكي/طن	تكلفة الجمع والتخلص من النفايات في المناطق الريفية
[63]	2008	27	عدد مدافن النفايات المكشوفة
[63]	2008	21	عدد المكبات الخاضعة للمراقبة
[61]	2010	3,193 طن/عام	كمية النفايات الطبية المتولدة
[61]	2010	20,917 طن/عام	كمية النفايات الخطرة المتولدة
[63]	2012-2008	0.5-3 كجم/سرير/يوم	معدل توليد النفايات الطبية لكل سرير
[63]	2012-2008	22%	نسبة النفايات الخطرة في النفايات الطبية
[61]	2012	24.5 مليون إنسان	عدد السكان
[61]	2012	3.8 مليون طن/عام	كمية النفايات الصلبة المتولدة
[63]	2012	10,000 طن/عام	كمية نفايات الإطارات المتولدة في اليمن
[63]	2012	20,917 طن/عام	النفايات الخطرة
[63]	2012	3,916 طن/عام	النفايات الطبية

المرجع	العام	الكمية	البند
[63]	2012	16,826 سرير	عدد الأسرة في المستشفيات الحكومية
[61]	2014	50,000 طن/عام	النفايات البلاستيكية
[61]	2014	0.6 كجم/فرد/يوم	معدل توليد النفايات في المناطق الحضرية
[61]	2014	0.35 كجم/فرد/يوم	معدل توليد النفايات في المناطق الريفية
[61] [64]	-2014 2015	3%	معدل الزيادة السنوية في توليد النفايات
[61] [64]	-2014 2015	65%	معدلات الجمع في المناطق الحضرية
[61] [64]	-2014 2015	5%	معدلات الجمع في المناطق الريفية
[61]	2014	6.7%	نسبة إعادة التدوير
[61]	2014	26%	التخلص في مكبات النفايات
[61]	2014	68%	التخلص في المدافن المكشوفة
[61]	2014	21	عدد مواقع التخلص
[61]	2014	6	عدد المكبات الخاضعة للمراقبة
[61]	2014	65%	نسبة المادة العضوية في النفايات
[61]	2014	7%	نسبة الأوراق والكرتون في النفايات
[61]	2014	6%	نسبة المعادن في النفايات
[61]	2014	10%	نسبة البلاستيك في النفايات
[61]	2014	1%	نسبة الزجاج في النفايات
[61]	2014	11%	نسبة المواد الأخرى في النفايات
[26]	2016	27.584 مليون إنسان	عدد السكان
[26]	2016	4.84 مليون طن	كمية النفايات الصلبة المتولدة

المرجع	العام	الكمية	البند
[26]	2016	0.48 كجم/فرد/يوم	معدل توليد النفايات
[26]	2016	25	عدد مدافن النفايات المكشوفة
[26]	2016	12	عدد مكبات النفايات الخاضعة للمراقبة
(65)	2022	49,000 طن/عام	كمية النفايات الإلكترونية
[65]	2022	1.5 كجم/فرد/عام	معدل توليد النفايات الإلكترونية في اليمن

شكل «1»

كمية النفايات الصلبة البلدية المتولدة في الجمهورية اليمنية خلال الفترة «2012-2024»



بناء على معدل الزيادة السنوية المحتسب بـ «6.23 كجم/فرد/يوم»، تتكون النفايات البلدية الصلبة المتولدة في اليمن من النفايات العضوية «65%»، البلاستيكية «10%»، الأوراق والكرتون «7%»، المعادن «6%»، الزجاج «1%» والمواد الأخرى «11%» [61]، وإضافة إلى ذلك، يتم التخلص من النفايات الطبية ونفايات العناية الصحية ونفايات البناء والهدم والمبيدات المنتهية والنفايات الإلكترونية وغيرها من النفايات الخطرة بصورة مختلطة مع النفايات البلدية الصلبة دون أي معالجة مسبقة [64].

والطريقة الشائعة للتخلص من النفايات في اليمن هي الدفن في مكبات النفايات سيئة الإدارة، وكان يبلغ عدد مواقع التخلص الرسمية في 2008، 48 موقعًا، 27 منها مدافن مكشوفة، و21 موقعًا مكبات

خاضعة للرقابة [63]، وقد انخفض عدد مواقع التخلص في اليمن بنسبة 43.75% في 2014 [61]، ثم بنسبة 23% في 2016 [26]، ويُعزى السبب الرئيسي لهذا الانخفاض إلى تراجع عمليات الجمع والتخلص الرسمية لصالح الإلقاء العشوائي في المدافن غير الرسمية والمساحات الفارغة المكشوفة، حيث كانت معدلات الجمع الرسمية تبلغ 65% في المناطق الحضرية و5% في المناطق الريفية، تذهب 26% منها إلى مكبات النفايات الخاضعة للمراقبة، و68% يتم التخلص منها في المدافن المكشوفة، بينما تذهب 6.7% منها فقط لإعادة التدوير [61].

1-5. الوضع الحالي لإدارة النفايات البلدية الصلبة في مدينة صنعاء

مدينة صنعاء هي العاصمة الإدارية والسياسية للجمهورية اليمنية، وأكبر مدنها من حيث الاكتظاظ السكاني، وبحسب آخر تعداد سكاني للجمهورية اليمنية في 2004 كان عدد سكان مدينة صنعاء 1.7 مليون إنسان، وقد تضاعف العدد منذ ذلك العام ليصل حسب تقديرات مكتب الأمم المتحدة لتنسيق الشؤون الإنسانية «OCHA» إلى حوالي 3.8 مليون إنسان، بمعدل نمو سنوي يقدر بـ 3.5%⁽⁶⁶⁾، ولقد ساهمت الحرب التي بدأت في 2015 في زيادة عدد سكان المدينة بشكل كبير، حيث مثلت المدينة ملاذًا آمنًا لآلاف الأسر الفارّة من ولايات الحرب من مختلف المحافظات اليمنية، وقد أدت هذه الكثافة السكانية العالية والتوسع الحضري الكبير في المدينة إلى تضاعف الضغوط على السلطات المحلية ونظام إدارة النفايات البلدية الصلبة في المدينة، الضعيف أصلاً، حيث ذكر Zabara & Ahmad - 2022 - أن حركة النزوح الداخلية جعلت توليد النفايات الصلبة البلدية في مدينة صنعاء أكبر بثلاث مرات مما تم توليده في مدينة عدن وأربعة أضعاف الكمية التي تم توليدها في المكلا [63].

لطالما كانت إدارة النفايات وخصوصاً أنشطة الجمع في مدينة صنعاء غير كافية حتى قبل اندلاع الأزمة في 2015، لكنها تفاقمت بعد الأزمة بسبب نقص الوقود وتضرر آليات ومعدات النقل وتأخر صرف رواتب العاملين في قطاع النظافة، ويرد في الجدول «2» البيانات والإحصائيات المتعلقة بإدارة النفايات الصلبة في مدينة صنعاء، ونظرياً، وبناءً على عدد سكان صنعاء الحالي «3.8» مليون إنسان، ومتوسط معدل توليد النفايات في المناطق الحضرية «0.6» كجم/فرد/يوم المبلغ عنه في الدراسات السابقة، فإن كمية النفايات المتولدة في مدينة صنعاء تبلغ حوالي 2280 طن/يوم، ويقوم مولدو النفايات بتسليم نفاياتهم المختلطة إما إلى عمال النظافة يدًا بيد أو بوضعها معبأة في أكياس بلاستيكية أو سائبة، في الحاويات المخصصة المنتشرة في أحياء وشوارع المدينة، وفي كثير من الأحيان، تُلقى النفايات على الأرض في أماكن فارغة ومكشوفة، وبحسب Kaza وآخرون «2018» كانت عمليات الجمع في 2016 تغطي 95% من مدينة صنعاء [26]، لكن هذه النسبة غير دقيقة ولا تستند إلى دراسات ميدانية، فيما تشير التقديرات إلى أن النسبة الأقرب للواقع هي 65% [64].

ويتم جمع النفايات بصورة دورية كل يوم في الأحياء الرئيسية بينما تظل النفايات في الأحياء الشعبية متكدسة لفترة أطول قد تصل إلى عدة أيام، مما يوفر بيئة خصبة لتكاثر الفئران والحشرات، ويسهم في انتشار الأمراض بين السكان، ويوجد في مدينة صنعاء محطة نقل واحدة بمنطقة فح عطان تستقبل

النفايات المجموعة من الأحياء القريبة استعداد لنقلها إلى موقع التخلص النهائي، وما بين توليد النفايات وجمعها ينشط جامعو النفايات غير الرسميين الذين يقومون بنش النفايات والتقاط الأنواع القابلة لإعادة التدوير مثل المعادن والبلاستيك وغيرها من المواد من الطرقات والحاويات المنتشرة في الأحياء ومواقع التخلص المختلفة من المدينة، وحاليًا بدأت مجموعة من جامعي النفايات، الذين يمكن تسميتهم بـ «جامعي النفايات المقيمين»، بالاستيطان مع أسرهم بجوار حاويات النفايات «انظر الشكل 2».

شكل «2»

جامعو النفايات المقيمون جوار حاويات النفايات في بعض أحياء مدينة صنعاء



يقوم جامعو النفايات المقيمون بنصب خيمة جوار حاويات النفايات، ويقومون بفرز النفايات التي يلقونها السكان أولاً بأول ويستخرجون المواد القابلة لإعادة التدوير بالإضافة إلى نفايات الخبز التي يجففونها ويبيعونها لمربي الأغنام، ورغم أن هذه العملية تؤدي إلى تقليل حجم النفايات بشكل كبير، وتؤمن لجامعي النفايات مصدر دخل يُبقيهم على قيد الحياة، إلا أنها مرتبطة بظروف معيشية صعبة

للغاية وتنطوي على مخاطر صحية عالية. لكن هؤلاء يُعدّون المحرك الأساسي لعمليات إعادة التدوير، والتي لا تتجاوز 8% من النفايات المتولدة في مدينة صنعاء [26]، أما الباقي فيُدفن في مكبّ نفايات الأزرقين، وهي الطريقة الوحيدة للتخلص من النفايات في مدينة صنعاء، وتشمل النفايات البلدية الصلبة والنفايات الأخرى الخطرة سواء النفايات الطبية ونفايات البناء والهدم، والنفايات الإلكترونية ونفايات الأسمدة والمبيدات التالفة والنفايات الصناعية وإطارات السيارات وجثث الحيوانات النافقة. يقع مكب الأزرقين شمال مدينة صنعاء على بُعد 15 كم من مركز المدينة في منطقة الأزرقين، مديرية بني الحارث، وهي منطقة زراعية منتجة للعديد من المحاصيل. لم يتم اختيار موقع المكب على أسس علمية ولم يتم إجراء تقييم الأثر البيئي قبل اختيار موقع المكب [47]، وكان المكب الذي أنشئ في عام 1980 [63] بعيداً نسبياً عن المدينة، ولكن بسبب النمو الحضري الكبير أصبح اليوم قريباً جداً من الأحياء السكنية ويسبب مشاكل بيئية وصحية جمة.

يستقبل مكب الأزرقين النفايات «1500 طن/يوم» من ثلاث محافظات: أمانة العاصمة، ومحافظة صنعاء ومحافظة عمران، وكان مكب الأزرقين في عام 2000 قد تجاوز سعته الاستيعابية وأصبح ارتفاع النفايات يتراوح بين 5 و10 أمتار فوق المستوى التصميمي للمكب [62]، أما اليوم فتشكل النفايات المتراكمة في مكب الأزرقين جبلاً على مساحة 44 هكتار تقريباً وبارتفاع يصل إلى أكثر من 59 متر، ويوضح الشكل «3» النفايات المتكدسة في المكب حسب صور Google Earth الملتقطة بتاريخ 2023/5/30، أما السمات الرئيسية المميزة للمكب فهي السياج شبة المدمر والبنية التحتية السيئة والآليات التالفة، ووجود عدد كبير من جامعي النفايات من أطفال ونساء ورجال في الموقع، والحرائق المفتوحة المتكررة، وعدم وجود أي وسيلة للحماية من العاصرة الراشحة من النفايات [64]، وهي نفس المشاكل التي كان يعاني منها مكب الأزرقين عام 2000 [62].

وخلال شهر يوليو 2015، أجرى برنامج الأمم المتحدة الإنمائي بالتعاون مع فريق «Disaster Waste Recovery» تقييماً طارئاً للنفايات في 6 محافظات يمنية لبحث تأثير الأزمة الحالية على منظومة إدارة النفايات وتحديد نقاط الولوج المحتملة للتدخل الفوري، وإضافة إلى محافظة صنعاء، شمل التقييم محافظات عدن وعمران وحضرموت وحجة وصعدة، وأشار التقرير إلى أن جميع المحافظات المشمولة في الدراسة قد تأثرت بشدة بسبب الأزمة الحالية، من حيث انخفاض عدد العاملين وعدم القدرة على دفع الرواتب، ونقص الآليات والمركبات، ونقص الوقود وعدم توفر قطع الغيار، ونقص الأيدي العاملة الماهرة اللازمة لصيانة المعدات والآليات المعطلة، وبحسب المصدر نفسه، أدى ذلك إلى تفاقم الوضع الحالي لإدارة النفايات في اليمن؛ حيث انخفضت معدلات جمع النفايات وزادت نسبة النفايات غير المدارة، ما نتج عنه تراكم النفايات في المدن والأحياء وتفشي الأمراض [64].

شكل «3»
صوره ثلاثية الأبعاد لمكب الأزرقين



ويعاني قطاع إعادة التدوير في صنعاء من تراجع كبير بسبب القيود على الاستيراد والتصدير، مما أثار على توفر المواد الخام المعاد تدويرها للاستخدام الصناعي، وقدر التقرير أن كلفة المشاريع المقترحة تصل إلى حوالي 10.4 مليون دولار أمريكي، موزعة بين توفير فرص عمل ودعم الرواتب وإعادة تأهيل المركبات وتحسين مواقع التخلص وإعادة تنشيط قطاع إعادة التدوير [64]، وأشار التقرير إلى أن الصراع الحالي أثار بشكل كبير على إدارة النفايات في مدينة صنعاء، فبينما كان يتوافر أسطول يتألف من 454 مركبة، هناك اليوم 94 مركبة مدمرة لا يمكن إصلاحها، و52 مركبة معطلة لكنها قابلة للإصلاح، مع نقص كبير في المعدات الثقيلة مثل الجرافات وغيرها، مما يؤثر سلباً على كفاءة عمليات الجمع، ويجعل من الصعب ضغط وتدرج وتغطية النفايات في المكب، كما يؤدي نقص الآليات الثقيلة إلى سلسلة من المشاكل، فبدونها لن يكون من الممكن ضغط النفايات وتغطيتها وتدرجها بشكل مناسب، ما يؤدي إلى زيادة معدلات إنتاج العصارة خلال موسم الأمطار، وحدوث الانهيارات والتشققات الأرضية، وزيادة انبعاث غاز الميثان من المكب [64].

جدول «2»

الإحصائيات والبيانات المتعلقة بإدارة النفايات البلدية الصلبة في مدينة صنعاء

المرجع	العام	تفاصيل	الكمية	البند
[64]	2015	ما بين آليات صغيرة ومتوسطة وثقيلة	454 مركبة	حجم أسطول آليات إدارة النفايات في مدينة صنعاء
[64]	2015	لا يمكن إصلاحها	94	الآليات المدمرة
[64]	2015	يمكن إصلاحها	52	الآليات المعطلة

المرجع	العام	تفاصيل	الكمية	البند
[64]	2015		5	الآليات المسروقة
[64]	2015	تشمل النفايات الخطرة وغير الخطرة	1,500 طن/يوم	حجم النفايات التي يستقبلها مكب الأزرقين
[64]	2015		0.65-0.55 كجم/فرد/يوم	معدل توليد النفايات في المناطق الحضرية
[64]	2015		0.4-0.3 كجم/فرد/يوم	معدل توليد النفايات في المناطق الريفية
[26]	2016		95%	معدلات الجمع في مدينة صنعاء
[26]	2016		8%	نسبة إعادة التدوير في مدينة صنعاء
[26]	2016	محطة التجميع المؤقت في منطقة عصر	1	عدد محطات النقل في مدينة صنعاء
[26]	2016		5	عدد محطات النقل التي تحتاجها مدينة صنعاء
[63]	2017	تشمل جميع أنواع النفايات الخطرة وغير الخطرة	421.5 ألف طن/عام	حجم النفايات التي يستقبلها مكب الأزرقين
[63]	2017		47 طن/عام	كمية الأتربة والرماد التي يستقبلها مكب الأزرقين
[63]	2017	دون معالجة مسبقة	2,636 جثة	الكلاب الضالة التي تم إبادتها ودفنها في مكب الأزرقين
[63]	2017		أكثر من 60%	كمية النفايات العضوية التي يستقبلها مكب الأزرقين
[63]	2020	يتم استهلاكها في مدينة صنعاء يوميًا	1 مليون كيس/يوم	كمية نفايات الأكياس البلاستيكية

2-5. اختيار الطريقة المثلى لإدارة النفايات في اليمن

1-2-5. تحويل النفايات إلى طاقة

بحسب دراسة صدرت في العام 2022، يعاني اليمن في الوقت الحالي من نقص حاد ومزمن في إمدادات الطاقة، فبرغم أنه يعد من الدول المستخرجة والمصدرة للنفط، إلا أن الأزمة التي بدأت في 2015 قد أدت إلى توقف استخراج النفط تقريبا وانخفاض واردات الوقود إلى 1%، مما أدى إلى حرمان 90% من السكان من إمدادات الكهرباء العامة، كما أشارت الدراسة إلى وجود كميات كبيرة من الكتلة الحيوية المتولدة من القطاع الزراعي والنفايات البلدية الصلبة، منوهة إلى المخاطر البيئية المترتبة عن تراكم المخلفات العضوية والاستخدامات الحالية لها في إنتاج الطاقة بطرق بدائية، حيث تستخدم 74%، 23%، 18% من الأسر اليمنية، أخشاب الأشجار، ومخلفات المحاصيل، والفحم على التوالي، في أغراض الطهي والتدفئة والإضاءة. كما ألفت الضوء على إمكانية تحويل الكتلة العضوية إلى وقود حيوي عبر عدد من التقنيات مستشهادة ببعض الدراسات المختبرية والميدانية التي أثبتت الجدوى الاقتصادية لتلك التقنيات⁽⁶⁷⁾، ويعرض الجدول «3»، حجم الطاقة الكهربائية التي يمكن استرجاعها من النفايات العضوية الموجودة في النفايات البلدية الصلبة فقط في صنعاء، رغم أنه يمكن حرق جميع أنواع النفايات مثل البلاستيك والمنسوجات والمطاط وغيرها من المواد القابلة للاحتراق عدا الرماد والمواد الخطرة والمتفجرة.

جدول «3»

الطاقة الكهربائية التي يمكن استرجاعها من النفايات العضوية المتولدة في اليمن للعام 2024

7,850,000	كمية النفايات البلدية الصلبة طن/عام
0.65	نسبة الجزء العضوي
5,102,500	كمية النفايات العضوية طن/عام
20.5	القيمة الحرارية الكامنة ميجاجول/كجم
104,601,250,000	القيمة الحرارية الكلية ميجاجول/عام
0.28	معامل تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة كهربائية
29,058,227,250	الطاقة الكهربائية المتولدة كيلوات/ساعة/عام
0.25	كفاءة استخدام الطاقة
7,264,556,812.50	الطاقة الفعلية التي يمكن استرجاعها كيلوات/ساعة/سنة
7.26	الطاقة الفعلية التي يمكن استرجاعها تيراوات/ساعة/سنة

وقد اعتمد المصدر في تقديره للكميات المتولدة من الكتلة الحيوية في اليمن على مصادر قديمة تعود إلى العام 2014، وبرغم المزايا العديدة لتقنيات تحويل الكتلة الحيوية إلى وقود حيوي، والتي أشار إليها المصدر إلا أنه لم يناقش التحديات والمعوقات التي تحد من تطبيقها في اليمن، وكما وضحنا سابقاً فإن تقنيات تحويل النفايات يمكنها توفير الطاقة وتقليل حجم النفايات، إلا أنها قد لا تكون الخيار الأكثر ملاءمة لليمن في الوقت الحاضر بسبب عدة عوامل:

1. ارتفاع تكاليف الاستثمار والتشغيل الأولية: حيث تتطلب مشاريع تحويل النفايات إلى طاقة استثمارات رأسمالية كبيرة، حيث قد تصل التكاليف إلى 420 مليون دولار للمنشأة الواحدة، وقد تصل تكاليف التشغيل السنوية حوالي 22 مليون دولار⁽⁶⁸⁾، ومن المرجح أن تكون هذه التكاليف باهظة بالنسبة لليمن في ظل التحديات الاقتصادية الحالية التي تواجهها.

2. متطلبات الخبرة الفنية: تتطلب تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة معرفة فنية وبُنية أساسية متقدمة، والتي قد تكون مفقودة في اليمن بسبب الصراع المستمر والقيود على الموارد.

3. المخاوف البيئية: في حين أن تحويل النفايات إلى طاقة يمكن أن يقلل من حجم النفايات، إلا أنه قد يؤدي إلى أعباء بيئية إجمالية أعلى مقارنة ببعض طرق التخلص الأخرى إذا لم تتم إدارتها بشكل صحيح.

وكمثال على عدم جاهزية اليمن لتبني الطرق المتقدمة لإدارة النفايات، مثل الطرق الحرارية، مشروع التقاط غازات مكب نفايات الأزرقين، حيث تم خلال الفترة السابقة حفر ما يقارب 200 بئر في جسم المكب بعمق وصل إلى 30 متراً، وكان من المتوقع أن يتم جمع الغاز المتصاعد من المكب وتوليد الطاقة الكهربائية وبيعها للأحياء السكنية المجاورة، ولكن هذا المشروع توقف ولم يتم إكمال ربط شبكة توصيل وجمع الغاز أو توفير المولد المناسب، وظلت الآبار مفتوحة إلى الهواء لتفاقم من مشكلة انبعاث غازات الاحتباس الحراري والتي قد تؤدي إلى كارثة انفجار المكب بسبب تصاعد غاز الميثان، والسبب الرئيسي لهذا الفشل هو نقص الخبرات الفنية والتكنولوجية والتفاؤل المفرط لدى القائمين على المشروع.

وقد تم إنشاء أول مشروع لتحويل النفايات إلى طاقة في اليمن بمحافظة لحج، بواسطة برنامج الأمم المتحدة الإنمائي في اليمن، وبالشراكة مع الوكالة السويدية للتعاون الإنمائي الدولي «سيدا»، ومشروع مرفق المناخ لأهداف التنمية المستدامة، والقطاع الخاص اليمني «سحاب تك»، والاتحاد الأوروبي «EU»، كجزء من برنامج دعم سبل العيش والأمن الغذائي في اليمن، وبحسب المصدر، يوفر المشروع حالياً ما يقرب من 7,500 وظيفة يومية للأشخاص الأقل دخلاً في المجتمعات الريفية، كما تم بسببه تخفيض كمية النفايات الملقاة في مكبات النفايات بنسبة 70٪، وهو يوفر الكهرباء بأسعار معقولة تبلغ 16 سنت أمريكي لكل كيلو واط/ساعة، مقارنة بـ 160 سنت لكل كيلو واط/ساعة للوقود الأحفوري.⁽⁶⁹⁾

2-2-5. تحويل النفايات إلى سماد عضوي.

يمكن أن يؤدي تحويل النفايات العضوية إلى أسمدة لتحسين الإنتاج الزراعي وبالتالي الأمن الغذائي لليمن، وبحسب الموجز القطري للنظام العالمي للمعلومات والإنذار المبكر بشأن الغذاء والزراعة «GIEWS» الخاص بالجمهورية اليمنية 2024، من المتوقع أن يواجه أكثر من 17 مليون شخص أو 54% من السكان انعدام الأمن الغذائي، وبحسب المصدر، كان إجمالي إنتاج الحبوب بما في ذلك الذرة الرفيعة والذرة الشامية والدخن في عام 2022، 2023، 2024 حوالي 415، 405، 393 ألف طن على التوالي، وإن تلك الكمية تغطي 20% فقط من إجمالي احتياجات البلاد من الحبوب للاستخدامات المختلفة، وتعتمد اليمن على الواردات التجارية والمساعدات الإنسانية لتلبية 80% المتبقية، وذكر نفس المصدر أن احتياجات البلاد من الحبوب لضمان تناول أسعار حرارية كافية في 2023 كان حوالي 4.6 مليون طن، تشمل 3.5 مليون طن من القمح و700 ألف طن من الذرة، و410 ألف طن من الأرز. وبحسب المصدر فقد كان ارتفاع أسعار المدخلات الزراعية، ومن ضمنها الأسمدة، أحد الأسباب الرئيسية لانخفاض الإنتاج المحلي من الحبوب⁽⁷⁰⁾، ويلخص الشكل «4» الإجراءات الضرورية المقترحة لرفع كفاءة عمليات إدارة النفايات البلدية الصلبة في اليمن بشكل عام، وفي مدينة صنعاء بشكل خاص ابتداءً بتوليد النفايات، ومروراً بعمليات التسليم والجمع والنقل وانتهاء بعمليات التخلص، ونظرياً، يمكن إنتاج حوالي 2.3 مليون طن/عام من الأسمدة العضوية كما هو موضح في جدول «4» عن طريق إخضاع الجزء العضوي من النفايات البلدية الصلبة للتحلل الهوائي أو ما يعرف بالكومبوست.

جدول «4»

الأسمدة العضوية التي يمكن إنتاجها من الجزء العضوي من النفايات الصلبة المتولدة في اليمن للعام 2024

7,850,000	كمية النفايات البلدية الصلبة طن/عام
0.65	نسبة الجزء العضوي
5,102,500	كمية النفايات العضوية طن/عام
5,102,500,000	كمية النفايات العضوية كجم/عام
0.45	معدل تحويل النفايات العضوية إلى سماد
2,296,125	الأسمدة العضوية المتوقعة إنتاجها طن/عام

كما يعرض الجدول «5»، مقارنة بين الطرق المختلفة للتخلص من النفايات البلدية الصلبة والذي قد يساعد صناع القرار على اتخاذ قرارات مستنيرة قائمة على بيانات ومعلومات حديثة تلائم الواقع الذي تعيشه البلاد.

جدول «5»

مقارنة بين الطرق الحرارية والتسميد للتخلص من النفايات البلدية الصلبة

المعيار	الحرق لإنتاج الكهرباء	إنتاج الوقود الحيوي	إنتاج السماد العضوي
نوع النفايات المناسبة	النفايات القابلة للاحتراق مثل البلاستيك والمطاط والمنسوجات والنفايات العضوية الجافة	النفايات العضوية مثل بقايا الطعام والمخلفات الزراعية	النفايات العضوية مثل بقايا الطعام والمخلفات الزراعية
التكلفة الاقتصادية	عالية «تكاليف التكنولوجيا والبنية التحتية»	متوسطة «تتطلب تقنيات متقدمة نسبياً»	منخفضة إلى متوسطة «بتقنيات بسيطة»
كفاءة استخدام الموارد	متوسطة «تستهلك طاقة عالية أثناء التشغيل»	عالية «تستخدم المواد العضوية المتاحة»	عالية «تحول النفايات إلى موارد قابلة للاستخدام»
الآثار البيئية	تلوث الهواء «تتطلب أنظمة تحكم متقدمة»	تأثير بيئي أقل «غازات منخفضة نسبياً»	صديقة للبيئة، وتحسن خصوبة التربة
الآثار الاجتماعية	قليلة «فرص عمل محدودة»	متوسطة «تحتاج إلى كوادر متخصصة»	عالية «توفر فرص عمل كثيرة»
قابلية التطبيق في الدول الفقيرة	منخفضة «تحتاج إلى بنية تحتية متقدمة»	متوسطة «تتطلب بعض التقنيات المتقدمة»	عالية «يمكن تطبيقها بسهولة»
متطلبات البنية التحتية	تحتاج إلى محطات توليد طاقة كبيرة	تحتاج مصانع متخصصة لتحويل النفايات	تحتاج منشآت معالجة بسيطة أو متوسطة

إنتاج السماد العضوي	إنتاج الوقود الحيوي	الحرق لإنتاج الكهرباء	المعيار
قصيرة «1-3 سنوات»	متوسطة «5-8 سنوات»	طويلة «10-15 سنة»	مدة العائد على الاستثمار
متاح عبر دعم المنظمات البيئية الدولية	متاح عبر برامج بيئية ودعم الوقود الحيوي	متاح «عبر برامج تشجع مشاريع الطاقة المتجددة»	التمويل الدولي المتاح
قصيرة «أقل من سنة»	متوسطة «1-3 سنوات»	طويلة «تصل إلى عدة سنوات»	مدة التنفيذ
مخاطر قليلة مرتبطة باستدامة المواد الخام	مخاطر تقنية مرتبطة بعمليات التخمر	مخاطر بيئية عالية في حال فشل التحكم	المخاطر المرتبطة
تحتاج إلى خبرات بسيطة	تحتاج إلى خبرات متخصصة	تحتاج إلى خبرات تقنية متخصصة	متطلبات التدريب والتأهيل
تأثير إيجابي على التربة وتقليل النفايات	تأثير إيجابي عن طريق تقليل النفايات	قد تؤثر سلبًا في حال عدم التحكم بالانبعاثات	التأثير على الصحة العامة

وتمثل دراسات الحالة التي تناولت موضوع إدارة النفايات البلدية الصلبة في مدن ومناطق مختلفة مصدرًا مهمًا للبيانات، وهي قد تساعد في اتخاذ القرار المناسب بشأن اختيار الطريقة المثلى والسيناريو الملائم لإدارة النفايات في اليمن، وخاصة في مدينة صنعاء، وفيما يلي بعض تلك الدراسات وأهم النتائج التي توصلت إليها:

1. في دراسة حالة من مدينة هو تشي منه، فيتنام، استخدم فيها الباحثون عملية التسلسل الهرمي التحليلي «AHP» لاختيار السيناريو الأمثل للإدارة المستدامة للنفايات الصلبة البلدية في المدينة، مع التركيز على التسميد بدلًا من تحويل النفايات إلى طاقة، وخلص الباحثون إلى أن هذا النهج أكثر ملاءمة بالنظر لمحتوى النفايات العالي من المواد العضوية والظروف الاجتماعية والاقتصادية في المدينة.⁽⁷¹⁾

2. طبقت مدينة أبوزا الهندية، نظام لامركزي لإدارة النفايات يركّز بشكل أساسي على التسميد، حيث يتم فصل النفايات العضوية القابلة للتحلل على مستوى الحي وتعالج في معامل التسميد،

الصغيرة، وقد نجح هذا النهج في تقليل كمية النفايات المرسلّة إلى مكبات النفايات ووفر الغاز الحيوي للطهي للعديد من السكان، وهو ما جعل المدينة تحصل على جائزة المدينة النظيفة من المركز الهندي للعلوم والبيئة في 2016.⁽⁷²⁾

3. في ماليزيا، ركزت مدينة بينانج على تحويل النفايات العضوية إلى سماد لتقليل الضغط على مكبات النفايات، حيث استخدمت المدينة آلات معالجة الأغذية «Bio Regen» لتحويل النفايات العضوية إلى سماد، والذي يتم استخدامه بعد ذلك في الزراعة، وهذه المبادرة هي جزء من جهد أوسع لإدارة النفايات بشكل مستدام وللحد من انبعاثات الميثان من مكبات النفايات [72].

4. نفذت مدينة كاجيكا، كولومبيا، نظام إدارة النفايات الذي يتضمن التسميد الدودي، وقد أدت هذه المبادرة إلى انخفاض كبير في كمية النفايات المرسلّة إلى مكبات النفايات وتم الاعتراف بها كنموذج لإدارة النفايات المسؤولة في المنطقة [72].

5. أظهرت نتائج دراسة أجريت في إحدى مدن تايلاند ذات الدخل المرتفع، أن انبعاثات غازات الاحتباس الحراري من مكب المدينة كان الأكبر من إجمالي الانبعاثات في قطاع النفايات بين عامي 2018 و2022، حيث بلغت الانبعاثات 445,112 - 501,761 طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون لكل عام، بينما في المقابل، بلغت الانبعاثات المتولدة عن التسميد 24,240 طن من مكافئ ثاني أكسيد الكربون سنويًا، كما أشار المصدر إلى أن زيادة الوعي وإشراك أصحاب المصلحة كانت هي العوامل الأكثر تأثيرًا على عملية الإدارة الفعالة للنفايات الصلبة في المدينة المدروسة.⁽⁷³⁾

6. تم استخدام نموذج تحسين متعدد الأهداف لتحديد المسارات التقنية المثلى التي توازن بين الأهداف الاقتصادية والبيئية وأهداف الطاقة في مدينة «تشانغ جياغانغ» «Zhangjiagang» الصينية، وكشفت النتائج أن التركيز على دفن النفايات والتسميد كمسارات للتخلص من النفايات قد يكون له تأثيرات بيئية كبيرة، وفي المقابل، حقق الحل المحسن متعدد الأهداف القائم على الحرق والهضم اللاهوائي فوائد بيئية وطاقة تقدر بـ 18.7 دولار أمريكي/طن، مع زيادة معتدلة في التكاليف الاقتصادية بمقدار 5.7 دولار/طن مقارنة بالسنة الأساس، وقد حققت السيناريوهات المثلى غير المقيدة بالقيود الحالية تكاليف بيئية صافية سلبية واستعادت 2.0×10^6 ميغا جول من الطاقة.⁽⁷⁴⁾

7. في دراسة حديثة أجريت في مدينة إسطنبول التركية بهدف قياس تأثير ثلاثة سيناريوهات مختلفة للتخلص من النفايات شملت: الدفن والحرق؛ الدفن والحرق والهضم اللاهوائي؛ الدفن والهضم اللاهوائي وإعادة التدوير، وباستخدام تقييم دورة الحياة خلص الباحثون إلى إن الدفن في مكبات النفايات كان الأسوأ وينطوي على مخاطر بيئية كبيرة، في حين أن الهضم اللاهوائي والحرق قلل بشكل كبير من الآثار البيئية مقارنة بطريقة الدفن، وإن أفضل سيناريو للتخلص من النفايات في المدينة المدروسة هي إعادة التدوير خصوصًا للمعادن والمواد البلاستيكية⁽⁷⁵⁾، واقترح الباحثون بناءً على النتائج التي توصلوا إليها نهجًا متكاملًا للتخلص من النفايات عن طريق إخضاع الجزء العضوي من النفايات البلدية الصلبة للهضم اللاهوائي وتحويل الغاز الحيوي الناتج إلى

الطاقة، إعادة تدوير المواد القابلة للتدوير، وحرق المواد الأخرى القابلة للحرق وتحويل الطاقة الحرارية المنتجة إلى كهرباء، وأخيرا إرسال النفايات المتبقية غير القابلة لإعادة التدوير وغير القابلة للحرق والرماد الناتج عن عملية الحرق إلى مكب النفايات [75].

6. الاستنتاجات والتوصيات

هناك نقص كبير في البيانات المتعلقة بإدارة النفايات البلدية الصلبة في اليمن، حيث أنها قديمة جداً وغير دقيقة، ومن المتوقع أن تتسبب بإعاقة الجهود المستقبلية لوضع الخطط والاستراتيجيات للإدارة الفعالة للنفايات العضوية في اليمن، لذلك نوصي بإجراء دراسات مسحية واسعة النطاق وأخرى متخصصة ودعم الأبحاث والدراسات في هذا الجانب.

تحتوي النفايات البلدية الصلبة على كميات كبيرة من النفايات العضوية والتي تدار بشكل سيئ في الوقت الذي تعاني فيه البلاد من تدهور كبير في القطاع الزراعي وانخفاض بسبب نقص المدخلات ومنها الأسمدة. لذلك نوصي بالاستفادة من النفايات العضوية وتحويلها إلى أسمدة عضوية عن طريق التحلل الهوائي لأن هذه الطريقة هي الأكثر ملائمة لليمن وخصوصاً مدينة صنعاء.

ليس هناك بنية تحتية كافية لإدارة الكميات المتزايدة من النفايات البلدية الصلبة بفعالية مما يؤدي إلى إهدار الموارد عبر إرسالها إلى مكب النفايات وتفاقم من المشاكل البيئية والصحية، لذلك نوصي بالبدء في الاستثمار في البنية التحتية والتكنولوجية ووضع خطط مستقبلية قريبة وطويلة المدى لتبني طرق أحدث للتخلص من النفايات.

7. قائمة المراجع

- (1) Hariani, Y. (2022). Hubungan Pengetahuan dan Personal Hygiene Terhadap Kesehatan Reproduksi. *Jurnal Kesehatan Abdurahman*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.55045/jkab.v11i2.146>
- (2) Irjayanti, A., Wambrauw, A., Wahyuni, I., & Maranden, A. A. (2023). Personal Hygiene with the Incidence of Skin Diseases. *Jurnal Ilmu Kesehatan Hewan*, 12(1), 169–175. <https://doi.org/10.35816/jiskh.v12i1.926>
- (3) Wyles, K. J., White, M. P., Hattam, C., Pahl, S., King, H., & Austen, M. (2019). Are Some Natural Environments More Psychologically Beneficial Than Others? The Importance of Type and Quality on Connectedness to Nature and Psychological Restoration. *Environment and Behavior*, 51(2), 111–143. <https://doi.org/10.1177/0013916517738312>
- (4) Horrevorts, M., Van Ophem, J., & Terpstra, P. (2018). Impact of cleanliness on the productivity of employees. *Facilities*, 36(9/10), 442–459. <https://doi.org/10.1108/F-02-2017-0018>
- (5) Ramos-Morcillo, A. J., Moreno-Martínez, F. J., Hernández Susarte, A. M., Hueso-Montoro, C., & Ruzafa-Martínez, M. (2019). Social Determinants of Health, the Family, and Children's Personal Hygiene: A Comparative Study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(23), 4713. <https://doi.org/10.3390/ijerph16234713>
- (6) Manek, B. D., Rian, M. B., & Bilimangngi, A. (2021). Relationship between social economic status and family's clean and healthy behavior (PHBS) in Tesa Village, Laenmanen District, 2020. *Jurnal Ners dan Kebidanan Indonesia*, 9(1), 39. [https://doi.org/10.21927/jnki.2021.9\(1\).39-45](https://doi.org/10.21927/jnki.2021.9(1).39-45)
- (7) North, S. (2008). *Virginia Smith, Clean: a history of personal hygiene and purity*. Oxford University Press. *Medical History*, 52(3), 412–413. <https://doi.org/10.1017/S002572730000274X>
- (8) Huangfu, G., Li, L., Zhang, Z., & Sheng, C. (2021). Moral metaphorical effect of cleanliness on immoral workplace behaviors: Environmental cleanliness or self-cleanliness? *Journal of Pacific Rim Psychology*, 15, Article 183449092110342. <https://doi.org/10.1177/18344909211034257>
- (9) Bista, C. B. (2023). Knowledge, Attitudes, and Practices of Hygiene in Hindu Society of Chunikhel, Lalitpur. *Historical Journal*, 14(2), 1–13. <https://doi.org/10.3126/hj.v14i2.59045>
- (10) Amrullah, A., Jubba, H., & Maysharah, S. (2021). Covid-19 Dan Pengaruhnya Terhadap Perilaku Hidup Bersih Masyarakat Muslim. *Poros Onim: Jurnal Sosial Keagamaan*, 2(2), 113–124. <https://doi.org/10.53491/porosonim.v2i2.144>
- (11) Moreno-Martínez, F. J., Gómez García, C. I., & Hernández-Susarte, A. M. (2016). Evolución histórica de la higiene corporal: desde la edad antigua a las sociedades modernas actuales. *Cultura de los Cuidados*, 46, Article 11. <https://doi.org/10.14198/cuid.2016.46.11>

- (12) Zahran, H. (2023). From Fat to Foam: The Fascinating World of Soap Chemistry and Technology. *Egyptian Journal of Chemistry*. <https://doi.org/10.21608/ejchem.2023.195358.7627>
- (13) Quitzau, M.-B. (2004). Changing ideas of bodily cleanliness. Retrieved from <https://orgprints.org/00003298/>
- (14) Weatherall, D., Greenwood, B., Chee, H. L., & Wasi, P. (2011). Science and technology for disease control: past, present, and future. Retrieved from <https://europepmc.org/books/nbk11740>
- (15) Piret, J., & Boivin, G. (2021). Pandemics Throughout History. *Frontiers in Microbiology*, 11, Article 631736. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.631736>
- (16) Shrivastava, S. R., & Shrivastava, P. S. (2021). Exploring the Role of Hand Hygiene in the Effective Containment of Coronavirus Disease-2019 Pandemic. *Matrix Science Medica*, 5(2), 41–42. https://doi.org/10.4103/MTSM.MTSM_29_20
- (17) Medlin, C. A., Chowdhury, M., Jamison, D. T., & Measham, A. (2011). Improving the health of populations: lessons of experience. Retrieved from <https://europepmc.org/article/nbk/nbk11736>
- (18) Taagepera, R., & Nemo, M. (2024). World population growth over millennia: Ancient and present phases with a temporary halt in-between. *The Anthropocene Review*, 11(1), 163–183. <https://doi.org/10.1177/20530196231172423>
- (19) Washington, H., & Kopnina, H. (2022). Discussing the Silence and Denial around Population Growth and Its Environmental Impact. How Do We Find Ways Forward? *World*, 3(4), 1009–1027. <https://doi.org/10.3390/world3040057>
- (20) United Nations. (2024). As the World's Population Surpasses 8 billion, What Are the Implications for Planetary Health and Sustainability? Retrieved from <https://www.un.org/en/un-chronicle/world-population-surpasses-8-billion-what-are-implications-planetary-health-and>
- (21) Rada, E. C., et al. (2021). Evaluating Global Municipal Solid Waste Management Efficiency from a Circular Economy Point of View. *Sustainable City*, (Dec), 207–218. <https://doi.org/10.2495/SC210181>
- (22) Sondh, S., Upadhyay, D. S., Patel, S., & Patel, R. N. (2024). Strategic approach towards sustainability by promoting circular economy-based municipal solid waste management system: A review. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 37, 101337. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101337>
- (23) Ausharipova, D. E., Kulumbetova, L. B., & Tankova, E. (2023). Innovative business models for the development of environmental entrepreneurship in the waste sector of Kazakhstan. *Journal of Environmental Economics*, 4, 174–187. <https://doi.org/10.46914/1562-2959-2023-1-4-174-187>
- (24) Zhang, Z., Liu, G., Yuan, Y., & Tan, W. (2024). Municipal solid waste management challenges in developing regions: A comprehensive review and future perspectives for Asia and Africa. *Science*

- of The Total Environment, 930, 172794. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172794>
- (25) Yan, M., Chen, X., & Liu, L. (2020). Biochar and pyrolytic gas properties from pyrolysis of simulated municipal solid waste (SMSW) under pyrolytic gas atmosphere. *Waste Disposal and Sustainable Energy*, 2(1), 37–46. <https://doi.org/10.1007/s42768-019-00030-y>
- (26) Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington, DC: World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- (27) Adeleke, O. A., Akinlabi, S. A., Jen, T. C., & Dunmade, I. (2021). An overview of factors affecting the rate of generation and physical composition of municipal solid waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1107(1), 012096. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012096>
- (28) Zhang, X., Liu, C., Chen, Y., Zheng, G., & Chen, Y. (2022). Source separation, transportation, pretreatment, and valorization of municipal solid waste: A critical review. *Environmental Development and Sustainability*, 24(10), 11471–11513. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01932-w>
- (29) Singh, A., & Raj, P. (2018). Segregation of waste at source reduces the environmental hazards of municipal solid waste in Patna, India. *Archives of Environmental Protection*. Retrieved from <https://journals.pan.pl/dlibra/publication/122306/edition/106608>
- (30) Calabrò, P. S., & Satira, A. (2020). Recent advancements toward resilient and sustainable municipal solid waste collection systems. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 26, 100375. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100375>
- (31) Wright, S. (2024). PART 3: Different Methods of Sorting & Preparing Waste. *Inciner8 Blog*. Retrieved from <https://www.inciner8.com/blog/waste-management/part-3-different-methods-of-sorting-preparing-waste>
- (32) Chen, S., et al. (2020). Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: Case study in pilot communities in Shanghai, China. *Science of The Total Environment*, 717, 137193. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137193>
- (33) Matsumoto, S. (2011). Waste separation at home: Are Japanese municipal curbside recycling policies efficient? *Resources, Conservation and Recycling*, 55(3), 325–334. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.10.005>
- (34) Morais, J., Corder, G., Golev, A., Lawson, L., & Ali, S. (2022). Global review of human waste-picking and its contribution to poverty alleviation and a circular economy. *Environmental Research Letters*, 17(6), 063002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac6b49>
- (35) Ferronato, N., et al. (2024). A review of plastic waste circular actions in seven developing coun-

- tries to achieve sustainable development goals. *Waste Management Research*, 42(6), 436–458. <https://doi.org/10.1177/0734242X231188664>
- (36) Chen, P., & Steuer, B. (2024). A first assessment of Hong Kong's circular economy for wastepaper: Material flows, value chains and the role of the semi-formal informal recycling sector. *Journal of Cleaner Production*, 450, 141939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141939>
- (37) Roustia, K., Zisen, L., & Hellwig, C. (2020). Household Waste Sorting Participation in Developing Countries—A Meta-Analysis. *Recycling*, 5(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/recycling5010006>
- (38) Karabulut, A. I., Yazici Karabulut, B., Derin, P., Yesilnacar, M. I., & Pamukçu, H. (2024). A comparative study on the selection of the most suitable route for the collection and transportation of municipal solid waste. *Environmental Research and Technology*, 7(1), 3–12. <https://doi.org/10.35208/ert.1244707>
- (39) Dotsenko, A. I., Kustarev, G. V., & Andryukhov, N. M. (2022). Pneumatic Waste Collection System Using Intelligent Systems as a Means of Improving the Urban Environment. *2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/TIRVED56496.2022.9965556>
- (40) Singh, D., Dikshit, A. K., & Kumar, S. (2024). A Paradigm Shift in Municipal Solid Waste Collection Containers and Vehicles in Urban Areas. In Yadav, K. D., Jariwala, N. D., Kumar, A., & Sinha, A. (Eds.), *Recent Advances in Sustainable Waste Management Practices (Lecture Notes in Civil Engineering, Vol. 430)* (pp. 129–142). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4186-5_10
- (41) Nguyen-Trong, K., Nguyen-Thi-Ngoc, A., Nguyen-Ngoc, D., & Dinh-Thi-Hai, V. (2017). Optimization of municipal solid waste transportation by integrating GIS analysis, equation-based, and agent-based model. *Waste Management*, 59, 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.048>
- (42) Hu, Y., Ju, Q., Peng, T., Zhang, S., & Wang, X. (2024). Municipal Solid Waste Collection and Transportation Routing Optimization Based on Iac-Sfla. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 32(1), 31–44. <https://doi.org/10.3846/jeelms.2024.20774>
- (43) Yaashikaa, P. R., et al. (2022). A review on landfill system for municipal solid wastes: Insight into leachate, gas emissions, and environmental and economic analysis. *Chemosphere*, 309, 136627. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136627>
- (44) Vallero, D. A., & Blight, G. (2019). The Municipal Landfill. In *Waste* (pp. 235–258). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815060-3.00012-8>
- (45) Krasnyansky, M. (2024). Municipal Solid Waste Landfill as a Dangerous Ungovernable Biochemical Reactor. *International Journal of Environmental and Agricultural Biology*, 9(2), 230–241.

- <https://doi.org/10.22161/ijeab.92.26>
- (46) Siddiqua, A., Hahladakis, J. N., & Al-Attiya, W. A. K. A. (2022). An overview of the environmental pollution and health effects associated with waste landfilling and open dumping. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(39), 58514–58536. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21578-z>
- (47) Al-Emad, A., et al. (2013). The impact of Sana'a solid waste on the quality of groundwater in Yemen. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, (Sep), 171–183. <https://doi.org/10.2495/WS130151>
- (48) Essien, J. P., Ikpe, D. I., Inam, E. D., Okon, A. O., Ebong, G. A., & Benson, N. U. (2022). Occurrence and spatial distribution of heavy metals in landfill leachates and impacted freshwater ecosystem: An environmental and human health threat. *PLOS One*, 17(2), e0263279.
- (49) Huang, Z., Liu, G., Zhang, Y., Yuan, Y., Xi, B., & Tan, W. (2024). Assessing the impacts and contamination potentials of landfill leachate on adjacent groundwater systems. *Science of The Total Environment*, 930, 172664. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172664>
- (50) Hussain, A., et al. (2024). Landfill leachate analysis from selected landfill sites and its impact on groundwater quality, New Delhi, India. *Environmental Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04403-6>
- (51) Hussein, M., Yoneda, K., Mohd-Zaki, Z., Amir, A., & Othman, N. (2021). Heavy metals in leachate, impacted soils and natural soils of different landfills in Malaysia: An alarming threat. *Chemosphere*, 267, 128874. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128874>
- (52) Jabło ska-Trypu , A., et al. (2021). Potential toxicity of leachate from the municipal landfill in view of the possibility of their migration to the environment through infiltration into groundwater. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(9), 3683–3698. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00867-5>
- (53) IC Change. (2014). Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- (54) Alves, B. (2024). Global waste management market value 2022–2030. Statista. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/246178/projected-global-waste-management-market-size/>
- (55) Abduli, M. A., & Azimi, E. (2010). Municipal Waste Reduction Potential and Related Strategies in Tehran. *International Journal of Environmental Research*, 4(4). <https://doi.org/10.22059/ijer.2010.277>
- (56) United Nations. (2024). Sustainable Development Goals: 17 Goals to Transform our World. Re-

- trieved from <https://www.un.org/en/exhibits/page/sdgs-17-goals-transform-world>
- (57) Alsulaili, A., Ali, O., Alenezi, N., & Al-Dabbous, A. N. (2024). Selection of municipal solid waste disposal technology using the Analytic Hierarchy Process and Genetic Algorithm for Gulf Cooperation Council Countries. *Journal of Engineering Research*, Article S230718772400083X. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.03.015>
- (58) Shanta, M. H., Choudhury, I. A., & Salman, S. (2024). Municipal solid waste management: Identification and analysis of technology selection criteria using Fuzzy Delphi and Fuzzy DEMATEL technique. *Heliyon*, 10(1), e23236. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23236>
- (59) World Bank. (2024). GNI per capita, Atlas method - Yemen, Rep. World Bank Open Data. Retrieved from <https://data.worldbank.org>
- (60) Al-Dailami, A., et al. (2022). Sustainable solid waste management in Yemen: Environmental, social aspects, and challenges. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02871-w>
- (61) Al-Mahdi, A., & Al-Eryani, M. (2014). Country Report on the Solid Waste Management in Yemen. Réseau régional d'échange d'informations et d'expertise dans le secteur des déchets dans les pays du Mashreq et du Maghreb. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 33p.
- (62) World Bank. (2024). Yemen - Comprehensive development review - environment (English). Washington, D.C.: World Bank Group. Retrieved from <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/123861468335500463/Yemen-Comprehensive-development-review-environment>
- (63) Zabara, B., & Ahmad, A. A. (2020). Biomass Waste in Yemen: Management and Challenges. In A. M. Negm & N. Shareef (Eds.), *Waste Management in MENA Regions* (pp. 313–336). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-18350-9_16
- (64) Grundy, O. F.-A. S.-B., & Salemdeeb, M. B.-R. (2015). Emergency waste assessment. Retrieved from https://www.academia.edu/download/84452278/2015_08_UNDP_Yemen_Waste_Assessment.pdf
- (65) Baldé, C. P., et al. (2024). Global E-waste Monitor 2024. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR). Retrieved from <https://www.itu.int:443/en/publications/ITU-D/Pages/publications.aspx?parent=D-GEN-E-WASTE.01-2024&media=electronic>
- (66) United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs (OCHA). (2024). Yemen: Population Estimates - Humanitarian Data Exchange. Retrieved from <https://data.humdata.org/>

- [dataset/yemen-population-estimates](#)
- (67) Binhweel, F., Bahadi, M., Sambo, G., CChem, Ts. Dr. M., & Ahmad, M. (2022). Biofuel in Yemen; an alternative energy resource toward sustainability. *PEAT*, 3, 945–955. <https://doi.org/10.30880/peat.2022.03.02.094>
- (68) Rodriguez, M. (2011). Cost-benefit analysis of a waste to energy plant for Montevideo; and waste to energy in small islands. (Unpublished master's thesis). Columbia University, New York. Retrieved from http://www.columbia.edu/cu/seas/earth/wtert/newwtert/Research/sofos/Rodriguez_thesis.pdf
- (69) United Nations Development Programme (UNDP). (2024). Brochure: Waste to Energy. Retrieved from <https://www.undp.org/yemen/publications/brochure-waste-energy>
- (70) Relief Web. (2024). GIEWS Country Brief: Yemen 31-October-2024. Retrieved from <https://reliefweb.int/report/yemen/giews-country-brief-yemen-31-october-2024>
- (71) Fogarassy, C., Hoang, N. H., & Nagy-Pércsi, K. (2022). Composting Strategy Instead of Waste-to-Energy in the Urban Context—A Case Study from Ho Chi Minh City, Vietnam. *Applied Sciences*, 12(4), 2218. <https://doi.org/10.3390/app12042218>
- (72) United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Solid approach to waste: how 5 cities are beating pollution. Retrieved from <https://www.unep.org/news-and-stories/story/solid-approach-waste-how-5-cities-are-beating-pollution>
- (73) Dubsok, A., Limphitakphong, N., Sugsaisakon, S., & Kittipongvise, S. (2024). Greenhouse Gases Emissions and Factors Influencing Sustainable Solid Waste Management Based on The Circular Economy Indicators: The City Case in Thailand. *E3S Web Conf.*, 566, 02004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202456602004>
- (74) Zhang, J., Wen, Z., Hu, Y., Fei, F., Wang, Y., & Xie, Y. (2024). System simulation and multi-objective optimization methodology for sustainable municipal solid waste classification management: A case study in China. *Sustainable Production and Consumption*, 50, 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.08.014>
- (75) Çetinkaya, A., & Bilgili, L. (2024). Life cycle assessment of energy production from municipal solid waste: Istanbul case. *Environmental Research and Technology*, 7(4), 537–546. <https://doi.org/10.35208/ert.1455985>