

دور الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات- دراسة حالة شركة Ecube Labs-

The Role of Artificial Intelligence in Waste Management- A Case Study of Ecube Labs-

حنان شايب* ¹		
جامعة قسنطينة 2- عبد الحميد مهري hanane.chaib@univ-constantine2.dz		
تاريخ النشر: 2026/06/01	تاريخ القبول: 2026/04/28	تاريخ الاستلام: 2026/03/13

ملخص

هدفت هذه الدراسة إلى إبراز دور الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات، من خلال اعتماد المنهجين الوصفي والتحليلي، إلى جانب اختيار شركة Ecube Labs كنموذج تطبيقي لدراسة استخدام هذه التقنيات في عمليات جمع النفايات ونقلها. وتوصلت الدراسة إلى أن الذكاء الاصطناعي يمثل أداة فعالة في رفع كفاءة إدارة النفايات، من خلال زيادة معدلات إعادة التدوير، وخفض التكاليف والتقليل من الانبعاثات الكربونية، رغم التحديات التي قد تعيق تطبيقه. كما بينت الدراسة التطبيقية في شركة Ecube Labs جدوى هذه الحلول وفعاليتها في الواقع العملي.

الكلمات المفتاحية: إدارة النفايات؛ ذكاء اصطناعي؛ حاويات ذكية؛ شركة Ecube Labs .

تصنيف JEL: Q53، Q55، O33

Abstract

This study aimed to investigate the role of artificial intelligence in waste management, by adopting descriptive and analytical methodologies, and drawing on Ecube Labs as an applied case study to assess AI applications in waste collection and transportation. The findings indicate that AI significantly enhances the efficiency of waste management by increasing recycling rates, reducing costs, and minimizing carbon emissions, despite the challenges that may hinder its full implementation. The case study also confirms the practical feasibility and effectiveness of these AI-driven solutions in a real-world waste management context.

Keywords : Waste Management; Artificial Intelligence ; Smart Bins; Ecube Labs.

JEL Classification Codes : Q53, Q55, O33 .

* المؤلف المرسل.

¹ Hanane CHAIB, Constantine 2 - Abdelhamid MEHRI University, LABECOM: Algeria.

مقدمة

شهدت المجتمعات المعاصرة تطورًا متسارعًا صاحبته تحولات عميقة مست مختلف أنماط الحياة، مما أفرز تحديات جوهرية أثقلت كاهل الدول والحكومات. ويُعدّ التزايد المستمر والمتسارع في حجم ونوع النفايات من أبرز هذه التحديات، نتيجة النمو السكاني والتوسع العمراني، إلى جانب تصاعد الأنشطة الاقتصادية والاستهلاكية. وقد ترتب عن ذلك آثارا بيئية وصحية مقلقة، تمثلت في تفاقم مخاطر التلوث، وتدهور جودة الحياة في المدن، فضلاً عن الأعباء الاقتصادية المتزايدة الناتجة عن ارتفاع تكاليف جمع النفايات ومعالجتها، وضعف كفاءة استغلال الموارد.

أمام هذا المشهد، برز وبشكل جلي قصور كبير في الأنظمة التقليدية لمعالجة النفايات وإدارتها، إذ تُعاني هذه الأنظمة من عدة اختلالات بنيوية تحدّ من فعاليتها، حيث تعتمد بشكل كبير على العمل اليدوي، مما يؤدي إلى بطء العمليات وارتفاع نسبة الأخطاء، إضافة إلى محدودية قدرتها على معالجة الكميات المتزايدة من النفايات. كما تفتقر هذه الأنظمة إلى التخطيط الذكي، إذ تُدار عمليات الجمع وفق جداول ومسارات ثابتة لا تأخذ بعين الاعتبار التغيرات في مستويات امتلاء الحاويات، مما يفضي إلى هدر في الوقت والموارد.

انطلاقاً من هذه المعطيات، توجهت الدول والحكومات إلى تبني أساليب وتقنيات حديثة قادرة على مواجهة الضغوط الحالية والمستقبلية في مجال إدارة النفايات، تأتي في مقدمتها التقنيات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي.، إذ يعتبر هذا الأخير إحدى أهم الأدوات الحديثة القادرة على إحداث تحول نوعي في هذا المجال، من خلال تحويل النفايات من عبء بيئي واقتصادي إلى مورد يمكن استثماره ضمن إطار الاقتصاد الدائري. ويتحقق ذلك عبر تحسين عمليات الفرز، وتعزيز كفاءة إعادة التدوير، والاستفادة المثلى من المواد القابلة للاسترجاع . وبالتوازي مع ذلك، ظهرت شركات متخصصة في تطوير منتجات مدعومة بالذكاء الاصطناعي موجهة لمعالجة مرحلة واحدة أو عدة مراحل ضمن إدارة النفايات، ومن هذه الشركات، تبرز شركة Ecube Labs كنموذج رائد في تطوير حلول ذكية لإدارة النفايات، وهو ما يجعلها إطاراً تطبيقياً ملائماً لتحليل فعالية هذه التقنيات.

إشكالية الدراسة: بناء على ما تقدم، تتناول هذه الورقة البحثية في شقيها النظري والتطبيقي استخدامات الذكاء الاصطناعي في أحد أكثر القطاعات حساسية، وهو قطاع إدارة النفايات، وذلك سعياً للإجابة على التساؤل الرئيسي التالي: إلى أي مدى يُسهم الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة النفايات؟

ويتفرع هذا التساؤل إلى الأسئلة الفرعية التالية:

- ما هي أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في إدارة النفايات؟
- ما هي أهم الفوائد والتحديات المرتبطة بتطبيق الذكاء الاصطناعي في مجال إدارة النفايات؟
- إلى أي مدى تُساهم حلول شركة Ecube Labs المعتمدة على الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة النفايات؟

فرضيات الدراسة: من أجل الإجابة على التساؤل المطروح تم وضع الفرضية الرئيسية التالية: يُسهم توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحقيق تحسن ملموس في كفاءة إدارة النفايات في ظل توفر البنية التحتية التقنية والإطار التنظيمي المناسب.

كما تم الاعتماد على الفرضيات الفرعية التالية:

- تتنوع تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات بما يتناسب مع مختلف مراحلها، مثل الجمع والفرز والمعالجة، مما يُسهم في تحسين كفاءة هذه العمليات.
- يوفر تطبيق الذكاء الاصطناعي في مجال إدارة النفايات فوائد عديدة كتخفيض التكاليف التشغيلية ورفع معدلات إعادة التدوير وغيرها، إلا أنه يواجه في المقابل تحديات تقنية واقتصادية وتنظيمية قد تحد من فعاليته.
- تُسهم حلول شركة Ecube Labs القائمة على الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة النفايات من خلال توظيف تقنيات المراقبة الذكية وتحليل البيانات.

أهمية الدراسة: تكتسب هذه الدراسة أهميتها من كونها تجمع بين مجالين يحظىان باهتمام الباحثين والأكاديميين في الآونة الأخيرة، وهما الذكاء الاصطناعي كأحد أبرز مجالات

التطور التكنولوجي، وإدارة النفايات باعتبارها ركيزة أساسية لتحقيق الاستدامة البيئية، وذلك من خلال التركيز على الحلول التي يوفرها الذكاء الاصطناعي في هذا السياق.

هدف الدراسة: تهدف هذه الدراسة إلى إبراز دور الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة النفايات، وذلك من خلال استكشاف أبرز تطبيقاته وسبل توظيفها في مختلف مراحلها، إلى جانب تحديد المزايا والتحديات المرتبطة بتطبيقه، وتقييم فعالية الحلول التطبيقية المعتمدة عليه.

منهج الدراسة: سعيًا للإجابة عن إشكالية البحث وتحليل مختلف أبعادها، تم الاعتماد على كل من المنهجين الوصفي والتحليلي، وذلك لوصف الظواهر المدروسة وتحليلها، وتفسير العلاقات القائمة بينها، وصولًا إلى استخلاص نتائج دقيقة تدعم أهداف الدراسة.

الدراسات السابقة: تم الاعتماد على مجموعة من الدراسات السابقة أهمها:

دراسة (برغوت و معوشي ، 2023). هدفت هذه الدراسة إلى تحليل مساهمة الذكاء الاصطناعي في الاقتصاد الدائري، من خلال إبراز دوره في تحسين إدارة النفايات وتعزيز كفاءة عمليات إعادة التدوير. وقد اعتمدت الدراسة على المنهجين الوصفي والتحليلي، بالإضافة إلى دراسة حالة شركة ZenRobotics الفنلندية المتخصصة في تطوير أنظمة الروبوتات الذكية لفرز وإعادة تدوير النفايات. خلّصت هذه الدراسة إلى أن الذكاء الاصطناعي يُسهم في تحسين عمليات الفرز وإعادة التدوير، مما يؤدي إلى تقليل النفايات وتعظيم الاستفادة من الموارد، وهو ما يُسهم في تحقيق أهداف الاقتصاد الدائري. كما أظهرت نتائج دراسة الحالة نجاح شركة ZenRobotics في رفع كفاءة عمليات إعادة التدوير، وخفض التكاليف، وزيادة القيمة الاقتصادية للنفايات.

دراسة (Fuqaha & Nursetiawan, 2025). هدفت هذه الدراسة إلى إبراز دور تقنيات الذكاء الاصطناعي وانتزيت الأشياء في تطوير أنظمة إدارة النفايات، بالإضافة إلى تحليل الفرص والتحديات المرتبطة بتطبيق هذه التقنيات. وقد اعتمدت الدراسة على المنهجين الوصفي والتحليلي، من خلال تحليل مجموعة من الدراسات السابقة ذات الصلة بالموضوع. وعلى إثر ذلك خلّصت الدراسة إلى أن دمج الذكاء الاصطناعي مع انتزيت الأشياء يُسهم في

تقليل التكاليف وتعزيز الاستدامة البيئية عبر زيادة معدلات إعادة التدوير وتقليل الانبعاثات. كما أكدت على أن تعزيز الاستثمار في البنية التحتية التكنولوجية، وتطوير الأطر التنظيمية، وتشجيع التعاون بين مختلف الجهات المعنية، من شأنه الحد من التحديات وتحقيق الاستفادة المثلى من هذه التقنيات في مجال إدارة النفايات.

دراسة (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025). هدفت هذه الدراسة إلى تحليل تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في إدارة النفايات الحضرية ودورها في تعزيز الكفاءة التشغيلية والاستدامة البيئية. أين تم الاعتماد على المنهجين الوصفي والتحليلي من خلال مراجعة منهجية للأدبيات العلمية المنشورة في الفترة الممتدة من 2018 إلى غاية 2025. توصلت الدراسة إلى أن الذكاء الاصطناعي يُسهم في تحسين كفاءة عمليات الجمع والفرز والتنبؤ بالنفايات، مما يؤدي إلى تقليل التكاليف والانبعاثات وتعزيز الاستدامة، كما أبرزت الدراسة أنه رغم هذه التطورات، تظل مراعاة الخصوصيات الجغرافية والديموغرافية للمدن عاملاً أساسياً لتعزيز فعالية هذه الحلول.

دراسة (Snoun, Mufida, Ait El-Cadi, & Delot, 2025). هدفت هذه الدراسة إلى تحليل دور الابتكارات القائمة على الذكاء الاصطناعي في تطوير إدارة النفايات ضمن إطار الاقتصاد الدائري، من خلال استكشاف تطبيقاته المختلفة على المستويات الجزئية والمتوسطة والكلية. وقد اعتمدت الدراسة على المنهجين الوصفي والتحليلي، من خلال مراجعة منهجية للدراسات المنشورة خلال الفترة 2015-2025. توصلت الدراسة إلى أن الذكاء الاصطناعي ومن خلال توظيف تقنيات مثل التعلم الآلي والرؤية الحاسوبية والتحليلات التنبؤية، يُسهم في تحويل إدارة النفايات من نموذج خطي للتخلص منها إلى نظام دائري مغلق يهدف إلى تحسين استخدام الموارد وخلق القيمة، مما يؤدي بشكل كبير إلى تعزيز الاقتصاد الدائري، كما أكدت الدراسة أن نجاح تطبيق الذكاء الاصطناعي في هذا المجال يتطلب تعزيز التعاون بين الباحثين وصناع القرار، إلى جانب تطوير الأطر التنظيمية والتكنولوجية الملائمة.

بناءً على ما سبق، يتضح أن الدراسات السابقة تتقاطع مع الدراسة الحالية في عدة نقاط، خاصة على المستوى النظري، حيث ركزت جميعها على توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في

تحسين كفاءة إدارة النفايات بما يعزز الاستدامة البيئية. وفي هذا السياق، تتقارب الدراسة الحالية إلى حد كبير مع دراسة (Fuqaha & Nursetiawan, 2025) من حيث الطرح النظري، من خلال استعراض تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مختلف مراحل إدارة النفايات، إلى جانب إبراز الفوائد والتحديات المرتبطة بها. كما تتشابه مع دراسة (برغوت و معوشي ، 2023) في اعتماد منهج دراسة الحالة وتحليل شركات رائدة في هذا المجال.

في المقابل، تتميز الدراسة الحالية بجمعها بين الجانبين النظري والتطبيقي، بخلاف معظم الدراسات السابقة والتي يغلب عليها الطابع النظري، كما تُعد أكثر تخصصًا مقارنة بدراسة (برغوت و معوشي ، 2023) لتركيزها على إدارة النفايات ضمن إطار الاقتصاد الدائري. إضافة إلى ذلك، يبرز الاختلاف بين الدراستين في طبيعة الشركات محل الدراسة، حيث تركز هذه الدراسة على شركة Ecube Labs المتخصصة في أنظمة الحاويات الذكية وإدارة جمع النفايات، في حين تناولت الدراسة الأخرى شركة ZenRobotics المتخصصة في تقنيات الروبوتات الموجهة لعمليات الفرز وإعادة التدوير.

1. مدخل نظري لإدارة النفايات

1.1. تعريف النفايات: إن الإلمام الجيد بمفهوم إدارة النفايات، يُحتم علينا التطرق إلى تعريف النفايات أولاً، حيث تُعرف هذه الأخيرة على أنها: "كُل البقايا الناتجة عن عمليات الإنتاج أو التحويل أو الاستعمال، وبصفة عامة كُـل المواد والأشياء المنقولة التي يتخلص منها حائزها أو ينوي التخلص منها بإزالتها بهدف عدم الإضرار بصحة الانسان والبيئة بصفة عامة" (مصطفاوي، 2017، صفحة 166).

كما أنها عُرِفت من وجهة نظر اقتصادية على أنها: "كُل مادة أو شيء قيمته الاقتصادية معدومة أو سلبية بالنسبة لمالكه، وذلك من وجهة نظر اقتصادية" (عبد الجليل ، عبد الهادي صبح ، محمد الغيطاني، و محمد، 2021، صفحة 439).

انطلاقاً من التعاريف السابقة، يمكن القول أن النفايات هي مواد فقدت قيمتها النفعية واقتصادية بالنسبة لمستهملها، والتي يتم التخلص منها للحد من آثارها السلبية على البيئة وعلى صحة الانسان على حد سواء.

2.1. أنواع النفايات: تُصنّف النفايات إلى عدة أنواع باختلاف معايير التصنيف المعتمد عليها. نُلخص أهم أنواع النفايات في الجدول الموالي:

جدول رقم (01): أنواع النفايات.

معيّار التصنيف	أنواع النفايات
مصدر النفايات	نفايات منزلية – نفايات صناعية – نفايات طبية- نفايات زراعية- نفايات الهدم والبنائيات
مكونات النفايات	نفايات عضوية – نفايات غير عضوية
خطورة النفايات	نفايات خطيرة – نفايات غير خطيرة
الحالة الفيزيائية للنفايات	نفايات صلبة – نفايات سائلة – نفايات غازية
قابلية النفايات للتدوير	نفايات قابلة للتدوير – نفايات غير قابلة للتدوير

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على - (حماش ، 2010-2011، الصفحات 72-74) و - (مصطفى، 2017، صفحة 167).

3.1 تعريف إدارة النفايات: يُقصد بإدارة النفايات: "العمليات والممارسات التي تهدف إلى جمع ونقل والتخلص من القمامة والصرف الصحي ومنتجات النفايات الأخرى. والهدف من إدارة النفايات هو زيادة دورة حياة المنتج وإعادة استخدام المواد واستعادتها حيثما أمكن ذلك، من أجل تقليل إجمالي كمية النفايات التي تذهب إلى مكب النفايات وتقليل العبء البيئي. والهدف النهائي المتبع من خلال هذه الممارسة هو إعادة إنشاء مورد قيم والتخلص من القمامة، ولهذا السبب تلعب إدارة النفايات دورًا حاسمًا في دعم التنمية المستدامة والانتقال نحو الاقتصاد الدائري" (الجعافرة ، 2024 ، صفحة 832). وتُعرف أيضًا بأنها "مراقبة هادفة ومنهجية لتوليد النفايات وتخزينها وجمعها ونقلها وفصلها ومعالجتها وإعادة تدويرها واستردادها والتخلص منها بطريقة صحية ومقبولة من الناحية الجمالية والاقتصادية" (تقرّارت ، بوجمعة ، ومزياني ، 2019 ، صفحة 27)

وعليه يمكن القول إن إدارة النفايات تتضمن التعامل مع النفايات من لحظة إنتاجها وحتى التخلص منها. حيث تتطلب الوقوف على كل مرحلة من مراحل إدارة النفايات من جمعها، مروراً إلى نقلها وصولاً إلى معالجتها والتخلص النهائي منها أو إعادة تدويرها.

4.1. الأشكاليات المرتبطة بإدارة النفايات: نلخصها في النقاط التالية:

- الارتفاع المتزايد والمتسارع لحجم النفايات، حيث من المتوقع أن يبلغ حجم النفايات عالمياً ما قيمته 3.4 بليون طن بحلول عام 2025 (Arya, Sharma, Tripathi, & Singh, 2023, p. 1438).

- ضعف البنى التحتية المناسبة وارتفاع تكاليف الاستثمار فيها (الجعافرة ، 2024 ، صفحة 834). حيث أن استخدام مساحات شاسعة من الأراضي كمكبات للنفايات يُحد من فرص استخدام الأراضي لأغراض بديلة، مثل الزراعة أو البناء أو الصناعة. وهذا يقلل من الإمكانيات الاقتصادية للمناطق ويتطلب موارد مالية كبيرة لإدارة النفايات واستصلاح الأراضي (Linde, et al., 2024, p. 156).

- يؤثر قرب مكبات النفايات من المناطق السكنية سلباً على جودة حياة المجتمعات. وتؤدي المخاوف بشأن المخاطر الصحية بين السكان إلى تقليل جاذبية المناطق للاستثمار، وتخلق ظروفًا معيشية غير مريحة (Linde, et al., 2024, p. 156).

- نقص القوانين واللوائح التنظيمية المنظمة لإدارة النفايات.

- نُقص الوعي المجتمعي وعدم كفاية التثقيف حول كيفية التعامل مع النفايات بشكل صحيح (الطراونة، 2024، صفحة 159).

- عجز الأنظمة التقليدية، والمعتمدة على العنصر البشري بشكل مُكثف، على احتواء مشكل النفايات وإدارتها بكفاءة.

- التخلص غير القانوني من النفايات وما ينتج عنه من مخاطر صحية وبيئية مثل تلوث التربة والممرات المائية وتلوث الهواء (الجعافرة ، 2024 ، صفحة 834).

2. الإطار المفاهيمي للذكاء الاصطناعي

1.2. تعريف الذكاء الاصطناعي: يُعتبر الذكاء الاصطناعي من أهم مظاهر التطور التكنولوجي في العصر الحالي، وقد عرفه John McCarthy على أنه: "وسيلة لصنع جهاز كمبيوتر أو روبوت يتم التحكم فيه عن طريق الكمبيوتر، أو برنامج يفكر بذكاء بالطريقة نفسها التي يفكر بها البشر الأذكياء، ويتم تحقيق الذكاء الاصطناعي من خلال دراسة كيف يفكر الدماغ البشري. وكيف يتعلم البشر ويقررون ويعملون أثناء محاولة حل مشكلة ما، ثم استخدام نتائج هذه الدراسة كأساس لتطوير برامج وأنظمة ذكية" (هاشي و ملياني، 2023، صفحة 50).

كما عرفه Lucci & Kopec على أنه: "القدرة على إنشاء برامج كمبيوتر أو أنظمة تظهر تفكيراً مماثلاً لتفكير البشر، لعرض خصائص مرتبطة عادة بالذكاء البشري. هذا الذكاء قادر على إدراك محيطه وتحليله والتفاعل معه، فضلاً عن التعلم من الخبرة السابقة وحل القضايا الصعبة دون الحاجة إلى تدخل بشري" (رزق الله ، 2025 ، صفحة 135).

أي أن الذكاء الاصطناعي هو محاولة جعل الآلة تُحاكي العقل البشري في طريقة التفكير، التعلم واتخاذ القرار. حيث أصبح اليوم قادراً على القيام بمهام معقدة تتجاوز الكفاءة البشرية.

2.2. خصائص الذكاء الاصطناعي: يتميز الذكاء الاصطناعي بمجموعة من القدرات والمميزات التي تُمكن الأنظمة الذكية من محاكاة بعض جوانب الذكاء البشري. من أهم هذه الخصائص نذكر ما يلي (هاشي و ملياني، 2023 ، صفحة 50، 51):

- القدرة على التعلم المتواصل والمستمر والتكيف مع المواقف الجديدة. حيث يستخدم الذكاء الاصطناعي البيانات والتجارب السابقة في تحسين قدراته وتطويرها أكثر.

- القدرة على تحليل البيانات الضخمة، وربطها ببعضها البعض. فالذكاء الاصطناعي يستطيع التعامل مع كم هائل من البيانات بسرعة وبدقة عالية، وهو ما يجعله قادراً على حل المشكلات المعقدة وتقديم الحلول الملائمة.

- القدرة على اتخاذ القرارات، فالذكاء الاصطناعي يُطبق عمليات الاستدلال المنطقي لحل القضايا التي تتطلب مهارة أو كفاءة بشرية.

- القدرة على التفاعل، حيث تشير إلى تمكّن الأنظمة الذكية من التواصل مع المستخدمين أو مع أنظمة أخرى بطريقة تحاكي التفاعل البشري.

3.2. فروع الذكاء الاصطناعي: هناك عدة مجالات فرعية تندرج تحت مظلة الذكاء الاصطناعي، حيث يركز كل فرع على جانب معين من محاكاة الذكاء البشري. من أبرز هذه الفروع نذكر:

1.3.2. تعلم الآلة (Machine Learning (ML: يهدف في جوهره إلى تمكين الأنظمة الحاسوبية من اكتساب المعرفة والمهارات انطلاقاً من البيانات، وذلك لتحسين التنبؤات والقرارات (Barik & Padh, 2020).

2.3.2. معالجة اللغات الطبيعية Natural Language Processing: وهي عبارة عن مجموعة من البرامج والنظم يتم تطويرها من أجل تمكين الكمبيوتر من التعامل مع اللغة البشرية بشكل طبيعي (هاشي و ملياني، 2023، صفحة 52). حيث أصبح الآلة قادرة على فهم وفك رموز اللغات وتحليلها واستخراج المعلومات منها.

3.3.2. الرؤية بالحاسوب Computer Vision: هو فرع من فروع الذكاء الاصطناعي التي تُمكن الآلة من التعرف على الأشخاص والأشكال بطريقة تُشبه قدرة الإنسان على الرؤية (هاشي و ملياني، 2023، صفحة 52)، وهو ما يتيح للآلة فرز الأشياء وتصنيفها انطلاقاً من الصور والفيديوهات.

4.3.2. النُظم الخبيرة Expert Systems: هو نظام في مجال الذكاء الاصطناعي قائم على المعرفة، يعتمد على استخدام معلومات متخصصة ضمن مجال محدد، ويُطبق عمليات الاستدلال المنطقي لحل القضايا التي تتطلب مهارة أو كفاءة بشرية (رزق الله ، 2025، صفحة 135). حيث تسمح هذه النُظم للآلة من التصرف كخبير واتخاذ قرارات معقدة.

5.3.2. الروبوتات Robotics: تُمثل الروبوتات فرعاً مهماً للذكاء الاصطناعي، أين يتم دمج هذا الأخير مع الآلات للقيام بمهام مادية (هاشي و ملياني، 2023، صفحة 52).

3. توظيف الذكاء الاصطناعي في مجال إدارة النفايات

1.3. أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي عبر مراحل إدارة النفايات: تتدخل تطبيقات الذكاء الاصطناعي في كل مرحلة من مراحل إدارة النفايات، وفيما يلي سنستعرض بشيء من التفصيل مختلف هذه التطبيقات عبر كل مرحلة:

1.1.3. تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مرحلة توليد النفايات: تعتبر التحليلات التنبؤية من أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذه المرحلة. إذ يعتمد الذكاء الاصطناعي على تحليل البيانات التاريخية المرتبطة بإنتاج النفايات، إلى جانب متغيرات أخرى مثل الظروف المناخية والاتجاهات الديموغرافية، مما يسمح ببناء نماذج تنبؤية فعالة (Arya, Sharma, Tripathi, & Singh, 2023, p. 1439). ويساهم ذلك في تمكين هيئات إدارة النفايات من تبني استراتيجيات استباقية، تشمل تحسين مسارات الجمع، وتعزيز كفاءة تخصيص الموارد، فضلاً عن التخطيط الأمثل لتطوير البنية التحتية (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3360).

2.1.3. تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مرحلة جمع ونقل النفايات: تُعد عمليتا جمع النفايات ونقلها مرحلتين مرتبطتين ضمن منظومة إدارة النفايات، ومن أبرز التطبيقات المستخدمة في هاتين المرحلتين نذكر ما يلي:

- أنظمة الحاويات الذكية للنفايات (Smart Bin Systems): تُعد الحاويات الذكية للنفايات من أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي وأتترنت الأشياء في مجال إدارة النفايات، حيث تجاوزت وظيفتها التقليدية، لتصبح أنظمة رقمية قادرة على جمع البيانات والتواصل مع الجهات المعنية. إذ يتم تزويد هذه الحاويات بأجهزة استشعار فوق الصوتية (Sensors)، إلى جانب تقنيات اتصال مثل شبكات Wi-Fi أو شبكات الهاتف المحمول، مما يتيح جمع البيانات ومعالجتها بكفاءة. وتُستخدم هذه البيانات في التنبؤ بمستويات امتلاء الحاويات، وتحسين جدولة عمليات جمع النفايات، الأمر الذي يساهم في التقليل من التكاليف التشغيلية وتعزيز

كفاءة استهلاك الطاقة (الهيئة السعودية للبيانات والذكاء الاصطناعي SDAIA، نوفمبر 2024). علاوةً على ذلك، تتيح هذه الحاويات إمكانية المراقبة اللحظية لحالتها التشغيلية، مع ضمان التدفق المستمر للبيانات نحو الجهات المختصة، حيث يتم الإبلاغ عن حالة الحاويات من خلال إرسال البيانات إلى خوادم سحابية مركزية في أوقات محددة، أو عبر تنبيهات فورية مثل الرسائل النصية القصيرة عند بلوغ مستوى امتلاء الحاويات 80% من سعتها (Richard, 2025, p. 8)، الأمر الذي يعزز من تبني استراتيجيات الصيانة الاستباقية ويساهم في تحسين جودة الخدمات المقدمة (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 29). كما تُمكن الحاويات الذكية من مراقبة مستويات النفايات، والرطوبة الداخلية، ودرجة الحرارة، والكشف عن الغازات الضارة، إلى جانب توفير خصائص متقدمة مثل كبس النفايات لتقليل حجمها، أو استشعار الروائح، وإصدار تنبيهات في حالة التلوث أو الامتلاء الزائد (Snoun, Mufida, Ait El-Cadi, & Delot, 2025, p. 5).

- أنظمة الجدولة الديناميكية: تُعرّف الجدولة الديناميكية في مجال إدارة النفايات بأنها منهجاً متقدماً يقوم على التحديث المستمر لبرامج جمع النفايات اعتماداً على كِلِّ من البيانات اللحظية والتاريخية، بدلاً من الاعتماد على جداول زمنية ثابتة. وتُعدّ هذه المقاربة من أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي في هذا المجال، نظرًا لارتكازها على تقنيات التحليل التنبؤي ودعم اتخاذ القرار في الوقت الحقيقي. فضلاً عن ذلك، يتم دمج أنظمة الجدولة الديناميكية مع تطبيقات الهاتف المحمول ومنصات الاتصال، بما يتيح توفير تحديثات وإشعارات آنية للعاملين، ويسهم في تعزيز كفاءة التنسيق بين مختلف الأطراف المعنية (Olawade, et al., 2024, p. 249).

- أنظمة تحسين المسارات: وهي أنظمة قائمة على الذكاء الاصطناعي تهدف إلى تحديد المسار الأمثل لشاحنات جمع ونقل النفايات، من حيث الوقت والتكلفة واستهلاك الوقود. وتعتمد هذه الأنظمة على تحليل كميات كبيرة من البيانات الزمنية والمكانية، مثل حالة المرور، وأوقات التوقف، ومواقع نقاط الخدمة، وسعة المركبات، ثم اقتراح المسارات الأكثر ملاءمة وفقاً لمعايير متعددة في آن واحد، وليس فقط وفق معيار المسافة الأقصر. كما يمكن لهذه

الأنظمة التكيف مع المتغيرات اللحظية كالحوادث والازدحام وإغلاقات الطرق، مما يزيد من المرونة التشغيلية والقدرة على الاستجابة للظروف المتغيرة، وهو ما يؤدي في نهاية المطاف إلى تحسين مسارات جمع النفايات وبالتالي التقليل من المسافات المقطوعة بشكل كبير، مما يؤدي إلى توفير في الوقت والوقود وخفض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3360). حيث أظهرت الدراسات أن تطبيق تحسين المسارات القائم على الذكاء الاصطناعي يُحقق انخفاضًا يصل إلى 36.8% في مسافات النقل، و13.35% في التكاليف (Snoun, Mufida, Ait El-Cadi, & Delot, 2025, p. 03).

3.1.3. تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مرحلة فرز النفايات: من أهم

التطبيقات المستخدمة في هذه المرحلة نذكر:

- الرؤية الحاسوبية، تُعد الرؤية الحاسوبية من أبرز تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجال إدارة النفايات، إذ تُستخدم في التعرف على أنواع النفايات وفرزها آليًا بالاعتماد على تحليل الصور ومقاطع الفيديو الملتقطة عبر الكاميرات المثبتة على المركبات أو داخل محطات إعادة التدوير (البقوم، 2024، صفحة 248). وتُسهم هذه التقنيات في تسريع عمليات التصنيف والفرز بشكل ملحوظ (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 31). كما تُتيح فصل النفايات إلى فئات متعددة مثل القمامة، والبلاستيك، والورق، والمعادن، والزجاج، أو الكرتون بدقة تبلغ 92% (Snoun, Mufida, Ait El-Cadi, & Delot, 2025, p. 5). إضافة إلى ذلك يُمكن توظيف هذه التقنية عبر تطبيقات الهاتف الذكية، لمسح صور النفايات المنزلية وتقديم إرشادات مخصصة لفرزها والتخلص منها، فضلًا عن إنشاء نماذج محاكاة ثلاثية الأبعاد لأساليب التعبئة المثلى، الأمر الذي يُسهم في تحسين جودة عمليات إعادة التدوير والحد من مستويات التلوث في محطات المعالجة (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3360).

- أنظمة الفرز باستخدام الروبوتات، أدى دمج الروبوتات مع الذكاء الاصطناعي إلى تطوير أنظمة فرز النفايات بشكل آلي بالكامل، حيث يتكون الروبوت من وحدة رؤية حاسوبية مزودة بآلة تصوير عالية الدقة لتحليل النفايات وتصنيفها بصريًا، وأجهزة استشعار وذراع

متعددة الدرجات مزودة بحساسات للحركة والضغط للتحكم الدقيق في التقاط النفايات وتصنيفها بدقة بناءً على تركيبها (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 31). وبالتالي فهي مُصممة للتمييز بين البلاستيك، المعادن، الزجاج، الورق والنفايات العضوية مما يؤدي إلى فرز أكثر كفاءة وتقليل التلوث.

● أنظمة الفرز المعتمدة على المستشعرات، تُعدّ أنظمة الفرز المعتمدة على المستشعرات من التقنيات المتقدمة المستخدمة في فرز النفايات، حيث تعتمد على مجموعة من الحساسات الذكية مثل مستشعرات الأشعة تحت الحمراء، والمستشعرات المغناطيسية، ومستشعرات الكثافة والوزن، وذلك للتعرف على خصائص المواد المختلفة وتصنيفها بدقة استنادًا إلى خصائصها الفيزيائية والكيميائية. ومن خلال التكامل بين المستشعرات المتقدمة، وتقنيات الرؤية الحاسوبية، والأنظمة الروبوتية، وأساليب التعلم الآلي، تؤدي تقنيات الفرز الحديثة دورًا محوريًا في الحد من التلوث وتحسين كفاءة إعادة التدوير. ومع استمرار التطور في هذه التقنيات، يُتوقع أن تسهم بشكل كبير في تحقيق أهداف الاستدامة الشاملة في مجال إدارة النفايات (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 33).

4.1.3. تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مرحلة إعادة تدوير النفايات

من أهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في مجال إعادة التدوير نذكر ما يلي:

● الأنظمة الذكية لتحديد المواد وفرزها: يعمل الذكاء الاصطناعي على تعزيز عملية إعادة التدوير من خلال الاعتماد على الفرز الذكي للمواد، حيث يؤدي دمج هذه العمليات إلى تقليل النفايات وخفض التكاليف التشغيلية، إلى جانب تعزيز معدلات التدوير بشكل كبير، إذ تُشير الدراسات إلى أن الأنظمة المعتمدة على الذكاء الاصطناعي قادرة على فرز أكثر من 160 وحدة في الدقيقة، مقابل 30 إلى 40 وحدة فقط عند الاعتماد على العنصر البشري (Fotovvatikhah, Ahmedy, Md Noor, & Umair Munir, 2025). كما تم توظيف تقنيات متقدمة أخرى في عملية فرز النفايات، مثل تقنيات إزالة الشوائب وغيرها (Richard, 2025, p. 09). يساهم التصوير فائق الطيف وأجهزة الاستشعار المتطورة بشكل كبير في تحسين الكشف عن النفايات المعقدة والمختلطة وفصلها إلى نفايات عضوية وأخرى غير عضوية، كما تُستخدم

نماذج التعلم العميق (DL)، وخاصة الشبكات العصبية التلافيفية (CNN)، على نطاق واسع لتحليل الخصائص البصرية وتصنيف المواد المختلفة بدقة فائقة مما يسهم في تقليل الأخطاء في التصنيف وبالتالي زيادة نسبة المواد المعاد تدويرها (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 33).

● نماذج تحسين إعادة تدوير النفايات، تُعد تقنيات تحويل النفايات من المجالات الحيوية التي شهدت تطوراً ملحوظاً بفضل توظيف الذكاء الاصطناعي، حيث أسهمت في تحسين أداء عمليات متقدمة مثل التحلل الحراري والتغويز، مما أتاح تحويل النفايات إلى طاقة (Waste-TO-Energy) بشكل أكثر فعالية (Arya, Sharma, Tripathi, & Singh, 2023, p. 1440). ويؤدي الذكاء الاصطناعي دوراً محورياً في تعزيز استرجاع الطاقة من خلال تعديل درجة الحرارة والضغط والمعايير الأخرى في الوقت الفعلي، وهو ما ينعكس إيجابياً على الكفاءة التشغيلية. ومع تطور تقنيات الذكاء الاصطناعي، يُتوقع أن يُسهم تكاملها مع أنظمة تحويل النفايات إلى طاقة في تعزيز الاستدامة ودعم مبادئ الاقتصاد الدائري (Tiwari & pallavi, 2025, p. 486). ويتحقق ذلك من خلال تقليل الاعتماد على المكبات التقليدية، وتعزيز معدلات استرجاع المواد القابلة لإعادة التدوير، فضلاً عن تحسين مستويات السلامة المهنية وظروف العمل عبر الحد من المناولة اليدوية للنفايات (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3360).

5.1.3 تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في مرحلة مراقبة نظام إدارة النفايات: تُعدّ مرحلة مراقبة نظام إدارة النفايات من المراحل الحيوية التي تهدف إلى تتبع أداء مختلف العمليات المرتبطة بإدارة النفايات، وضمان كفاءتها واستدامتها. تُستخدم في هذه المرحلة جُلّ التطبيقات السالفة الذكر، وتعمل بشكل مُتكامل مع بعضها البعض لضمان تحسين كفاءة نظام إدارة النفايات ككل. حيث تُستخدم التحليلات التنبؤية للتخطيط من أجل تحسين البنى التحتية في المناطق الحضرية (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3357). فضلاً عن التنبؤ بالانبعاثات الناتجة عن المكبات والحد منها (Tiwari & pallavi, 2025, p. 487). كما أن استخدام إنترنت الأشياء (IOT) وأجهزة الاستشعار (Sensors) يُسهم في تسهيل تبادل البيانات، وتمكين المواطنين من استخدامهما

لتحديد مواقع صناديق القمامة بسرعة أكبر، وفرز نفاياتهم بشكل صحيح، والانضمام إلى مبادرات إدارة النفايات الجماعية. وضمان التواصل السلس بين مكونات مراقبة النفايات المختلفة، وتحسين الفعالية التشغيلية (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 34). كما يمكن لكاميرات المراقبة والطائرات بدون طيار التي تعمل بالذكاء الاصطناعي الكشف فوراً عن عمليات إلقاء النفايات غير القانونية، مما يمكن السلطات من الاستجابة بسرعة واتخاذ التدابير اللازمة.

2.3. فوائد استخدام الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات: إن توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في مجال إدارة النفايات يُحقق العديد من المزايا، نذكر منها ما يلي:

1.2.3. الفوائد التشغيلية، يسهم الذكاء الاصطناعي في تحسين الكفاءة التشغيلية لنظم إدارة النفايات من خلال تحسين مسارات جمع النفايات وتقليل الزمن المُستغرق في عمليات الجمع، حيث تشير بعض الدراسات إلى إمكانية خفضه بنسبة تقارب 28% مقارنة بالطرق التقليدية (البقوم، 2024، صفحة 250). كما يساهم في تقليل المسافات المقطوعة، والتي قد تنخفض بنسب معتبرة قد تصل إلى نحو 40.52% وفقاً لبعض التقديرات (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3356). إضافةً إلى ذلك، يُمكن الذكاء الاصطناعي من التنبؤ بكميات النفايات وتحديد فترات الذروة، مما يعزز كفاءة التخطيط وتخصيص الموارد. كما يُسهم في تحسين عمليات الفرز من خلال تسريعها والحد من الأخطاء، حيث يمكن أن تحقق تقنيات الفرز الذكي مستويات دقة مرتفعة قد تصل إلى نحو 92% (Snoun, Mufida, Ait El-Cadi, & Delot, 2025, p. 5).

2.2.3. الفوائد الاقتصادية: إن الاعتماد على الجداول الديناميكية وأنظمة تحسين المسارات يساعد على اختيار المسار الأمثل لنقل النفايات من حيث الزمن والتكلفة. حيث تشير بعض الدراسات إلى إمكانية تحقيق تخفيضات ملحوظة في تكاليف النقل قد تصل إلى نحو 36.3%، وهو ما ينعكس في تقليص التكاليف الإجمالية بنحو 13.3% (البقوم، 2024، صفحة 250). كما يُسهم هذا النهج في تقليل الاعتماد على العمالة اليدوية، وإعادة توجيهها نحو مهام ذات قيمة مضافة أعلى. وعلاوةً على ذلك، يدعم الذكاء الاصطناعي تعظيم الاستفادة من

النفائيات من خلال تحويلها إلى مصادر للطاقة، بما يعزز الكفاءة الاقتصادية ويساهم في الاستخدام الأمثل للموارد. (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3356)

3.2.3. الفوائد البيئية، يُسهم توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في الحد من الانبعاثات الكربونية بشكل ملحوظ، فعلى سبيل المثال، أدى استخدام الحاويات الذكية في مدينة برشلونة إلى خفض انبعاثات شاحنات جمع النفائيات بنسبة بلغت 40% (Linde, et al., 2024, p. 163). كما أنه يسهم في تعزيز كفاءة عمليات إعادة التدوير والحد من الكميات الموجهة إلى المكبات التقليدية، ففي هذا السياق، أظهر نظام فرز النفائيات المدعوم بالذكاء الاصطناعي في سنغافورة قدرة ملحوظة على تقليص الاعتماد على المكبات بنسبة 30%، إلى جانب رفع معدلات إعادة التدوير بنسبة 20% (Linde, et al., 2024, p. 163). وعلاوةً على ذلك، يُسهم الذكاء الاصطناعي في إدارة دورة حياة المواد من خلال تسهيل استعادة الموارد وإعادة توظيفها ودمجها في عمليات الإنتاج، بما يدعم مبادئ الاقتصاد الدائري ويعزز تحقيق أهداف الاستدامة البيئية (برغوت و معوشي، 2023، صفحة 137).

4.2.3. الفوائد الاجتماعية: يُسهم توظيف الذكاء الاصطناعي في إدارة النفائيات في تحسين جودة الحياة داخل المدن من خلال الحد من المشكلات الحضرية. إذ تُمكن هذه التقنيات الجهات المعنية من التعامل بفعالية مع تحديات مثل النمو السكاني وارتفاع كميات النفائيات، من خلال أنظمة ذكية تتيح المراقبة والتدخل في الوقت المناسب، مما يقلل من تراكم النفائيات وانتشار الروائح الكريهة والمخاطر الصحية (ملاس، 2024، صفحة 27). كما أن تحليل أنماط استهلاك المواطنين وتحديد المواقع المناسبة لمرافق إدارة النفائيات يضمن توزيعاً أكثر عدالة وكفاءة للخدمات، ويعزز رفاهية السكان (البقوم، 2024، صفحة 245). كما يُعزز الذكاء الاصطناعي إشراك المواطنين في إدارة النفائيات عبر تطبيقات رقمية تقدم إرشادات للفرز السليم، بما يدعم الوعي البيئي والإدارة التشاركية (ملاس، 2024، صفحة 27).

3.3. تحديات استخدام الذكاء الاصطناعي في إدارة النفائيات

على الرغم من أن توظيف الذكاء الاصطناعي في مجال إدارة النفائيات يحقق العديد من المزايا، إلا أن تطبيقه مازال يواجه تحديات وقيود كثيرة. نذكر منها ما يلي:

1.3.3. صعوبة الوصول إلى البيانات وموثوقيتها: تعتمد نماذج الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات على مجموعات بيانات واسعة ومتنوعة لضمان تنبؤات دقيقة، غير أن هذه البيانات غالبًا ما تكون غير مكتملة، غير منظمة، أو تفتقر إلى معايير توحيد قياسية. فضلًا عن محدودية التكامل بين مختلف الأطراف المعنية، مما يُعقّد تطوير وتنفيذ حلول فعّالة (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 35). علاوة على ذلك، يظل تكيف هذه النماذج مع الاختلافات الجغرافية والاجتماعية والاقتصادية تحديًا كبيرًا، إذ إن الحلول الناجحة في سياق معين قد لا تحقق نفس الفعالية في سياقات أخرى (Idrovo-Hurrel, Morán-Herrera, & Peralta, 2025, p. 3360).

2.3.3. مخاوف بشأن الخصوصية: حيث تتضمن تطبيقات الذكاء الاصطناعي معالجة معلومات حساسة، بما في ذلك أنماط التخلص من النفايات وسلوكيات المستخدمين، مما يثير مخاوف تتعلق بالخصوصية والأمن. تُعد حماية هذه البيانات أمرًا بالغ الأهمية للحفاظ على ثقة الجمهور وضمان الامتثال للمعايير التنظيمية. (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 35).

3.3.3. تحديات مالية: يُعَدّ توسيع نطاق استخدام الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات من العمليات التي تتطلب استثمارات أولية مرتفعة، تشمل تطوير البرمجيات وتصميم الخوارزميات واقتناء الأجهزة المتخصصة. كما تبرز الحاجة إلى تطوير حلول تكنولوجية فعّالة من حيث التكلفة وقابلة للتكامل مع البنى التحتية القائمة (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 36).

4.3.3. تحديات أخلاقية: يثير دمج الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات مخاوف أخلاقية كبيرة، لا سيما فيما يتعلق بالتحيزات المحتملة وعدم المساواة الكامنة في خوارزميات الذكاء الاصطناعي، فمثلاً إذا تم تدريب الخوارزميات على بيانات في مناطق سكنية تتميز بخصائص فريدة، فإنها لن تعمل بنفس الكفاءة في المناطق السكنية الأخرى. وهو ما يؤدي إلى تفاقم مشكل عدم المساواة في الخدمات، حيث تحصل بعض المناطق على خدمة أفضل من غيرها بسبب تحيز البيانات (Fuqaha & Nursetiawan, 2025, p. 36).

4. دراسة حالة شركة Ecube Labs

1.4. نبذة عامة عن شركة Ecube Labs: تُعدّ شركة Ecube Labs من الشركات الناشئة الرائدة في مجال تقديم حلول مبتكرة لإدارة النفايات، حيث تأسست سنة 2011 في مدينة سيول بكوريا الجنوبية، في سياق التوجه العالمي نحو توظيف تقنيات إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي في تطوير المدن الذكية. تتواجد هذه الشركة جغرافيا من خلال موزعيها، حيث يمكن أن تجد منتجاتها في أكثر من 314 بلدية حول العالم (Ecube Labs)

2.4. منتجات الذكاء الاصطناعي التي تقدمها شركة Ecube Labs في إدارة النفايات

تقدم شركة Ecube Labs مجموعة من المنتجات والحلول والتي تُكوّن فيما بينها نظاما متكاملًا يركز على جمع ونقل النفايات. والجدول الموالي يوضح هذه المنتجات:

جدول رقم 2: أهم منتجات شركة Ecube Labs.

الصفات المنتج	الوصف	الوظيفة	المزايا والاستخدامات الشائعة
CleanCUBE	حاويات ذكية تعمل بالطاقة الشمسية مزودة بنظام ضغط وحساسات	تضغط النفايات تلقائيا	- زيادة سعة الحاويات. تستخدم في المناطق ذات الكثافة السكانية المرتفعة مثل مراكز المدن، المراكز التجارية والحدائق ومناطق الجذب السياحي.
CleanFLEX	جهاز استشعار لاسلكي لقياس مستوى امتلاء الحاويات	قياس مستوى الامتلاء وإرسال البيانات في الوقت الحقيقي	الكشف عن مستوى امتلاء الحاويات في الوقت الحقيقي. يستخدم في المناطق التي توجد فيها حاويات متباعدة أو في المناطق النائية.
City Clean Network (CNN)	منصة سحابية لتحليل بيانات النفايات في الوقت الفعلي	جمع البيانات وتفسيرها لدعم اتخاذ القرار.	التنبؤ بعدد الحاويات اللازمة، إعداد جدول زمني أمثل لجمع النفايات وكذا تقليص عدد رحلات جمع النفايات. يستخدم في البلديات، شركات النظافة والهيئات المشرفة على جمع النفايات

تحسين مسارات النقل وتقليل التكاليف والوقت.	إدارة الأسطول وتحسين عمليات النقل والتتبع	منصة لإدارة أسطول مركبات جمع النفايات وتتبعها	CNNx Fleet Management Platform
--	---	---	--------------------------------

المصدر: من إعداد الباحثة بالاعتماد على (Ecube Labs).

انطلاقاً من المعطيات الواردة في الجدول السابق، يتبين أن شركة Ecube Labs تقدم منظومة متكاملة من الحلول الذكية التي تجمع بين الأجهزة المتصلة ومنصات تحليل البيانات. حيث تسمح هذه الحلول بمراقبة امتلاء الحاويات، الجدولة الديناميكية لعمليات جمع النفايات، تحسين المسارات وإدارة الأسطول، مما يسهم في تحسين كفاءة عمليات جمع النفايات ونقلها، ودعم اتخاذ القرار القائم على البيانات. وتستخدم هذه الحلول من قبل جهات متنوعة، تشمل البلديات، والمراكز التجارية، والمؤسسات الجامعية، إلى جانب الشركات المتخصصة في خدمات جمع النفايات.

3.4. تجارب تطبيقية لحلول شركة Ecube Labs

1.3.4. تجربة مدينة سيول (كوريا الجنوبية): تُعدّ مدينة سيول من بين أكثر المدن ازدحاماً على مستوى العالم، إذ تتميز بكثافة سكانية مرتفعة، فضلاً عن كونها مركزاً حضرياً رئيسياً. وهو ما فرض تحديات كبيرة على الحكومة، لا سيما فيما يتعلق بتفاقم مشكلة تراكم النفايات وعدم كفاية عمليات جمعها اليومية، التي كانت تتراوح بين أربع وخمس مرات.

بناءً عليه، قررت الحكومة استخدام الحلول الذكية لشركة Ecube Labs، حيث قامت بلدية سيول في عام 2014 بتركيب 85 حاوية "CleanCube" للنفايات العامة والمواد القابلة لإعادة التدوير، واستخدام أنظمة CNN لمراقبة هذه الحاويات ومستوى امتلائها، ورصد كفاءة عملية الجمع في جميع أنحاء المدينة (Ecube Labs).

خلال فترة زمنية وجيزة لم تتجاوز ثلاثة أشهر من اعتماد هذه الحلول، شهدت مدينة سيول تحسناً ملحوظاً في مستوى النظافة العامة. إذ سُجّل انخفاض كبير في حجم النفايات الفائضة، إلى جانب تراجع واضح في انتشار القمامة في الفضاءات الحضرية. وكنتيجة مباشرة لذلك، انخفضت وتيرة عمليات جمع النفايات بنسبة بلغت 66%، كما تقلّصت تكاليفها بنحو

83%. فضلاً عن ذلك، برز تحسن في الأداء البيئي للمدينة من خلال ارتفاع معدل إعادة التدوير ليصل إلى 46% (Ecube Labs).

2.3.4. تجربة مدينة بالتيمور في الويات المتحدة الأمريكية: في إطار سياسة الحكومة للتوجه نحو تبني مقاربة المدن الذكية، تم اللجوء في سبتمبر سنة 2018 إلى استخدام منتجات شركة Ecube Labs، من أجل الإدارة الذكية للنفايات. حيث تم تركيب 280 حاوية ضغط من نوع CleanCube تعمل بالطاقة الشمسية، بالإضافة إلى 28 حاوية إضافية من نفس النوع ولكن غير قابلة للضغط ومزودة بمستشعرات من نوع CleanFLEX (من أجل المواد القابلة للتدوير).

أسهمت هذه الحلول في تحسين كفاءة منظومة جمع النفايات بشكل ملحوظ، حيث سُجِّل تراجع كبير في وتيرة عمليات الجمع بنسبة تقارب 98%، إذ انخفضت من مرتين يوميًا لكل حاوية إلى متوسط يقارب مرة واحدة شهريًا. مما انعكس على تقليل استهلاك الوقود، والازدحام وبالتالي تقليل الانبعاثات الكربونية (EcubeLabs, 2021).

3.3.4. تجربة مدينة ملبورن في أستراليا: في ظل محدودية الأنظمة التقليدية لإدارة النفايات، وسعيًا إلى الحفاظ على جودة المشهد الحضري، اتجهت المدينة إلى تبني منتجات شركة Ecube Labs في مطلع عام 2018. وقد تم استبدال الحاويات التقليدية بـ 397 حاوية من نوع CleanCUBE تعمل بالطاقة الشمسية داخل المنطقة التجارية للمدينة، مع دمجها بنظام CNN بهدف توفير بيانات تشغيلية دقيقة وإصدار إشعارات مخصصة.

وقد أسهم هذا التحول في إحداث نقلة نوعية في إدارة النفايات؛ إذ تراجعت وتيرة عمليات الجمع بنسبة 96.3%، بعدما كانت تُقدَّر بمعدل مرة كل ست ساعات تقريبًا، لتصبح مرة واحدة كل سبعة أيام. كما انخفض حجم النفايات الشهرية بنسبة 95.4% مقارنة بالتقديرات المتحفظة السابقة المرتبطة بالحاويات التقليدية. وإضافة إلى ذلك، سجلت المدينة انخفاضًا ملحوظًا في حالات الامتلاء المفرط للحاويات (Ecube Labs, 2021).

تشير التجارب التطبيقية للمدن السابقة في اعتماد حلول شركة Ecube Labs، إلى فعالية توظيف الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة عمليات جمع النفايات ونقلها. فقد أسهمت هذه

الحلول بالدرجة الأولى في تقليص وتيرة عمليات الجمع بشكل ملحوظ حسب ما ورد في النتائج المذكورة سابقا، وساهمت في تخفيض التكاليف المرتبطة بهذه العمليات فضلا عن تحسين معدلات إعادة التدوير، إلى جانب تحسين جودة البيئة الحضرية من خلال الحد من تراكم النفايات وانتشارها. بالإضافة إلى الإسهام في تعزيز الأداء البيئي عبر رفع معدلات إعادة التدوير وتقليل الانبعاثات.

ومع ذلك، فإن نجاح هذه المدن في الاستفادة من تطبيقات الذكاء الاصطناعي وتحقيق نتائج ايجابية على مستوى جمع النفايات ونقلها، لا يجعلنا نجزم على نجاعة هذه الحلول دون أي قيود أو شروط. لأن النماذج المعروضة هي تجارب لمدن تمثل بيئات حضرية طموحة، تملك البنية التحتية الرقمية والإرادة السياسية لتبني الابتكار والاتجاه نحو المدن الذكية. وعليه فإن تحقيق أفضل النتائج يبقى مرهونا بعدة عوامل كتوافر بنية تحتية تكنولوجية ملائمة (شبكة إنترنت قوية)، وقدرات تمويلية كافية، إلى جانب مراعاة الخصوصيات الحضرية والعادات الاستهلاكية والسلوكية لكل مدينة، فالوعي المجتمعي له تأثير كبير في نجاح أي نظام لإدارة النفايات.

خاتمة

إن الاهتمام المتنامي بمجال إدارة النفايات له مبرراته الاقتصادية والبيئية، فالسعي المتزايد لحل واحدة من المشاكل التي أرقت الدول والشركات على حد سواء، جعل الجهود تتضافر لإيجاد حلول مبتكرة من شأنها تحويل النفايات من عبء إلى مورد استراتيجي. وفي هذا السياق ظهرت التطبيقات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي كأبرز المقترحات لإدارة النفايات بكفاءة وفعالية، وهذا ما ركزت عليه هذه الورقة البحثية من خلال التطرق لجملة من النقاط التي تخدم الموضوع، وعلى إثر ذلك توصلنا إلى جملة من النتائج نلخصها في النقاط التالية:

- تستخدم تطبيقات الذكاء الاصطناعي في كل مرحلة من مراحل إدارة النفايات، بدءا بمرحلة توليد النفايات، مروراً بجمعها ونقلها ووصولاً إلى إعادة تدويرها ومراقبتها. حيث تتداخل هذه التطبيقات فيما بينها لتعمل بشكل متكامل بما يسمح بتحقيق الأهداف المسطرة من قبل القائمين على هذا القطاع. الأمر الذي يدعم صحة الفرضية الأولى،

• يُمكن الذكاء الاصطناعي من تحقيق العديد من الفوائد، تتراوح ما بين فوائد اقتصادية كتخفيض التكاليف، وفوائد تشغيلية كتوفير الوقت وتقليص عدد رحلات جمع النفايات، وفوائد بيئية مثل تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، وأخيرا فوائد اجتماعية كالمساهمة في تحسين جودة الحياة في المناطق الحضرية وزيادة الوعي المجتمعي بضرورة الاسهام في حماية البيئة. لكن وعلى الرغم من ذلك، فإن هناك العديد من التحديات التي تحد من فعالية الذكاء الاصطناعي في مجال إدارة النفايات. وهو ما يؤكد صحة الفرضية الثانية.

• تقدم شركة Ecube Labs منتجات وحلولاً فعالة لإدارة مرحلتي جمع ونقل النفايات، وهو ما تؤكدته التجارب التطبيقية لهذه الحلول في عدد من المدن حول العالم، ومع ذلك فإن مدى الاستفادة من هذه الحلول يظل مرتبطاً بتوافر المقومات التقنية والمالية والاجتماعية في البيئات التي نعتمدها. وعليه يمكن تأكيد الفرضية الثالثة بصورة جزئية، نظراً لخصوصية السياقات المدروسة، مما يجعل تعميم نجاعة هذه الحلول على بيئات أخرى مختلفة أمراً غير محسوم.

استناداً إلى الفرضيات السابقة، يمكن القول إن الذكاء الاصطناعي يُسهم في تحسين كفاءة إدارة النفايات، من خلال تقليص زمن وعدد رحلات الجمع، وخفض التكاليف التشغيلية، فضلاً عن تحسين معدلات إعادة التدوير والحد من الانبعاثات الكربونية. غير أن فعالية هذه التطبيقات تظل رهينة بجملة من التحديات الجوهرية التي ينبغي أخذها بعين الاعتبار.

انطلاقاً مما سبق، يمكن تقديم الاقتراحات التالية:

• ضرورة الاستثمار في مجال الذكاء الاصطناعي وإدارة النفايات، وتطوير البنى التحتية الرقمية وتعميم استخدامها.

• سن القوانين والتشريعات التي من شأنها أن تُعالج مسألة الخصوصية عند استخدام تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات.

• زيادة الوعي المجتمعي بضرورة المساهمة في الإدارة الفعالة للنفايات، من خلال تطبيقات في الهواتف الذكية أو حملات التوعية عبر وسائل التواصل الاجتماعي.

المراجع

- Arya, N., Sharma, L., Tripathi, S., & Singh, V. (2023, June). **The Role of AI and ML in Waste Management and Sustainability**. *International Journal of Innovative Research in Technology*, 10(1), pp. 1438- 1444.
- Barik, P., & Padh, K. (2020). **An overview of AI Techniques and Their Applications**. *Journal of Nonlinear Analysis and Optimization*, 11(1), pp. 302-305.
- Ecube Labs. (n.d.). Retrieved 01 10, 2026, from Ecube Labs: <https://www.ecubelabs.com/>
- Ecube Labs. (2021). **Case Study: Melbourne**. Retrieved 01 05, 2026, from <https://www.ecubelabs.com/references/melbourne>
- Ecube Labs. (n.d.). **Case Study: City of Seoul**. Retrieved 03 31, 2026, from <https://www.ecubelabs.com/references/city-of-seoul/>
- Ecube Labs. (2021). **Case Study: Baltimore**. Retrieved 01 15, 2026, from <https://www.ecubelabs.com/references/baltimore/>
- Faiz, F., Ninduwazuor-Ehiobu, N., Monica-Adanma, U., & Okina-Solomon, N. (2024, 09). **Circular economy and data-driven decision making: enhancing waste recycling and resource recovery**. *International Journal of Engineering Inventions*, 13(09), pp. 328-346.
- Fotovvatikhah, F., Ahmedy, I., Md Noor, R., & Umair Munir, M. (2025). **A Systematic Review of AI-Based Techniques for Automated waste classification**. *Sensors*, 25(3181). doi:<https://doi.org/10.3390/s25103181>
- Fuqaha, S., & Nursetiawan, N. (2025, April). **Artificial Intelligence and IoT for smart waste management: challenges, opportunities, and future directions**. *Journal of Future Artificial Intelligence and Technologies*, 2(1), pp. 23-46. doi:DOI: 10.62411/faith.3048-3719-85
- Idrovo-Hurrell, M., Morán-Herrera, A., & Peralta, D. (2025). **Application of artificial intelligence in urban solid waste management: A systematic literature review**. *International journal of innovative research and scientific studies*, 8(2), pp. 3350-3363. doi:DOI: 10.53894/ijirss.v8i2.6010
- Linde, N., Balian, A., Shabatura, T., Gryshova, I., Yakovenko, A., & Hnatieva, T. (2024, Dec). **Artificial Intelligence in Waste Management in the context of implementing**

Circular Economy. *Grassroots Journal of Natural Ressources*, 07(3), pp. 149-172.
doi:https://doi.org/10.33002/nr2581.6853.0703ukr08

Olawade, D. B., Fapohunda, O., Wada, O. Z., Usman, S. O., Ige, A. O., Ajisafe, O., & Oladapo, B. I.
(2024, May 09). **Smart waste management: a paradigm shift enabled by artificial intelligence.** *Waste management bulletin*, 2, pp. 244-263.
doi:https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.05.001

Richard, T. (2025). **Emerging Technologies in Waste Management.** *Eurasian Experiment Journal of Engineering*, 05(2), pp. 6-13.

Snoun, A., Mufida, M. K., Ait El-Cadi, A., & Delot, T. (2025, Juin 09). **Ai-Driven innovations in waste management: Catalyszing the circular economy.** *Engineering Proceedings*, 97(12), pp. 1-10. doi:https://doi.org/10.3390/engproc2025097012

Tiwari, T., & pallavi. (2025, 03 29). **The AI-powered cleanup: A Revolution in solide waste management.** *International Journal of Environment and climate change*, 15(03), pp. 481-490. doi: https://doi.org/10.9734/ijecc/2025/v15i34787

أسامة برغوت ، و بوعلام معوشي . (ديسمبر، 2023). دور الذكاء الاصطناعي في تطوير الاقتصاد الدائري: دراسة حالة مؤسسة ZenRobotics الفنلندية. *مجلة الإدارة والتنمية للبحوث والدراسات*، 12 (02)، الصفحات 125-139.

الهيئة السعودية للبيانات والذكاء الاصطناعي SDAIA. (نوفمبر 2024). *حالات استخدام الذكاء الاصطناعي في قطاع البلدية*.

حسية ملاس. (جويلية، 2024). نحو إدارة ذكية للنفايات الحضرية..لمستقبل حضري مستدام في البلدان النامية-تجربة إمارة دبي في تسيير النفايات باستخدام الذكاء الاصطناعي-. *مجلة التميز الفكري للعلوم الاجتماعية والانسانية*، 06 (02)، الصفحات 23-33.

حنان رزق الله . (جوان، 2025). مساهمة الذكاء الاصطناعي في تطوير وظائف إدارة الموارد البشرية في ظل التحديات الراهنة مع الإشارة إلى واقع استخدامه في الجزائر. *مجلة دراسات اقتصادية*، 12 (1)، الصفحات 128-153.

رشيدة هاشمي، و عبد الوهاب ملياني. (جوان، 2023). الإطار المفاهيمي للذكاء الاصطناعي. *مجلة التراث*، 14 (02)، الصفحات 47-56.

عايدة مصطفاوي. (جوان ، 2017). تسيير النفايات المنزلية في الجزائر بين النص القانوني والواقع العملي. *مجلة آفاق للعلوم*، 02 (08)، 165-176.

عبر حامد عودة الله الطراونة. (19 أوت، 2024). التحديات والفرص في إدارة النفايات الصلبة وأهمية استراتيجيات تحسين إدارة النفايات الصلبة من خلال القيادة البيئية. *مجلة المجتمع العربي لنشر الدراسات العلمية*، 66، الصفحات 167-152.

- عيد راضي سالم الجعافرة . (01 01, 2024). إدارة المخلفات وأهميتها في حماية البيئة لدى البلديات. مجلة العلوم الانسانية والطبيعية، 05(01)، الصفحات 828-845.
- لبنى حزم سليم البقوم. (2024). إدارة النفايات بالذكاء الاصطناعي في نطاق البلديات. مجلة المجتمع العربي لنشر الدراسات العلمية، 41، الصفحات 240-254.
- محمد علي عبد الجليل ، محمود محمد عبد الهادي صبح ، شوقي الشحات محمد الغيطاني، و طه عبد العظيم محمد. (يونيو، 2021). استخدام تكنولوجيا حديثة للحد من تراكم المخلفات الصلبة: دراسة تطبيقية على محافظة القاهرة. مجلة العلوم البيئية، 50(6)، 429-468.
- وليد حماش . (2010-2011). تسيير النفايات الصناعية كمدخل لتحقيق التنمية المستدامة في المؤسسة الاقتصادية: دراسة ميدانية بمؤسسة جزائرية. مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماجستير تخصص الإداري الاستراتيجية للتنمية المستدامة ، جامعة فرحات عباس سطيف، سطيف.
- يزيد تفرات ، سارة بوجمعة ، و محمد صالح مزباني . (ديسمبر، 2019). واقع إدارة النفايات الصلبة في الجزائر - دراسة حالة مؤسسة Sokara-Net من (2017-2019). مجلة نور للدراسات الاقتصادية، 05(02)، الصفحات 23-36.