



جامعة ميدأوشن

Midocean University

كلية الإدارة

قسم إدارة الموارد البشرية

دورالتقنيات الذكية في تحسين منظومة إدارة النفايات بالمدن السعودية

دراسة تطبيقية بالمنهج المختلط على مدن الرياض وجدة والدمام

رسالة مقدّمة استكمالاً لمتطلبات الحصول على الدرجة العلمية

إعداد الطالب

خالد إبراهيم التميمي

إشراف

الأستاذ الدكتور: فايز علي جراد

العام الدراسي 1447هـ / 2025 – 2026م

اعتماد لجنة المناقشة

نوقشت هذه الرسالة الموسومة بـ «دور التقنيات الذكية في تحسين منظومة إدارة النفايات بالمدن السعودية»، المقدمة من الطالب خالد إبراهيم التميمي، وأُجيزت من لجنة المناقشة والحكم المكوّنة من السادة الآتية أسماؤهم:

الصفة	الاسم والرتبة العلمية	التوقيع
المشرف الرئيس ومقرراً	أ.د. فايز علي جراد	
عضواً (مناقشاً داخلياً)	أ.د.	
عضواً (مناقشاً خارجياً)	د.	

وأُقرّت الرسالة بتقدير:, بتاريخ: / / 1447هـ، الموافق / / 2026م.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿وَلَا تُفْسِدُوا فِي الْأَرْضِ بَعْدَ إِصْلَاحِهَا﴾

[سورة الأعراف: من الآية 56]

الإهداء

إلى من غرسوا في حبِّ العلم وقيمة العمل النافع... والديَّ الكريمين.

إلى وطني يبني مدنه على الاستدامة ويستشرف مستقبله برؤية طموح... المملكة العربية السعودية.

إلى كل باحثٍ يسعى ليُجعل من البيئة أمانةً تُصان لا مورداً يُستنزف... أُهدي هذا الجهد المتواضع.

شكر وتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوقيقه يبلغ الساعون غاياتهم. وبعد، فإنه يسعدني أن أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى أستاذي المشرف الأستاذ الدكتور فايز علي جراد، الذي لم يبخل عليّ بعلمه ووقته وتوجيهاته السديدة منذ أن كانت هذه الدراسة فكرةً أولى حتى استوت على سوقها؛ فكان ملاحظاته الدقيقة ومتابعته الحثيثة أثرٌ بالغ في إخراج هذا العمل على صورته الحالية.

كما أتوجه بالشكر الموصول إلى السادة أعضاء لجنة المناقشة على تفضلهم بقبول مناقشة هذه الرسالة وإثرائها بملاحظاتهم القيّمة، وإلى أساتذتي في قسم نظم المعلومات الإدارية والتقنيات الحديثة بكلية الإدارة على ما قدّموه من علمٍ ومعرفة.

والشكر واجبٌ كذلك لكل من ساهم في إنجاز الجانب الميداني من هذه الدراسة، من مسؤولين وخبراء وممارسين في أمانات المدن وشركات إدارة النفايات والجهات الأكاديمية بمدن الرياض وجدة والدمام، الذين منحوني من وقتهم وخبرتهم ما أعاني على جمع بياناتٍ موثوقة تعكس واقع الميدان.

وأخيراً، إلى أسرتي التي احتملت انشغالي وكانت لي سنداً ودافعاً... لكم جميعاً مني كل التقدير والعرفان.

الباحث

خالد إبراهيم التميمي

مُلخَص الدراسة

هدف الدراسة: سعت هذه الدراسة إلى تحليل واقع منظومة إدارة النفايات في المدن السعودية الكبرى، وتقييم مستوى جاهزيتها لتبني الحلول التقنية الذكية القائمة على إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الضخمة، ثم بناء نموذجٍ إطاريّ متكاملٍ لتطوير هذه المنظومة نحو نمطٍ ذكيٍّ ومستدام يتساق مع مستهدفات رؤية المملكة 2030.

منهج الدراسة: اعتمدت الدراسة المنهج المختلط بصورته التسلسلية التفسيرية، فجمعت بين أداتين: استبانة مُقنّنة طُبِّقت على عينةٍ قوامها (205) من المسؤولين والمديرين التقنيين والخبراء في مدن الرياض وجدة والدمام، ودليل مقابلةٍ شبه منظمةٍ أُجري مع (35) من الخبراء والممارسين. وعُولجت البيانات الكمية بأساليب الإحصاء الوصفي والاستدلالي عبر معامل ألفا كرونباخ وارتباط بيرسون واختبار (ت) وتحليل التباين الأحادي والانحدار، فيما حُلِّلت البيانات النوعية بأسلوب التحليل الموضوعي.

أبرز النتائج: كشفت الدراسة عن ثباتٍ مرتفعٍ لأداة القياس (ألفا كرونباخ = 0.933)، وعن إدراكٍ مرتفعٍ لدى المبحوثين لأوجه قصور الأساليب التقليدية (متوسط = 3.88)، مقابل مستوى جاهزيةٍ تقنيةٍ أقل نسبياً وإن ظل مرتفعاً (متوسط = 3.67)، ووعيٍ مرتفعٍ بالعوائق والعوامل الحاسمة للنجاح (متوسط = 3.96). وثبتت علاقةً موجبةً دالةً إحصائياً بين توظيف الذكاء الاصطناعي في الفرز وارتفاع معدلات إعادة التدوير (ر = 0.486)، في حين لم تظهر فروقٌ دالةٌ تُعزى لمتغيري الجنس والمدينة، مما يشير إلى تجانس التصوّرات عبر المدن الثلاث.

التوصيات: أوصت الدراسة ببناء بنيةٍ تحتيةٍ رقميةٍ قابلةٍ للتشغيل البيئي، وتوحيد بيانات النفايات وطنياً، وتبني مسارٍ تدريجيٍّ يبدأ بحاويات الاستشعار وأنظمة التوجيه الذكي قبل الانتقال إلى الفرز المؤتمت المدعوم بالذكاء الاصطناعي، مع تفعيل الأطر التشريعية وبناء القدرات البشرية باعتبارهما عاملين حاسمين لنجاح التحول.

الكلمات المفتاحية: إدارة النفايات الذكية، إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، الاقتصاد الدائري، الجاهزية الرقمية، رؤية 2030، المدن السعودية.

Abstract

Purpose: This study analyses the current state of municipal solid-waste management in Saudi Arabia's major cities, assesses institutional and digital readiness to adopt smart technologies based on the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI) and Big-Data analytics, and proposes an integrated framework to move the system toward a smart, sustainable model aligned with Saudi Vision 2030.

Methods: A sequential-explanatory mixed-methods design was used. A validated questionnaire was administered to a purposive-stratified sample of 205 decision-makers, technical managers and experts across Riyadh, Jeddah and Dammam, complemented by 35 semi-structured expert interviews. Quantitative data were analysed using descriptive statistics, Cronbach's alpha, Pearson correlation, independent-samples t-test, one-way ANOVA and regression; qualitative data were analysed thematically.

Findings: The instrument showed excellent reliability (Cronbach's alpha = 0.933). Respondents strongly perceived the shortcomings of traditional practices ($M = 3.88$), reported comparatively lower yet still high technological readiness ($M = 3.67$), and highly endorsed the barriers and critical success factors ($M = 3.96$). A significant positive association emerged between AI-based sorting and higher recycling rates ($r = 0.486$), whereas no significant differences were found by gender or city, indicating convergent perceptions across the three cities.

Recommendations: The study recommends an interoperable digital infrastructure, national standardisation of waste data, and a phased adoption path beginning with sensor-enabled bins and smart routing before advancing to AI-driven automated sorting, alongside enabling legislation and human-capacity building as decisive success factors.

Keywords: Smart waste management; Internet of Things; Artificial Intelligence; Circular economy; Digital readiness; Vision 2030; Saudi cities.

فهرس المحتويات

2	اعتماد لجنة المناقشة
4	الإهداء
5	شكرو تقدير
6	ملخص الدراسة
8	فهرس المحتويات
14	الفصل الأول: الإطار العام للدراسة
14	1-1 المقدمة
16	2-1 مشكلة الدراسة
17	3-1 أسئلة الدراسة
17	4-1 فروض الدراسة
18	الفرضية الرئيسة
18	الفرضيات الفرعية
18	5-1 أهداف الدراسة
18	الهدف العام
18	الأهداف الخاصة
19	6-1 أهمية الدراسة
20	أ) الأهمية العلمية
20	ب) الأهمية التطبيقية
21	7-1 حدود الدراسة

21	8-1 مصطلحات الدراسة
22	9-1 هيكل الدراسة
23	الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة
23	1-2 تمهيد
23	2-2 منظومة إدارة النفائات: المفهوم والمراحل
24	1-2-2 تحديات إدارة النفائات وتمويلها في الدول النامية
25	3-2 من النموذج الخطّي إلى الاقتصاد الدائري
26	4-2 التقنيات الذكية في إدارة النفائات
26	1-4-2 إنترنت الأشياء (IoT)
27	2-4-2 الذكاء الاصطناعي والتعلّم الآلي
28	3-4-2 تحليل البيانات الضخمة والتنبؤ
28	4-4-2 التكامل والمنظومة الذكية
29	5-4-2 التجارب الدولية الرائدة
29	5-2 المنطلقات النظرية للدراسة
31	6-2 السياق السعودي: رؤية 2030 والاستراتيجية الوطنية
32	7-2 الدراسات السابقة: المحور الأول — إنترنت الأشياء في إدارة النفائات
32	8-2 المحور الثاني — الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات
33	9-2 المحور الثالث — الاستدامة والاقتصاد الدائري والسياق العربي
34	10-2 التعقيب على الدراسات السابقة
35	11-2 الفجوة البحثية

36	12-2 خلاصة الفصل
37	الفصل الثالث: الطريقة والإجراءات
37	1-3 تمهيد
37	2-3 منهج الدراسة
37	3-3 مجتمع الدراسة
38	4-3 عينة الدراسة وخصائصها
38	1-4-3 العينة الكمية (الاستبانة)
40	2-4-3 العينة النوعية (المقابلات)
40	5-3 أدوات الدراسة
40	1-5-3 الاستبانة المُقنَّنة
41	2-5-3 دليل المقابلة شبه المنظمة
42	6-3 صدق الأداة
42	7-3 ثبات الأداة
43	8-3 الأساليب الإحصائية
43	9-3 إجراءات جمع البيانات
43	10-3 الاعتبارات الأخلاقية
44	11-3 أسلوب تحليل البيانات النوعية
44	12-3 خلاصة الفصل
45	الفصل الرابع: عرض النتائج ومناقشتها
45	1-4 تمهيد

2-4 نتائج المحور الأول: واقع إدارة النفايات وكفاءتها التشغيلية	46
3-4 نتائج المحور الثاني: جاهزية وتطبيق الحلول التقنية	47
4-4 نتائج المحور الثالث: العوائق والعوامل الحاسمة للنجاح	48
5-4 مقارنة محاور الدراسة	50
6-4 اختبار فرضيات الدراسة	51
الفرضية الأولى (ف1): أثر إنترنت الأشياء في خفض التكاليف التشغيلية	51
الفرضية الثانية (ف2): علاقة الذكاء الاصطناعي بإعادة التدوير	51
الفرضية الثالثة (ف3): علاقة الجاهزية الرقمية بنجاح التطبيق	52
الفرضية الرابعة (ف4): أثر الحلول المتكاملة في تقليل الأثر البيئي	52
الفرضية الخامسة (ف5): الفروق تبعاً للمتغيرات الديموغرافية والمؤسسية	52
7-4 نتائج التحليل النوعي للمقابلات	55
الموضوع الأول: قصور الواقع الراهن	55
الموضوع الثاني: ضعف البيانات والقياس	56
الموضوع الثالث: أولوية الحلول التقنية	56
الموضوع الرابع: العوائق التنظيمية والمالية	56
الموضوع الخامس: العوامل الحاسمة والنموذج المقترح	56
8-4 مناقشة النتائج	57
9-4 خلاصة الفصل	58
الفصل الخامس: الخاتمة والتوصيات	59
1-5 تمهيد	59

59	2-5 ملخص الدراسة
60	3-5 الإجابة عن أسئلة الدراسة
61	4-5 أبرز النتائج المستخلصة
62	5-5 النموذج الإطارى المقترح
64	6-5 التوصيات
64	أولاً: على المستوى الوطنى (صنّاع السياسات)
64	ثانياً: على المستوى المؤسسى (الأمانات والشركات)
64	ثالثاً: على المستوى التمويلي والشراكات
65	7-5 مقترحات لبحوثٍ مستقبلية
65	8-5 خاتمة
66	قائمة المصادر والمراجع
66	أولاً: المراجع العربية
66	ثانياً: المراجع الأجنبية
69	الملاحق
69	ملحق (أ): استبانة الدراسة
69	الجزء الأول: البيانات الديموغرافية والوظيفية
69	الجزء الثانى: محور واقع إدارة النفايات وكفاءتها التشغيلية (12 عبارة)
70	الجزء الثالث: محور جاهزية وتطبيق الحلول التقنية (20 عبارة)
71	الجزء الرابع: محور العوائق والعوامل الحاسمة للنجاح (15 عبارة)
73	ملحق (ب): دليل المقابلة شبه المنظمة

73	المحور الأول: واقع إدارة النفايات وتقييم الكفاءة
73	المحور الثاني: الحلول التقنية المطبقة وتقييمها
73	المحور الثالث: العوائق والتحديات
73	المحور الرابع: الجاهزية الرقمية والمؤسسية
74	المحور الخامس: الرؤى والتوصيات المستقبلية
74	ملحق (ج): قائمة السادة المحكّمين
75	ملحق (د): المتوسّطات والانحرافات التفصيلية لجميع عبارات الاستبانة
75	المحور الأول: واقع إدارة النفايات (12 عبارة)
75	المحور الثاني: جاهزية وتطبيق الحلول التقنية (20 عبارة)
76	المحور الثالث: العوائق والعوامل الحاسمة (15 عبارة)

الفصل الأول: الإطار العام للدراسة

1-1 المقدمة

لم تعد إدارة النفايات مسألة نظافةٍ عابرة تُقاس بعدد الحاويات المرفوعة في نهاية اليوم، بل تحوّلت إلى قضيةٍ استراتيجيةٍ تتقاطع فيها هموم البيئة والاقتصاد والصحة العامة وجودة الحياة في المدن. فمع التسارع الذي يشهده النمو السكاني والتوسع العمراني وارتفاع منسوب الاستهلاك، صارت كميات النفايات المتولدة تتجاوز في كثيرٍ من الحواضر الطاقة الاستيعابية للمنظومات التقليدية القائمة على الجمع والطمر، وباتت الفجوة تتسع يوماً بعد يوم بين ما يُنتج وما يُدار بكفاءة.

وتكشف الأرقام العالمية حجم هذا التحدي بوضوح؛ إذ يُقدَّر أن العالم يولّد نحو 2.01 مليار طنٍّ من النفايات الصلبة البلدية سنوياً، ويُتَوَقَّع أن يقفز هذا الرقم إلى 3.40 مليار طنٍّ بحلول عام 2050 في ظل استمرار الأنماط الراهنة، مع بقاء ما لا يقل عن ثلث هذه الكميات خارج أي إدارةٍ آمنةٍ بيئياً (Kaza et al., 2018). ويبلغ متوسط ما يولّده الفرد الواحد يومياً على المستوى العالمي نحو 0.74 كيلوغرام، غير أن هذا المتوسط يُخفي تبايناً واسعاً بين الدول تبعاً لمستوى الدخل ودرجة التحضر.

وفي هذا السياق العالمي تحتل المملكة العربية السعودية موقعاً لافتاً؛ فهي من أعلى دول العالم في معدل توليد النفايات الفردية، إذ يُقدَّر نصيب الفرد فيها بما يتراوح بين 1.4 و1.5 كيلوغرام يومياً، أي ما يقارب ضعف المتوسط العالمي (EcoMENA, 2022؛ Nizami et al., 2015). وتُنتج المملكة قرابة 15 مليون طنٍّ من النفايات البلدية الصلبة سنوياً، يتركّز الجزء الأكبر منها في مدنها الكبرى؛ فوفق المركز الوطني لإدارة النفايات (MWAN) تستأثر الرياض بنحو 21% من إجمالي النفايات المتولدة، تليها جدة بنحو 14%، ثم الدمام بنحو 8%، لتُشكّل هذه المدن الثلاث مجتمعةً ما يقارب 43% من نفايات المملكة (National Center for Waste Management, 2023).

وعلى الرغم من هذا الحجم الضخم، لا تزال نسبة إعادة التدوير في المملكة متواضعةً تدور في نطاق 10% إلى 15%، ويقوم بجُلّها القطاع غير الرسمي عبر انتشارال ورق والمعادن واللدائن من الحاويات، بينما يتدفق الجزء الأعظم من

النفايات إلى المطامر دون فرزٍ من المصدر أو معالجةٍ مناسبة (Abdel-Shafy & Mansour, 2018؛ EcoMENA, 2022). ولا يقتصر أثر هذا النمط الخطي القائم على «الجمع ثم الطمر» على الهدر الاقتصادي، بل يمتد إلى أضرارٍ بيئيةٍ ملموسةٍ قُدِّرَت كلفتها بنحو 1.3 مليار دولار في عام 2021 وحده (National Center for Waste Management, 2023). ويزيد من حدة التحدي طبيعتهُ تركيب النفايات المتولدة محلياً؛ إذ تُشكِّل النفايات العضوية والغذائية النصيب الأكبر منها بنسبةٍ تتراوح بين 40% و51%، وهي نسبةٌ تنطوي على فرصةٍ مهددةٍ لإنتاج السماد والطاقة الحيوية لو أُحسنَ فرزها ومعالجتها (Nizami et al., 2015). يُضاف إلى ذلك أن كثيراً من المطامر القائمة تقترب من طاقتها الاستيعابية القصوى، وأن المملكة من أعلى دول العالم توليداً للنفايات الإلكترونية، وهو ما يجعل التحول نحو منظومةٍ أكثر كفاءةً ضرورةً لا خياراً. وقد أدركت الدولة ذلك مبكراً، فأصدرت نظام إدارة النفايات عام 2021 لتنظيم دورة حياة النفاية من المصدر إلى التخلص، وأطلقت خططاً لإنشاء مئات المرافق للمعالجة والاسترداد بحلول عام 2040 (National Center for Waste Management, 2023).

وفي مواجهة هذا الواقع المتفاقم، برزت التقنيات الرقمية بوصفها رافعةً قادرةً على نقل منظومة إدارة النفايات من نهجٍ تقليديٍّ يقوم على ردِّ الفعل إلى نهجٍ استباقيٍّ ذكيٍّ يقوم على البيانات. فأجهزة الاستشعار المدمجة في الحاويات ترصد مستوى الامتلاء لحظياً، وخوارزميات التوجيه الذكي تُعيد رسم مسارات المركبات بما يخفض التكلفة والانبعاثات، وأنظمة الرؤية الحاسوبية والتعلم الآلي تُصنّف النفايات وتفرزها بدقةٍ تفوق الفرز اليدوي، ونماذج البيانات الضخمة تتنبأ بكميات النفايات المتولدة وتُحسن التخطيط التشغيلي (Hannan et al., 2020؛ Sadowski et al., 2022).

ويكتسب هذا التوجّه في الحالة السعودية زخماً إضافياً من رؤية المملكة 2030 التي وضعت الاستدامة البيئية في صميم أهدافها الوطنية، ومن الاستراتيجية الوطنية لإدارة النفايات التي تستهدف تحويل ما يصل إلى 90% من النفايات بعيداً عن المطامر بحلول عام 2040، وتقليص ما يُطمر إلى نحو 18% بحلول عام 2035 (وزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان، 2022؛ National Center for Waste Management, 2023). غير أن تحقيق هذه المستهدفات الطموحة يظل مرهوناً بمدى نضج البنية التحتية الرقمية وجاهزية المؤسسات البلدية لاستيعاب هذه الحلول وتشغيلها.

ومن هنا تنبع فكرة هذه الدراسة التي تسعى إلى تقديم قراءةٍ علميةٍ متأنيةٍ لواقع منظومة إدارة النفايات في المدن السعودية الكبرى، وتشخيص مستوى جاهزيتها التقنية والمؤسسية، والوقوف على العوائق التي تحول دون التحوّل الذكي والعوامل الحاسمة لإنجاحه، وصولاً إلى بناء نموذجٍ إطاريّ متكاملٍ يجمع بين الحلول التقنية المختلفة في منظومةٍ واحدة. وقد نُظِّمَ البحث في خمسة فصولٍ متكاملة، يتناول أولها الإطار العام للدراسة، ويعرض ثانياً الإطار النظري والدراسات السابقة، ويشرح ثالثاً منهجية الدراسة وإجراءاتها، ويقدم رابعاً النتائج ومناقشتها، ويختم خامساً بالاستنتاجات والتوصيات والمقترحات.

2-1 مشكلة الدراسة

تتبلور مشكلة هذه الدراسة حول فجوةٍ واضحةٍ بين طرفين: من جهةٍ تحدياتٌ متصاعدةٌ لإدارة النفايات في المدن السعودية تتجاوز فيها الكميات المتولدة قدرة المنظومات التقليدية على استيعابها بكفاءة، ومن جهةٍ أخرى قصورٌ ملحوظٌ في توظيف الحلول التقنية الحديثة توظيفاً منهجياً فاعلاً على الرغم من نضجها وتوافرها عالمياً. فبينما تُتيح تقنيات إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي والاستشعار عن بُعد فرصاً غير مسبوقة لرفع الكفاءة، لا تزال كثيرٌ من المنظومات البلدية تعتمد على أساليب يدويةٍ في التجميع وتوجيه المسارات والفرز، بما يُفضي إلى هدرٍ اقتصاديٍّ وتلوّثٍ بيئيٍّ وتدنيٍّ في مستوى الأداء التشغيلي.

وتتجلى هذه المشكلة في مؤشراتٍ قابلةٍ للقياس؛ فتدني نسبة إعادة التدوير عند حدود 10% إلى 15% يقابله في الدول ذات الدخل المرتفع تحويلٌ لأكثر من ثلث النفايات عبر التدوير والتسبيخ (Kaza et al., 2018)، وارتفاع التكاليف التشغيلية لجمع النفايات ونقلها يرتبط بغياب التوجيه الذكي لمسارات المركبات، وتزايد كميات النفايات المتدفقة إلى المطامر دون فرزٍ أو معالجة. يُضاف إلى ذلك ضعفٌ في دقة بيانات كميات النفايات وتوزيعها، وهو ما يُقوّض أي محاولةٍ للتخطيط المبني على الأدلة.

ولا يقلّ عن ذلك أهمية أن تبني الحلول التقنية لا يتوقف عند توافر الأجهزة والبرمجيات، بل يرتكز بمنظومةٍ من العوامل التنظيمية والمالية والبشرية؛ من مدى نضج البنية الرقمية وقابلية الأنظمة للتشغيل البيئي، إلى كفاية التمويل، فتأهيل

الكوادر ومواجهة مقاومة التغيير، وصولاً إلى وضوح الأطر التشريعية والتنسيق بين الجهات. ومن ثمّ فإن فهم هذه العوامل مجتمعةً — لا مجرد استعراض التقنيات — هو مفتاح أي تحوّل ناجح.

وبناءً على ما تقدّم، يمكن صياغة مشكلة الدراسة في تساؤلها الرئيس الآتي:

«كيف يمكن توظيف الحلول التقنية الحديثة لتطوير منظومة إدارة النفايات في المدن السعودية نحو نموذجٍ ذكيٍّ ومستدام؟»

3-1 أسئلة الدراسة

يتفرّع عن التساؤل الرئيس مجموعة من الأسئلة الفرعية التي تُوجّه مسار الدراسة النظري والميداني، وهي:

1. ما الواقع الراهن لمنظومة إدارة النفايات في المدن السعودية، وما مستوى كفاءتها التشغيلية والبيئية في ظل

الأساليب التقليدية المعتمدة؟

2. ما أبرز الحلول التقنية المتاحة عالمياً في مجال إدارة النفايات الذكية، وما مدى قابليتها للتطبيق في السياق

السعودي؟

3. ما مستوى جاهزية البنية التحتية الرقمية والمؤسسية في المدن السعودية المستهدفة لاستيعاب هذه الحلول؟

4. ما العوائق والتحديات التنظيمية والمالية والبشرية التي تواجه تطبيق الحلول التقنية من منظور المسؤولين

والخبراء؟

5. ما العوامل الحاسمة لنجاح تطبيق الحلول التقنية في إدارة النفايات استناداً إلى التجارب الدولية الناجحة؟

6. ما ملامح النموذج الإطارى المقترح لتطبيق الحلول التقنية المتكاملة في إدارة النفايات بالمدن السعودية؟

4-1 فروض الدراسة

لمّا كانت الدراسة تعتمد المنهج المختلط الجامع بين الجانبين الكمي والنوعي، فإنها تنطلق في شقّها الكمي من فرضيةٍ

رئيسيةٍ وخمس فرضياتٍ فرعيةٍ قابلةٍ للاختبار الإحصائي، هي:

الفرضية الرئيسية

توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين مستوى توظيف الحلول التقنية الحديثة في إدارة النفايات ودرجة تحسّن الكفاءة التشغيلية والبيئية للمنظومة.

الفرضيات الفرعية

1. ف1: يُسهم تطبيق تقنيات إنترنت الأشياء في تجميع النفايات إسهاماً جوهرياً في خفض التكاليف التشغيلية لمركبات الجمع.

2. ف2: يرتبط توظيف الذكاء الاصطناعي في تصنيف النفايات ارتباطاً موجباً دالاً إحصائياً بارتفاع معدلات إعادة التدوير.

3. ف3: توجد علاقة طردية ذات دلالة إحصائية بين مستوى الجاهزية الرقمية للمؤسسات البلدية ودرجة نجاح تطبيق الحلول التقنية في إدارة النفايات.

4. ف4: تُسهم الحلول التقنية المتكاملة في تقليل الأثر البيئي السلبي لعمليات إدارة النفايات بصورة تفوق الأساليب التقليدية.

5. ف5: توجد فروق ذات دلالة إحصائية في مستوى توظيف الحلول التقنية تُعزى للمتغيرات الديموغرافية والمؤسسية (كالمدينة ونوع المؤسسة).

5-1 أهداف الدراسة

الهدف العام

تحليل واقع إدارة النفايات في المدن السعودية، وتقديم إطارٍ مقترحٍ للحلول التقنية المتكاملة القادرة على تطوير هذه المنظومة نحو نموذجٍ ذكيٍّ ومستدام.

الأهداف الخاصة

تنبثق عن الهدف العام أهدافٌ خاصةٌ إجرائية، تتمثل في:

1. رصد وتشخيص واقع منظومة إدارة النفايات في المدن السعودية وتحديد أبرز جوانب القصور في الأساليب التقليدية المعتمدة.
2. مراجعة وتصنيف الحلول التقنية الحديثة المتاحة لإدارة النفايات كإنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي والاستشعار وتحليل البيانات الضخمة.
3. تقييم مستوى جاهزية البنية التحتية الرقمية والمؤسسية في المدن المستهدفة لاستيعاب هذه الحلول وتطبيقها.
4. استكشاف العوائق الرئيسة التنظيمية والمالية والبشرية التي تُعرق اعتماد الحلول التقنية.
5. تحديد العوامل الحاسمة لنجاح التطبيق في سياق المدن السعودية استناداً إلى التجارب الدولية.
6. بناء نموذجٍ إطارٍ متكاملٍ يجمع بين الحلول التقنية ويوفّر خارطة طريقٍ قابلةٍ للتطبيق.

6-1 أهمية الدراسة

تستمد هذه الدراسة أهميتها من تقاطع موضوعها مع أولوية وطنية وبيئية راهنة، وتتوزّع هذه الأهمية على بُعدين متكاملين: علمي نظري، وتطبيقي عملي. ويزيد من هذه الأهمية أن الدراسة تأتي في لحظةٍ فارقةٍ يشهد فيها القطاع تحولاً مؤسسياً وتشريعياً متسارعاً، مما يجعل نتائجها ذات صلةٍ مباشرةٍ بالقرارات الجاري اتخاذها لا مجرد إضافةٍ أكاديمية نظرية.

أ) الأهمية العلمية

- إثراء الأدبيات العربية في مجال التقنيات البيئية الذكية، التي لا تزال شحيحةً مقارنةً بنظيراتها الغربية، ولا سيما في ما يخص السياقين السعودي والخليجي بخصوصيتهما التنظيمية والاجتماعية.
- تقديم إطارٍ نظريٍّ يربط بين تقنيات إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات ومنظومة إدارة النفايات ربطاً منهجياً موحداً بدلاً من تناولها منفصلةً كما هو شائع.
- سدّ فجوةٍ معرفيةٍ تتعلق بجدوى تطبيق هذه الحلول في ظل السياق الجغرافي والمؤسسي للمدن السعودية، والتأسيس لنموذجٍ قابلٍ للاختبار في دراساتٍ مقارنةٍ لاحقةٍ على مستوى دول مجلس التعاون.
- توظيف منهجٍ مختلطٍ يجمع بين التحليل الكمي والنوعي في دراسة موضوعات الاستدامة والتقنية، بما يقدم فهماً أعمق من الاكتفاء بمنهجٍ واحد.

ب) الأهمية التطبيقية

- تزويد الجهات البلدية والمؤسسات المعنية بتوصياتٍ عمليةٍ مستندةٍ إلى الأدلة حول أفضل التقنيات الواجب اعتمادها وترتيب أولويات تبنيها.
- مساعدة صانعي السياسات في وزارة البيئة والمياه والزراعة ووزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان على صياغة استراتيجياتٍ فاعلةٍ لإدارة النفايات الذكية.
- تقديم أساسٍ تقييميٍّ لمستوى الجاهزية التقنية يُمكن المؤسسات من تشخيص أوضاعها ورسم خارطة طريقٍ لتطوير منظومتها.
- دعم تحقيق مستهدفات رؤية 2030 المتعلقة بالاستدامة البيئية والمدن الذكية وتطوير البنية التحتية الرقمية.

7-1 حدود الدراسة

تلتزم الدراسة بحدود تضبط نطاقها وتحدد مجال تعميم نتائجها، على النحو الآتي:

الحدود الموضوعية: تتمحور الدراسة حول الحلول التقنية المتاحة لتطوير إدارة النفايات الصلبة الحضرية دون التعمق في النفايات الخطرة أو الصناعية المتخصصة التي تخضع لمنظومة تشريعية ومؤسسية مختلفة.

الحدود المكانية: أُجريت الدراسة في ثلاث مدن رئيسة هي الرياض (المنطقة الوسطى) وجدة (منطقة مكة المكرمة) والدمام (المنطقة الشرقية)، باعتبارها الحواضر الأكبر والأكثر توليداً للنفايات في المملكة.

الحدود البشرية: اقتصرَت الدراسة على العاملين والمسؤولين في المستويات الإدارية والتقنية بأمانات المدن وشركات إدارة النفايات والجهات الأكاديمية، دون التوسّع ليشمل سكان المدن عموماً.

الحدود الزمنية: جرت المراجعة الأدبية مطلع عام 2026، وأُنجز جمع البيانات الميدانية خلال الفترة من مارس إلى يونيو 2026، وتلاه تحليل البيانات وكتابة التقرير النهائي.

8-1 مصطلحات الدراسة

حرصاً على دقة الفهم ووحدة الدلالة، تُعرّف الدراسة أبرز مصطلحاتها تعريفاً مفاهيمياً وإجرائياً على النحو الآتي:

إدارة النفايات الذكية: مفاهيمياً هي منظومة متكاملة تُوظّف التقنيات الرقمية في مراحل التجميع والفرز والنقل والمعالجة وإعادة التدوير بغية رفع الكفاءة وتقليل الأثر البيئي. وإجرائياً تُقاس في هذه الدراسة بمجموع استجابات المبحوثين على مقياس جاهزية وتطبيق الحلول التقنية.

إنترنت الأشياء (IoT): مفاهيمياً شبكة من الأجهزة والحساسات المتصلة القادرة على جمع البيانات وتبادلها لحظياً عبر الإنترنت. وإجرائياً يشير في هذه الدراسة إلى حساسات امتلاء الحاويات وأنظمة تتبّع المركبات والتوجيه الذكي للمسارات.

الذكاء الاصطناعي (AI): مفاهيمياً فرعٌ من علوم الحاسب يُعنى ببناء أنظمةٍ قادرةٍ على أداء مهامٍ تتطلب ذكاءً بشرياً كالتصنيف والتنبؤ. وإجرائياً يشير إلى خوارزميات الرؤية الحاسوبية والتعلّم الآلي المستخدمة في تصنيف النفايات وفرزها والتنبؤ بكمياتها.

الجاهزية الرقمية: مفاهيمياً مدى امتلاك المؤسسة للبنية التحتية والأنظمة والكوادر والبيانات اللازمة لاستيعاب الحلول التقنية وتشغيلها. وإجرائياً تُقاس بدرجة موافقة المبحوثين على بنود محور الجاهزية في الاستبانة.

الاقتصاد الدائري: مفاهيمياً نموذجٌ اقتصاديٌّ يقوم على إغلاق دورة حياة المواد وتقليل الهدر عبر إعادة الاستخدام والتدوير واسترداد الموارد، في مقابل النموذج الخطّي القائم على «الإنتاج ثم الاستهلاك ثم التخلص».

المدن السعودية الكبرى: يُقصد بها في هذه الدراسة مدن الرياض وجدة والدمام، باعتبارها الحواضر الأكبر سكاناً والأعلى توليداً للنفايات على مستوى المملكة.

9-1 هيكل الدراسة

تتنظم هذه الدراسة في خمسة فصولٍ متكاملةٍ يُفضي كلٌّ منها إلى الذي يليه. فالفصل الأول — وهو هذا الفصل — يرسم الإطار العام للدراسة من مقدمةٍ ومشكلةٍ وأسئلةٍ وفرضياتٍ وأهدافٍ وأهميةٍ وحدودٍ ومصطلحات. ويتناول الفصل الثاني الإطار النظري للحلول التقنية ومنطقاتها، ويستعرض الدراسات السابقة ويحدّد الفجوة البحثية. ويشرح الفصل الثالث منهجية الدراسة وإجراءاتها من مجتمعٍ وعينةٍ وأداةٍ وأساليبٍ إحصائية. ويعرض الفصل الرابع نتائج الدراسة الميدانية بشقيها الكمي والنوعي ويناقشها في ضوء الأدبيات. ويختم الفصل الخامس بالاستنتاجات والتوصيات والنموذج الإطارى المقترح ومقترحات البحوث المستقبلية، تعقبه قائمة المراجع والملاحق.

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

1-2 تمهيد

يُعنى هذا الفصل ببناء الأساس المعرفي الذي تنهض عليه الدراسة، وينقسم إلى شطرين متكاملين: يتناول الأول الإطار النظري الذي يحدّد المفاهيم المحورية لإدارة النفايات وتقنياتها الذكية والمنطلقات النظرية المفسّرة لتبنيها، ويستعرض الثاني الدراسات السابقة العربية والأجنبية ذات الصلة مرتّبة موضوعياً، ثم يُعقّب عليها لاستخلاص الفجوة البحثية التي تسعى الدراسة الحالية إلى سدّها. والغاية من هذا الترتيب أن يتدرّج القارئ من المفهوم إلى النظرية، ومن النظرية إلى ما أنجزه الباحثون من قبل، حتى يتّضح موقع هذه الدراسة من الجهد العلمي التراكمي في الميدان.

2-2 منظومة إدارة النفايات: المفهوم والمراحل

تُعرّف إدارة النفايات الصلبة البلدية بأنها مجموع العمليات المنظّمة التي تُعنى بجمع النفايات المتولدة عن الأنشطة السكنية والتجارية والمؤسسية ونقلها ومعالجتها والتخلّص منها بطريقة تحفظ الصحة العامة وتصون البيئة (Kaza et al., 2018). وقد تطوّر مفهوم هذه الإدارة تطوّراً جوهرياً؛ فبعد أن كان ينحصر في مجرد إزالة النفايات عن الأنظار، صار اليوم منظومة متكاملة تُقاس بمؤشرات كفاءة اقتصادية وبيئية دقيقة، وتُدار وفق مبدأ يُعرف بـ«الهرم الهرمي لإدارة النفايات» الذي يرتّب الخيارات من الأفضل بيئياً إلى الأقل تفضيلاً.

ويتدرّج هذا الهرم من المنع والتقليل من المصدر في قمّته، مروراً بإعادة الاستخدام ثم التدوير ثم الاسترداد (كتوليد الطاقة من النفايات)، وصولاً إلى الطمر بوصفه الخيار الأخير الأقل تفضيلاً. والمفارقة أن منظومة إدارة النفايات في كثيرٍ من الدول النامية — ومنها المملكة — لا تزال مقلوبةً على قاعدتها؛ إذ يستأثر الطمر بالنصيب الأكبر بينما تتضاءل نسب التدوير والاسترداد (Ferronato & Torretta, 2019؛ Abdel-Shafy & Mansour, 2018). ويوضّح الجدول (1-2) مستويات هذا الهرم ومضامينها.

جدول (1-2): الهرم الهرمي لإدارة النفايات ومضامين مستوياته

الأولوية	المستوى	المضمون
الأعلى	المنع والتقليل	خفض كمية النفايات من المصدر عبر التصميم المستدام وترشيد الاستهلاك
	إعادة الاستخدام	إعادة توظيف المنتجات بحالتها دون معالجة صناعية
	إعادة التدوير	تحويل المواد المفروزة إلى مدخلات إنتاجية جديدة
	الاسترداد	استرداد الطاقة أو المواد من النفايات المتبقية (مثل تحويلها إلى طاقة)
الأدنى	التخلص (الطمر)	الطمر الصحي بوصفه الخيار الأخير للنفايات غير القابلة للمعالجة

المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى (Kaza et al., 2018) و (Ferronato & Torretta 2019).

ويكشف هذا الترتيب عن جوهر المشكلة التقنية التي تعالجها الدراسة؛ فالانتقال من قاعدة الهرم إلى قمته لا يتحقق بالجهد البشري وحده، بل يتطلب بيانات دقيقة وأنظمة قادرة على الفرز والتتبع والتنبؤ، وهنا تحديداً يبرز دور التقنيات الذكية بوصفها الوسيلة التي تُعيد المنظومة إلى وضعها الصحيح.

1-2-2 تحديات إدارة النفايات وتمويلها في الدول النامية

تتفاقم إشكالية إدارة النفايات في الدول النامية ومتوسطة الدخل لأسباب متشابهة. فعلى مستوى التغطية، تظل نسب الجمع في المناطق منخفضة الدخل متواضعة لا سيما في الأطراف الريفية، في مقابل تغطية شبه شاملة في الدول مرتفعة الدخل التي تسترد أكثر من ثلث نفاياتها عبر التدوير والتسبيخ (Kaza et al., 2018). وعلى مستوى التمويل، تلهم إدارة النفايات حصّة كبيرة من الميزانيات البلدية تبلغ نحو 20% في الدول منخفضة الدخل وأكثر من 10% في متوسطة الدخل، وهو عبء يتنافس مع أولويات تنموية أخرى ويجعل كفاءة الإنفاق مسألة حاسمة.

أما على مستوى الأثر، فإن بقاء نحو ثلث النفايات العالمية خارج أي إدارة آمنة — عبر الطمر المكشوف أو الحرق — يُنتج تلوثاً للتربة والمياه والهواء وانبعاثات للميثان بالغة الخطورة على المناخ (Kaza et al., 2018؛ Ferronato & Torretta 2019). ويُتوقع أن يتضاعف إنتاج النفايات في إقليم الشرق الأوسط وشمال إفريقيا بحلول عام 2050، مما يضع المنطقة — والمملكة في قلبها — أمام ضغط متصاعد يجعل من رفع الكفاءة عبر التقنية ضرورة اقتصادية وبيئية في آنٍ معاً. وهذه الصورة الإقليمية هي الخلفية التي تكتسب في ضوئها الحلول الذكية أهميتها بوصفها أداة لكسر معادلة «كلفة مرتفعة وكفاءة متدنية».

3-2 من النموذج الخطّي إلى الاقتصاد الدائري

يقوم النموذج الخطّي التقليدي على تسلسل بسيط: استخراج المواد، ثم تصنيعها واستهلاكها، ثم التخلص منها. وهو نموذج يفترض وفرة لا متناهية في الموارد وقدرة غير محدودة للبيئة على استيعاب المخلفات، وكلا الافتراضين لم يعد صالحاً في ظل الضغوط الراهنة (Ghosh, 2020). وفي مقابله يطرح الاقتصاد الدائري رؤية بديلة تقوم على إغلاق دورة حياة المواد والحفاظ على قيمتها أطول مدة ممكنة، بحيث تتحوّل مخرجات عملية إلى مدخلاتٍ لأخرى، ويصبح مفهوم «النفاية» ذاته موضع مراجعة.

ويُبرز الجدول (2-2) الفروق الجوهرية بين النموذجين، وهي فروق تتجاوز التقنية إلى الفلسفة الاقتصادية التي تحكم التعامل مع الموارد. ولا يخفى أن تحقيق التحوّل الدائري يظل رهيناً بتوافر بنية تقنية قادرة على الفرز الدقيق وتتبع المواد، وهو ما يجعل التقنيات الذكية شرطاً ممكناً لهذا التحوّل لا مجرد إضافة تحسينية.

جدول (2-2): مقارنة بين النموذج الخطّي ونموذج الاقتصاد الدائري

وجه المقارنة	النموذج الخطّي	الاقتصاد الدائري
منطق الموارد	استخراج - استهلاك - تخلص	إبقاء المواد في الدورة أطول مدة
مفهوم النفاية	عبء يجب التخلص منه	مورد يُعاد استرداد قيمته
المؤشر المستهدف	سرعة الجمع والتخلص	نسبة التحويل عن الطمر والاسترداد
دور التقنية	هامشي / تشغيلي	ممكّن جوهري للفرز والتتبع
الأثر البيئي	انبعاثات وتلوّث متراكم	خفض الانبعاثات وصون الموارد

المصدر: إعداد الباحث استناداً إلى Ghosh (2020) و Ellen MacArthur Foundation (2013).

ويكتسب الاقتصاد الدائري في الحالة السعودية بُعداً إضافياً؛ فمع بلوغ النفايات العضوية والغذائية نحو نصف المتولّد، تتوافر مادة خام وفيرة للتسبيخ وتوليد الطاقة الحيوية لو أُحسن فرزها. وهنا يلتقي البُعدان التقني والاقتصادي: فالفرز الدقيق المدعوم بالتقنية هو البوابة التي تتحوّل عبرها النفاية من عبء يُدفع للتخلص منه إلى مورد يُدرّ عائداً، وهو ما يجعل الاستثمار في التقنية استثماراً في القيمة لا مجرد كلفة تشغيلية. وهذا المنطق تحديداً هو ما تستهدفه الاستراتيجية الوطنية حين تسعى إلى تحويل الجزء الأكبر من النفايات بعيداً عن المطامر.

4-2 التقنيات الذكية في إدارة النفايات

يُقصد بالتقنيات الذكية في هذا السياق منظومة الأدوات الرقمية المنبثقة عن الثورة الصناعية الرابعة، التي تُحوّل إدارة النفايات من عمليات تُدار بالحدس والجداول الثابتة إلى عمليات تُدار بالبيانات والاستجابة للحظية. وتتكامل هذه التقنيات في أربع طبقات رئيسة يعرضها هذا المبحث تباعاً، ويوضّحها الشكل (1-2) في تدرّجها من الطبقة الحسّية التي تلتقط البيانات إلى طبقة التكامل التي تتخذ القرار.

الطبقات الأربع للمنظومة الذكية لإدارة النفايات



شكل (1-2): الطبقات الأربع للمنظومة الذكية لإدارة النفايات

المصدر: إعداد الباحث.

1-4-2 إنترنت الأشياء (IoT)

يُمثّل إنترنت الأشياء الطبقة الحسّية للمنظومة الذكية؛ فهو شبكة من الحساسات المدمجة في الحاويات والمركبات تلتقط بيانات لحظية عن مستوى الامتلاء ودرجة الحرارة والموقع الجغرافي، وترسلها إلى منصات مركزية لاتخاذ القرار (Anagnostopoulos et al., 2017). وقد أثبتت المراجعات المنهجية أن دمج حساسات الامتلاء بأنظمة الجدولة الذكية يُغني عن الجمع الدوري غير الضروري ويُعيد توزيع الجهد على الحاويات التي تحتاج إليه فعلاً، بما ينعكس خفضاً

ملموساً في مسافات القطع والوقود والانبعاثات (Hannan et al., 2015). وعلى صعيد توجيه المركبات تحديداً، بيّنت دراسات نمذجة مسارات المركبات ذات السعة المحدودة أن خوارزميات التحسين — كخوارزمية سرب الطيور (PSO) — قادرة على إعادة رسم المسارات بكفاءة تفوق التوجيه اليدوي بفارقٍ اقتصاديٍّ معتبر (Hannan et al., 2018).

ولا تقف فائدة إنترنت الأشياء عند خفض عدد الرحلات، بل تمتد إلى تحويل الحاوية نفسها إلى مصدر بياناتٍ حيٍّ. فكل حاوية مزودة بحساسٍ تُصبح نقطةً في خريطةٍ لحظيةٍ لتوزّع النفايات في المدينة، تُغذي لوحات المتابعة وتنبّه إلى الحاويات المكتظة أو المعطلة قبل أن تتحوّل إلى مشكلةٍ بيئيةٍ أو شكوى مواطن. وبهذا المعنى فإن قيمة الطبقة الحسية لا تُقاس بالأجهزة بذاتها بل بالبيانات التي تولّدها، وهو ما يجعل نجاحها مرهوناً بوجود بنيةٍ لاستقبال هذه البيانات ومعالجتها — وهي حلقةٌ كثيراً ما تغيب في التطبيقات الجزئية.

2-4-2 الذكاء الاصطناعي والتعلّم الآلي

إذا كان إنترنت الأشياء عيني المنظومة، فإن الذكاء الاصطناعي عقلها المُفسّر. فخوارزميات التعلّم الآلي والرؤية الحاسوبية تُوظّف في تصنيف النفايات وفرزها آلياً إلى فئاتٍ (لدائن، ورق، معادن، زجاج، عضوي) بالاعتماد على تحليل الصور، وهو ما يرفع دقة الفرز وسرعته مقارنةً بالفرز اليدوي المُعرّض للخطأ والإرهاق. وقد أظهرت أنظمة الحاويات الذكية المزودة بنماذج الرؤية الحاسوبية دقة تصنيفٍ تجاوزت 95% في بعض التطبيقات، مع قدرةٍ على الفرز الميكانيكي الآلي (Design and Implementation of an IoT and ML-based Smart Waste Management System, 2024). وفي مراجعةٍ منهجيةٍ شاملةٍ لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات، خلص عبد الله وزملاؤه إلى أن هذه التطبيقات — من التنبؤ بالكميات إلى تحسين المسارات والتصنيف — تُحقّق تحسيناتٍ منهجيةً في الكفاءة، وإن ظلّت مشروطةً بجودة البيانات وتوافر البنية التحتية (Abdallah et al., 2020).

والأثر الأعمق للذكاء الاصطناعي لا يكمن في استبدال العامل البشري بل في تمكينه؛ فحين يتولّى النظام مهمة الفرز المتكرر والمرهق، يتحرّر العنصر البشري للإشراف والصيانة واتخاذ القرار، وترتفع دقة الفرز فترتفع تبعاً لها جودة المواد المستردة وقيمتها السوقية، وهو ما يُغذي الاقتصاد الدائري مباشرةً. غير أن هذه المنظومة تتطلب «وقوداً» من البيانات

المُصنَّفة لتدريب النماذج، وكوادر قادرة على تشغيلها وصيانتها، ولذلك فإن أي خطة لتبني الذكاء الاصطناعي لا تبدأ ببناء قاعدة البيانات وتأهيل الكوادر إنما تبني على رمال.

3-4-2 تحليل البيانات الضخمة والتنبؤ

تُشكل البيانات الضخمة الطبقة التحليلية الاستشرافية للمنظومة؛ إذ تُبنى عليها نماذج التنبؤ بكميات النفايات المتولدة استناداً إلى متغيرات سكانية واقتصادية وموسمية، بما يُمكن الجهات من التخطيط الاستباقي لتوزيع الحاويات وجدولة الأساطيل وتقدير الطاقة الاستيعابية للمرافق (Kaza et al., 2018). وحين تتكامل هذه النماذج مع بيانات الاستشعار اللحظية، تنتقل الإدارة من ردّ الفعل إلى الاستباق، فيصبح القرار مبنياً على توقّع محسوبٍ لا على ملاحظة متأخرة. غير أن جدوى هذه النماذج ترتبها بوجود بياناتٍ منظّمة وقابلة للتشغيل البيئي، وهو شرطٌ يُعدّ من أبرز نقاط الضعف في السياقات النامية.

والقيمة الاستراتيجية للبيانات الضخمة لا تقف عند التنبؤ بالكميات، بل تمتد إلى تحويل إدارة النفايات إلى منظومة تُقاس وتُحسّن باستمرار. فمن تحليل الأنماط الزمانية والمكانية لتوليد النفايات يمكن إعادة تصميم شبكة الحاويات ومواقع المرافق، ومن ربط بيانات التشغيل بمؤشرات الكلفة يمكن كشف مواطن الهدر، ومن مقارنة الأداء بين الأحياء والمدن يمكن نشر أفضل الممارسات. وبهذا تصبح البيانات هي اللغة المشتركة التي تُوحّد بين طبقات المنظومة المختلفة، وتفسّر لماذا وضع الباحثون توحيد البيانات في صدارة أولويات التحوّل.

4-4-2 التكامل والمنظومة الذكية

لا تتحقق القيمة الحقيقية لهذه التقنيات حين تعمل منفصلة، بل حين تتكامل في منظومة واحدة تنساب فيها البيانات من الحساس إلى الخوارزمية إلى منصة القرار. فالحساس يرصد، والخوارزمية تُصنّف وتنبأ، والمنصة توجّه وتُقيّم، في حلقة مغلقة من التحسين المستمر (Alwadei et al., 2024؛ Anagnostopoulos et al., 2017). وهذا تصوّر التكامل هو جوهر النموذج الإطار الذي تسعى الدراسة الحالية إلى بنائه، إذ إن ضعف التكامل — لا غياب التقنية بذاتها — هو ما يُعطّل كثيراً من المبادرات الجزئية القائمة.

ويمكن تشبيه المنظومة الذكية المتكاملة بالجهاز العصبي؛ فالحساسات أطرافٌ حسّية، والخوارزميات دماغٌ يُحلّل، ومنصّة القرار إرادةٌ تُوجّه، والبيانات هي النبضات التي تسري بينها. وحين ينقطع أيُّ من هذه الروابط تتحوّل الأجزاء إلى جزرٍ معزولةٍ عاجزةٍ عن التصرف الجمعي، وهو ما يفسّر لماذا تفشل الحلول التقنية المتفرقة مهما بلغت جودة كل قطعةٍ على حدة. ومن هنا فإن الرهان الحقيقي ليس على اقتناء أحدث الأجهزة، بل على نسج الروابط بينها ضمن حوكمةٍ رقميةٍ موحّدة — وهي الرسالة التي تتردّد في نتائج هذه الدراسة من أولها إلى آخرها.

5-4-2 التجارب الدولية الرائدة

تقدّم التجارب الدولية دروساً ثمينةً يمكن الاستفادة منها في السياق السعودي بعد مواءمتها. فمدينة سنغافورة تُعدّ من أبرز النماذج في هذا المجال؛ إذ بنت منظومةً متكاملةً تجمع بين محطات تحويل النفايات إلى طاقةٍ ومطمرٍ بحريٍّ مبتكرٍ (سيمكاو) ضمن مخطّطٍ وطنيٍّ للنفايات الصفرية، ووظّفت الاستشعار الذكي في مراقبة الحاويات والمرافق. وفي كوريا الجنوبية طُبّق نظام الرسوم القائمة على الحجم مع حاوياتٍ ذكيةٍ تعمل بتقنية التعريف بموجات الراديو (RFID) لنفايات الطعام، فحقّق خفضاً كبيراً في الكميات المتولدة عبر ربط الكلفة بالسلوك. أما المدن الأوروبية كبرشلونة فقد اعتمدت أنظمة الجمع الهوائي عبر الأنابيب وحاويات الاستشعار، في حين رسّخت مدنٌ أمريكيةٌ كسان فرانسيسكو ثقافة الفرز الإلزامي من المصدر والتسبيخ الواسع.

وتُظهر مقارنةً أُجريت بين الرياض ونماذج مثل سنغافورة وأمستردام أن الفارق الجوهرى لا يكمن في توافر التقنية بل في نضج البنية الرقمية وثقافة الفرز وحوكمة البيانات (Smart Planning of Waste Management System in Saudi Arabia, 2022). والدرس المستفاد أن نقل التجارب حرفياً لا يُجدي، وأن النجاح رهْنُ بمواءمتها مع الخصوصية المحلية تدريبياً — وهو ما ستؤكدّه لاحقاً شهادات الخبراء في الجانب الميداني من هذه الدراسة.

5-2 المنطلقات النظرية للدراسة

تستند الدراسة إلى خمسة أطرٍ نظريةٍ يكمل بعضها بعضاً في تفسير ظاهرة تبني التقنيات الذكية وتقييم أثرها. فبينما تشرح نظريتا الأنظمة والابتكار كيفية عمل المنظومة وانتشار الجديد فيها، يوفّر الاقتصاد الدائري والاستدامة معايير

الحكم على المخرجات، ويكشف نموذج قبول التقنية العوامل السلوكية التي تحسم نجاح التطبيق على أرض الواقع. ويلخص الجدول (2-3) هذه الأطر ووظيفة كلٍ منها في الدراسة.

نظرية الأنظمة الذكية: تفسر كيفية تكامل مكونات النظام التقني (الاستشعار والتحليل واتخاذ القرار) في كلٍ عضويٍّ يستجيب للمتغيرات البيئية والتشغيلية، وتوظف لفهم كيفية اندماج إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي والبيانات في منظومةٍ واحدة.

نظرية انتشار الابتكارات (Rogers, 2003): تُحدد مراحل تبني التقنيات الجديدة والعوامل المؤثرة فيه، كالميزة النسبية والتوافقية وقابلية التجريب، وتوفر عدسةً لتحليل عوامل تبني الحلول التقنية في المؤسسات البلدية السعودية.

نظرية الاقتصاد الدائري (Ellen MacArthur Foundation, 2013; Ghosh, 2020): تُقدم معيار الحكم على مدى إسهام الحلول التقنية في إغلاق دورة المواد وتقليل الهدر واسترداد القيمة.

نظرية الاستدامة البيئية (WCED, 1987): تُرسخ مفهوم التنمية المستدامة الموازن بين حاجات الحاضر وحقوق الأجيال القادمة، وتوفر إطاراً لتقييم الأثر البيئي للممارسات المختلفة.

نموذج قبول التقنية (Davis, 1989): يفسر قبول المستخدمين للتقنيات الجديدة عبر متغيري «سهولة الاستخدام المُدرّكة» و«المنفعة المُدرّكة»، ويُعين على فهم عوامل قبول الكوادر للحلول الذكية ومقاومتها لها.

وتستحق نظريتنا انتشار الابتكارات وقبول التقنية وقفهً أعمق لصلتهما المباشرة بنتائج هذه الدراسة. فوجز يرى أن تبني أي ابتكارٍ يمرّ بمراحل تبدأ بالمعرفة فالإقناع فالقرار فالتطبيق ثم التثبيت، وأن سرعة هذا التبني تتحدد بخمس خصائص: الميزة النسبية للابتكار، وتوافقه مع القيم والحاجات القائمة، ودرجة تعقيده، وقابليته للتجريب على نطاقٍ محدود، وقابلية ملاحظة نتائجه. وهذه الخصائص تُفسر لماذا يميل الممارسون — كما ستُظهر النتائج — إلى تفضيل الحلول الأبسط والأقل كلفةً (كالاستشعار) بوصفها الأسهل تجريباً وملاحظةً للنتائج، قبل الانتقال إلى الأعقد (كالفرز المؤتمت).

أما نموذج قبول التقنية فيُكمل هذه الصورة على المستوى الفردي؛ إذ يجعل من «المنفعة المُدرَكة» و«سهولة الاستخدام المُدرَكة» بوابتين لتشكّل نية استخدام التقنية ثم استخدامها الفعلي. ومقاومة التغيير التي كثيراً ما تُعزى إلى العاملين ليست في جوهرها رفضاً للتقنية بقدر ما هي انخفاضٌ في إدراك منفعتها أو سهولتها، وهو ما يُعالج ببناء القدرات والتدريب لا بالإلزام وحده. ولذلك سيتبيّن لاحقاً أن «بناء القدرات» يتصدّر عوامل النجاح في تصوّرات المبحوثين، تصديقاً لهذا الإطار النظري.

جدول (3-2): المنطلقات النظرية الخمس ووظيفة كلّ منها في الدراسة

النظرية / النموذج	المصدر الأصلي	وظيفتها في الدراسة
الأنظمة الذكية	أدبيات هندسة النظم	تفسير تكامل مكونات المنظومة الذكية
انتشار الابتكارات	Rogers (2003)	تحليل عوامل تبني التقنية مؤسسياً
الاقتصاد الدائري	EMF (2013); Ghosh (2020)	معيّار قياس إغلاق دورة المواد
الاستدامة البيئية	WCED (1987)	تقييم الأثر البيئي للحلول
قبول التقنية (TAM)	Davis (1989)	تفسير قبول الكوادر ومقاومتها

المصدر: إعداد الباحث.

2-6 السياق السعودي: رؤية 2030 والاستراتيجية الوطنية

لا يكتمل الإطار النظري دون ربطه بالسياق الذي تجري فيه الدراسة. فالمملكة العربية السعودية تمرّ بتحوّلٍ مؤسسيٍّ عميقٍ في قطاع النفايات؛ إذ صدر نظام إدارة النفايات عام 2021 لينظّم النقل والفرز والتخزين والتخلّص، وأنشئ المركز الوطني لإدارة النفايات (MWAN) ليشرف على القطاع ويعزّز مبادئ الاقتصاد الدائري، إلى جانب الشركة السعودية للاستثمار في إعادة التدوير (SIRC) بوصفها الذراع الاستثمارية (National Center for Waste Management, 2023). وتضع الاستراتيجية الوطنية لإدارة النفايات مستهدفاتٍ طموحةً أبرزها تحويل ما يصل إلى 90% من النفايات بعيداً عن المطامر بحلول عام 2040، بما ينسجم مع ركائز رؤية المملكة 2030 في الاستدامة والمدن الذكية (وزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان، 2022).

غير أن الفجوة بين طموح السياسات وواقع التطبيق تظل قائمة؛ إذ تشير الدراسات إلى أن مدينة كالرياض تواجه أربع مشكلاتٍ محوريةٍ في منظومتها: عدم كفاءة مسارات الجمع، والحاويات المكشوفة، وضعف جمع البيانات، ومحدودية

الفرز من المصدر (Smart Planning of Waste Management System in Saudi Arabia, 2022). وهذه المشكلات الأربع تكاد تكون ترجمةً حرفيةً للحاجة إلى الحلول التقنية الأربع التي عُرضت آنفاً، مما يمنح الدراسة الحالية مسوغاً عملياً واضحاً.

7-2 الدراسات السابقة: المحور الأول — إنترنت الأشياء في إدارة النفايات

حظي توظيف إنترنت الأشياء في إدارة النفايات باهتمامٍ بحثيٍّ مبكّرٍ ومتصاعد. فقد قدّم أناجنوستوبولوس وزملاؤه (2017) مسحاً تحليلياً شاملاً لبنية نظم إنترنت الأشياء في المدن الذكية، مُركّزين على التكامل بين البنية الحسية وأنظمة اتخاذ القرار في إدارة النفايات الصلبة؛ غير أن دراستهم انصبّت على السياق الأوروبي، وهو ما يترك مساحةً لاختبار هذه النماذج في بيئاتٍ مختلفةٍ كالبيئة السعودية. وفي مراجعةٍ منهجيةٍ للتقنيات المستخدمة في رصد النفايات وإدارتها، خلص هنّان وزملاؤه (2015) إلى أن منظومات الاستشعار المدمجة بخوارزميات الجدولة تُحقّق تحسّناً معتبراً في الكفاءة التشغيلية، لكنهم نّهوا إلى تحدياتٍ تتعلق بموثوقية الحساسات وكلفة الصيانة وتكامل البيانات.

وعلى صعيد تحسين المسارات تحديداً، طوّر هنّان وزملاؤه (2018) نموذجاً لمسارات المركبات ذات السعة المحدودة باستخدام خوارزمية سرب الطيور لجدولة جمع النفايات وتحسين مساراتها، وأثبتوا تفوّق التوجيه المُحسّن خوارزميةً على التوجيه اليدوي من حيث المسافة والكلفة. وفي السياق ذاته، قدّم مأمون وهنّان وزملاؤهما (2015) نظاماً متكاملماً لأجهزة الاستشعار وخوارزميات إدارة حالة حاويات النفايات آلياً، بينما استعرض لو وزملاؤه (2017) منظومات الجمع الحضري الذكية والخضراء وتحدياتها وآفاقها. وتُسهم هذه الدراسات مجتمعةً في تأسيس البنية التجريبية للفرضية الأولى في البحث الحالي، المتعلقة بأثر إنترنت الأشياء في خفض التكاليف التشغيلية للجمع.

8-2 المحور الثاني — الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات

تتجه موجةٌ بحثيةٌ متنامية إلى توظيف الذكاء الاصطناعي في قلب منظومة النفايات. فقد أنجز عبد الله وزملاؤه (2020) مراجعةً بحثيةً منهجيةً لتطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة النفايات الصلبة، صنّفوا فيها هذه التطبيقات إلى تنبؤٍ بالكميات، وتحسينٍ للمسارات، وتصنيفٍ آليٍّ للمواد، وخلصوا إلى أن النماذج القائمة على التعلّم الآلي تتفوّق باطرادٍ على

الأساليب التقليدية، شريطة توافر بيانات كافية وعالية الجودة. وهذه الخلاصة تُشكّل سنداً مباشراً للفرضية الثانية في البحث الحالي حول ارتباط الذكاء الاصطناعي بارتفاع معدلات إعادة التدوير.

وفي التطبيقات العملية للحاويات الذكية، بيّنت دراسات حديثة أن أنظمة الرؤية الحاسوبية المدمجة في حاويات مزوّدة بالفرز الميكانيكي بلغت دقة تصنيف تجاوزت 95%، مع قدرة على تمييز اللدائن والزجاج والورق والمعادن والمواد العضوية أنياً، وربط ذلك بأهداف رؤية 2030 والاقتصاد الدائري (Design and Implementation of an IoT and ML-based Smart Waste Management System, 2024). ويكشف هذا الرقم عن الفارق النوعي بين الفرز الآلي واليدوي، ويُبرز الإمكان الكامن الذي تسعى الدراسة إلى قياس إدراك الممارسين له في السياق السعودي.

9-2 المحور الثالث — الاستدامة والاقتصاد الدائري والسياسات العربي

على المستوى الإقليمي، قدّم عبد الشافي ومنصور (2018) دراسة تفصيلية لمنظومة إدارة النفايات الصلبة في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، حدّدا فيها العوامل الثقافية والتنظيمية والمالية المؤثرة في فاعلية المنظومة، وأبرزاً هيمنة الطمر غير المُعالج وتدني التدوير. وفي إطارٍ أوسع، ناقش فيروناتو وتوريتا (2019) في مراجعة عالمية إشكالية سوء إدارة النفايات في الدول النامية، مُركّزين على الفجوة بين السياسات المُعلنة والممارسات الفعلية، وهي فجوة تتردّد أصدائها بوضوح في السياق السعودي. أما غوش (2020) فقدّم تحليلاً لنماذج الاقتصاد الدائري وآليات تقييم الأداء البيئي المرتبط بها، بما يوفّر للدراسة الحالية إطاراً لقياس أثر الحلول التقنية على المؤشرات البيئية.

وعلى المستوى الوطني، تكتسب الدراسات السعودية أهمية خاصة لقربها من موضوع البحث. فقد اقترح الوداعي وزملاؤه (2024) نموذجاً لمنظومة إدارة نفايات ذكية في المملكة يقوم على التعلّم الآلي وإنترنت الأشياء ومبادئ الاقتصاد الدائري، مؤكّدين توافقه مع مستهدفات التنمية المستدامة وتقنيات الصناعة الرابعة. كما قارن القحطاني وزملاؤه (2022) بين بدائل تقنية متعددة لإدارة النفايات في المملكة — من الأنابيب الهوائية إلى محطات توليد الطاقة إلى الحاويات المدعومة بإنترنت الأشياء — من زاوية الجدوى الاقتصادية والبيئية. وتتفق هذه الدراسات على وجود إمكانٍ كامنٍ كبير، لكنها

تُجمع كذلك على أن العائق ليس في التقنية بحدّ ذاتها، بل في البنية التحتية الرقمية وندرة البيانات المنظّمة وضعف التشغيل البيئي، وهو ما يوجّه بوصلة الدراسة الحالية نحو قياس الجاهزية والعوائق لا مجرد استعراض التقنيات. وتتقاطع مع هذا الاتجاه دراسات ميدانية سعودية أخرى؛ فقد تناولت دراسة في مكة المكرمة تطبيق إنترنت الأشياء في إدارة النفايات بالمناطق العامة الرسمية وغير الرسمية، مقترحةً استراتيجيةً للجمع تصل إلى المناطق التي يصعب على الشاحنات التقليدية بلوغها. كما وظّفت دراسة في جدة أساليب تصميم التجارب ومنهجية سطح الاستجابة لتحسين معاملات جمع النفايات وخفض كلفة الرحلة الواحدة، تأكيداً على أن تحسين العمليات بالبيانات يُحقّق وفراً ملموساً حتى قبل الانتقال إلى الحلول الأكثر تعقيداً. وتُثري هذه الأعمال مجتمعةً الأرضية المحلية التي تنطلق منها الدراسة الحالية، وتؤكد أن الحراك البحثي في المملكة يتّجه بوضوح نحو التقنيات الذكية وإن ظلّ مبعثراً في مبادرات جزئية تنتظر إطاراً جامعاً.

10-2 التعقيب على الدراسات السابقة

يتّضح من الاستعراض السابق أن الأدبيات قطعت شوطاً في إثبات جدوى كلّ من إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات على حدة، وأن ثمة توافقاً واسعاً على أن الأساليب التقليدية باتت قاصرةً عن مواكبة حجم التحدي. غير أن قراءة نقدية لهذه الدراسات تكشف عن ملاحظات ثلاث: أولاً أن معظم البحوث ذات القيمة التجريبية العالية أُجريت في سياقاتٍ أوروبية وآسيوية متقدمة رقمياً، مما يحدّ من قابلية تعميم نتائجها على بيئات ذات جاهزية مختلفة. وثانيها أن الدراسات نزعّت إلى تناول كل تقنية منعزلةً عن أخواتها، فقلّت الأعمال التي عالجت التكامل بينها في منظومة واحدة. وثالثها أن الجانب المؤسسي والبشري — من التمويل والتشريع والكوادر ومقاومة التغيير — ظلّ في كثيرٍ من الأحيان في هامش الاهتمام مقارنةً بالجانب التقني البحث. ويوجز الجدول (4-2) أبرز الدراسات المستعرضة.

جدول (4-2): ملخص أبرز الدراسات السابقة

الدراسة	المجال	المنهج	أبرز نتيجة
Anagnostopoulos et al. (2017)	إنترنت الأشياء	مسح تحليلي	بنية تكاملية لنظم النفايات في المدن الذكية
Hannan et al. (2015)	الاستشعار والرصد	مراجعة منهجية	تحسّن الكفاءة مع تحديات الموثوقية والكلفة
Hannan et al. (2018)	تحسين المسارات	نمذجة (PSO)	تفوّق التوجيه الخوارزمي على اليدوي
Abdallah et al. (2020)	الذكاء الاصطناعي	مراجعة منهجية	تفوّق التعلّم الآلي مشروطاً بجودة البيانات
Abdel-Shafy & Mansour (2018)	الشرق الأوسط	دراسة حالة	هيمنة الطمر وتدني التدوير إقليمياً
Ferronato & Torretta (2019)	الدول النامية	مراجعة علمية	فجوة بين السياسات والممارسة
Alwadei et al. (2024)	السعودية	نموذج مقترح	منظومة ذكية قائمة على IoT والتعلّم الآلي
Alqahtani et al. (2022)	السعودية	تحليل بدائل	مقارنة جدوى الحلول التقنية محلياً

المصدر: إعداد الباحث.

11-2 الفجوة البحثية

بناءً على التعقيب السابق، تتحدّد الفجوة البحثية التي تنهض هذه الدراسة لسدّها في أربعة أبعادٍ متداخلة:

الفجوة الجغرافية: ندرة الدراسات التي تعالج السياق السعودي تحديداً بخصوصيته التنظيمية والاجتماعية، مقابل وفرتها في السياقات الأوروبية والآسيوية.

الفجوة المنهجية: غلبة المنهج الكمي وحده أو النوعي وحده على الأدبيات، وقلة الأعمال التي تجمع بينهما لتقديم فهم أعمق كما تفعل الدراسة الحالية بمنهجها المختلط.

الفجوة التكاملية: ندرة الدراسات التي عالجت التكامل بين التقنيات المختلفة في منظومة واحدة، وغياب النماذج الإطارية القابلة للتطبيق في البيئة السعودية.

الفجوة التقييمية: افتقار الميدان إلى أدوات مُقنّنة لقياس مستوى جاهزية المؤسسات البلدية السعودية لتبني هذه التقنيات، وهو ما تسدّه أداة الدراسة الحالية.

وتبتاطع هذه الأبعاد الأربعة يتحدّد موقع الدراسة الحالية بوصفها محاولةً لتقديم قراءةٍ متكاملةٍ — جغرافياً ومنهجياً وتقنياً وتقييمياً — لواقع التحوّل الذكي في إدارة النفايات بالمدن السعودية الكبرى.

12-2 خلاصة الفصل

عرض هذا الفصل الإطار المفاهيمي لإدارة النفايات وهرمها الهرمي، وتحولها من النموذج الخطّي إلى الاقتصاد الدائري، ثم فصل الطبقات الأربع للتقنيات الذكية وأطرها النظرية الخمسة، وربطها بالسياق السعودي ومستهدفاته. وفي شقّه الثاني استعرض الدراسات السابقة موضوعياً وعقّب عليها نقدياً، ليخلص إلى فجوة بحثية رباعية الأبعاد تُشكّل مسوّغ الدراسة. ويُهمّد هذا كلّهُ للفصل الثالث الذي يعرض المنهجية والإجراءات التي اتُبعت في الجانب الميداني لاختبار فرضيات الدراسة والإجابة عن أسئلتها.

الفصل الثالث: الطريقة والإجراءات

1-3 تمهيد

يتناول هذا الفصل الجانب الإجرائي للدراسة، فيعرض المنهج المتبع ومسوّغات اختياره، ثم يحدّد مجتمع الدراسة وعيّنتها الكمية والنوعية ويصف خصائصهما الفعلية، ويشرح بعد ذلك أداتي جمع البيانات وكيفية بناءهما، ويعرض إجراءات التحقق من صدقهما وثباتهما بالاستناد إلى نتائج حقيقية من التطبيق الميداني، ويختّم بالأساليب الإحصائية وأسلوب التحليل النوعي المعتمدين في معالجة البيانات. والغاية من هذا العرض أن يتّضح للقارئ كيف تُرجمت أسئلة الدراسة وفرضياتها إلى خطواتٍ عمليةٍ منضبطةٍ يمكن تتبعها والتحقق منها.

2-3 منهج الدراسة

تنتهي هذه الدراسة إلى النوع الوصفي التحليلي التطبيقي، إذ تسعى إلى وصف واقع توظيف الحلول التقنية في إدارة النفايات بالمدن السعودية وتحليل العوامل المؤثرة فيه، وصولاً إلى اقتراح نموذجٍ إطاريٍّ للتطبيق. وقد اعتمدت الدراسة المنهج المختلط (Mixed Methods) بتصميمه التسلسلي التفسيري (Sequential Explanatory Design)، الذي يُنفَّذ فيه الجانب الكمي أولاً ثم يُستكمل بالجانب النوعي لتفسير النتائج وتعميقها (Creswell & Plano Clark, 2018).

ويرجع اختيار هذا التصميم إلى طبيعة المشكلة ذاتها؛ فقياس مستوى الجاهزية وإدراك العوائق يحتاج إلى بياناتٍ كميةٍ قابلةٍ للتعميم تُجمع بالاستبانة، في حين أن فهم خلفيات هذه الأرقام وتفسير جذور العوائق يتطلب بياناتٍ نوعيةٍ عميقةً تُجمع بالمقابلة. وبالجمع بين الأداتين تتكامل الصورة، فتُغطّي المقابلات ما قد تُغفله الأرقام، وتُرسّخ الأرقام ما قد يبدو في المقابلات انطباعاً فردياً، بما يعزّز صدق النتائج عبر تثليث مصادر البيانات.

3-3 مجتمع الدراسة

يتألف مجتمع الدراسة من العاملين والمسؤولين في منظومات إدارة النفايات بالمدن السعودية الرئيسية (الرياض وجدة والدمام)، على اختلاف مستوياتهم الإدارية والتقنية والأكاديمية. ويضم هذا المجتمع فئاتٍ أربعاً رئيسة: المسؤولين

وصانعي القرار في الجهات الحكومية والهيئات، والمسؤولين التنفيذيين في الأمانات والبلديات، والمديرين التقنيين في شركات إدارة النفايات، والباحثين والخبراء الأكاديميين المتخصصين في الإدارة البيئية وتقنيات المدن الذكية. وقد رُوعي في تحديد المجتمع أن يشمل من هم على تماسٍ مباشرٍ بموضوع الدراسة قراراً أو تنفيذاً أو بحثاً.

4-3 عينة الدراسة وخصائصها

لما كانت الدراسة تجمع بين منهجين، فقد اعتمدت أسلوبين متميزين في اختيار العينة بحسب طبيعة كل مرحلة، على النحو الآتي.

1-4-3 العينة الكمية (الاستبانة)

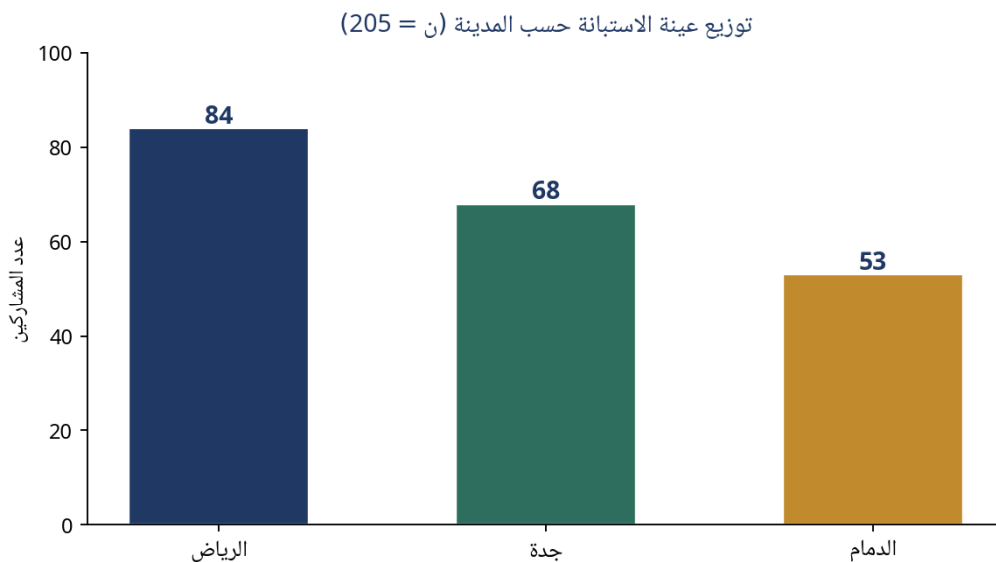
اختيرت عينة الاستبانة بأسلوب العينة القصدية الطبقية، بما يضمن تمثيلاً متوازناً للمدن الثلاث والمستويات الوظيفية المختلفة. وقد بلغ عدد الاستجابات الصالحة للتحليل (205) استجاباتٍ، وهو حجمٌ يفي بمتطلبات التحليل الإحصائي البارامتري ويتجاوز الحد الأدنى الموصى به لمثل هذه المجتمعات (Krejcie & Morgan, 1970). ويعرض الجدول (1-3) التوزيع التفصيلي لخصائص هذه العينة.

جدول (1-3): توزيع عينة الاستبانة وفق المتغيرات الديموغرافية والوظيفية (ن = 205)

المتغير	الفئة	التكرار	النسبة %
الجنس	ذكر	143	69.8
	أنثى	62	30.2
المسمى الوظيفي	مدير تقني	55	26.8
	مسؤول تنفيذي بلدي	52	25.4
	باحث / خبير أكاديمي	51	24.9
	مسؤول / صانع قرار	47	22.9
	أقل من 5 سنوات	35	17.1
	من 5 إلى أقل من 10	65	31.7
سنوات الخبرة	من 10 إلى أقل من 15	56	27.3
	15 سنة فأكثر	49	23.9
نوع المؤسسة	أمانة / بلدية	63	30.7
	شركة إدارة نفايات	59	28.8

المتغير	الفئة	التكرار	النسبة %
المدينة	وزارة / هيئة حكومية	42	20.5
	جهة أكاديمية / بحثية	41	20.0
	الرياض	84	41.0
	جدة	68	33.2
	الدمام	53	25.9
	بكالوريوس	99	48.3
المؤهل العلمي	ماجستير	63	30.7
	دكتوراه	32	15.6
	أخرى	11	5.4

يتبين من الجدول تنوعٌ محمودٌ في تركيبة العينة؛ فقد توزعت على المستويات الوظيفية الأربعة بنسبٍ متقاربة (تراوحت بين 22.9% و 26.8%)، مما يقلل من تحيز النتائج لفئةٍ بعينها. كما شملت العينة أصحاب الخبرة الطويلة (23.9% ممن تتجاوز خبرتهم 15 عاماً) إلى جانب حديثي الخبرة، وهو ما يُثري التصورات المجموعة. وجاءت المدن الثلاث ممثلةً بنسبٍ منطقيةٍ تتناسب مع حجمها النسبي في توليد النفائات، بتصدر الرياض (41.0%) ثم جدة (33.2%) فالدمام (25.9%)، كما يوضح الشكل (1-3).



شكل (1-3): توزيع عينة الاستبانة حسب المدينة (ن = 205)

2-4-3 العينة النوعية (المقابلات)

اختيرت عينة المقابلات بأسلوب العينة القصدية الهادفة، مستهدفةً الخبراء والممارسين ذوي الصلة المباشرة والمعرفة العميقة بموضوع الدراسة. وقد أُجريت (35) مقابلةً شبه منظّمةً خلال الفترة من منتصف يونيو 2026، تراوحت مدة كلّ منها بين نحو خمس وعشر دقائق. ويعرض الجدول (2-3) توزيع هذه العينة وفق صفة المبحوث وجهة عمله ومدينته.

جدول (2-3): توزيع عينة المقابلات النوعية (ن = 35)

المتغير	الفئة	التكرار
الفئة المهنية	مهندسون وتقنيون ميدانيون	13
	مدирون وقياديون تنفيذيون	10
	مستشارون ومسؤولو استدامة	7
	أكاديميون وباحثون	5
جهة العمل	شركات القطاع الخاص والتدوير	20
	جهات حكومية وبلدية	8
	جهات أكاديمية	7
المدينة	جدة	15
	الرياض	12
	الدمام	8

ويلاحظ أن العينة النوعية جمعت بين ثلاثة روافد معرفية متكاملة: الرافد الهندسي التقني الذي يعرف تفاصيل التشغيل الميداني، والرافد الإداري القيادي الذي يلمّ بالقرار والتمويل، والرافد الأكاديمي الذي يمنح العمق النظري والمقارن. وهذا التنوع مقصودٌ لضمان ثراء البيانات النوعية وتعدّد زوايا النظر إلى الظاهرة.

5-3 أدوات الدراسة

اعتمدت الدراسة أداتين رئيسيتين لجمع البيانات، صُمّمت كلّ منهما لتخدم أحد جانبي المنهج المختلط.

1-5-3 الاستبانة المُقنّنة

بُنيت الاستبانة استناداً إلى الأدبيات النظرية والدراسات السابقة، وصيغت عباراتها بلغة واضحة محايدة. وتكوّنت في صورتها النهائية من جزءٍ تمهيديٍّ للبيانات الديموغرافية والوظيفية، وثلاثة محاورٍ رئيسيةٍ تضم في مجملها (47) عبارةً

تُقاس على مقياس ليكرت الخماسي المتدرّج من «موافق بشدة» إلى «غير موافق بشدة» (Likert, 1932). ويوضّح الجدول (3-3) مكّونات الاستبانة.

جدول (3-3): مكّونات الاستبانة وعدد عبارات كل محور

المحور	ما يقيسه	عدد العبارات
الأول	واقع إدارة النفايات وكفاءتها التشغيلية	12
الثاني	جاهزية وتطبيق الحلول التقنية	20
الثالث	العوائق والعوامل الحاسمة للنجاح	15
الإجمالي	—	47

المصدر: إعداد الباحث.

ولتفسير المتوسطات الحسابية للاستجابات، اعتمد معيار الحكم القائم على تقسيم المدى (4 = 5-1) على عدد الفئات (5)، فنتج طول فئة مقداره (0.80)، وعلى أساسه حُدّدت مستويات الحكم المبينة في الجدول (4-3).

جدول (4-3): معيار الحكم على المتوسطات الحسابية وفق مقياس ليكرت الخماسي

المدى	درجة الموافقة	مستوى التقدير
1.79 – 1.00	غير موافق بشدة	منخفض جداً
2.59 – 1.80	غير موافق	منخفض
3.39 – 2.60	محايد	متوسط
4.19 – 3.40	موافق	مرتفع
5.00 – 4.20	موافق بشدة	مرتفع جداً

2-5-3 دليل المقابلة شبه المنظمة

صُمم دليل المقابلة ليكون امتداداً تفسيريّاً للاستبانة، فاشتمل على أربعة عشر سؤالاً رئيساً مفتوحاً موزّعاً على خمسة محاور: واقع إدارة النفايات وتقييم كفاءتها الراهنة، والحلول التقنية المطبّقة أو المختبرة وتقييم تجربتها، والعوائق والتحديات على أرض الواقع، ومستوى جاهزية البنية التحتية الرقمية والمؤسسية، ثم الرؤى والتوصيات المستقبلية من منظور الخبراء والممارسين. وقد صيغت الأسئلة بطريقة تُتيح للمبحوث الاسترسال والتعبير الحر، مع احتفاظ الباحث بمرونة في طرح أسئلة استيضاحية تبعاً لسياق كل مقابلة.

6-3 صدق الأداة

للتحقق من صدق الاستبانة اعتمد نوعان من الصدق. أولهما صدق المحتوى، إذ عُرضت الأداة في صورتها الأولية على لجنة من سبعة محكمين من ذوي الخبرة في الإدارة البيئية ونظم المعلومات، وطلب إليهم الحكم على مدى انتماء كل عبارة لمحورها وسلامة صياغتها ووضوحها. وقد أخذ بملاحظاتهم في تعديل صياغة بعض العبارات وحذف ما تكرر منها، بما يعزّز الصدق الظاهري والمنطقي للأداة. وثانيهما الصدق البنائي، الذي يُستدل عليه من الاتساق الداخلي العالي بين عبارات كل محور، وهو ما تعكسه معاملات الثبات المرتفعة المعروضة في المبحث التالي، فالثبات المرتفع قرينة على تجانس العبارات في قياس البعد الواحد.

7-3 ثبات الأداة

قُدِّر ثبات الاستبانة بحساب معامل ألفا كرونباخ لكل محور على حدة وللأداة ككل، بوصفه المؤشر الأكثر شيوعاً لقياس الاتساق الداخلي. ويُعدّ المعامل مقبولاً إذا تجاوز (0.70) وجيداً إذا تجاوز (0.80) وممتازاً إذا تجاوز (0.90) (Nunnally & Bernstein, 1994). وقد جاءت النتائج الفعلية مرتفعة على نحوٍ لافت كما يبيّن الجدول (5-3).

جدول (5-3): معاملات ثبات ألفا كرونباخ لمحاور الاستبانة (ن = 205)

المحور	عدد العبارات	معامل ألفا كرونباخ	التقدير
واقع إدارة النفايات وكفاءتها	12	0.912	ممتاز
جاهزية وتطبيق الحلول التقنية	20	0.936	ممتاز
العوائق والعوامل الحاسمة	15	0.930	ممتاز
الأداة ككل	47	0.933	ممتاز

يتّضح من الجدول أن جميع معاملات الثبات تجاوزت حدّ الامتياز (0.90)، وبلغ معامل الثبات الكلي (0.933)، وهي قيمة تدل على اتساقٍ داخليٍّ عالٍ جداً بين عبارات الأداة وعلى موثوقيتها في قياس ما وُضعت لقياسه. وبذلك تتوافر للأداة شروط الصدق والثبات اللازمة للاطمئنان إلى نتائجها.

8-3 الأساليب الإحصائية

عُولجت البيانات الكمية باستخدام حزمة البرامج الإحصائية للعلوم الاجتماعية (SPSS)، وذلك بتوظيف مجموعةٍ من

الأساليب الإحصائية الوصفية والاستدلالية بما يتناسب مع أسئلة الدراسة وفرضياتها، وهي:

- الإحصاء الوصفي: التكرارات والنسب المئوية لوصف خصائص العينة، والمتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية لقياس اتجاهات الاستجابة على عبارات المحاور.
- معامل ألفا كرونباخ للتحقق من ثبات الأداة واتساقها الداخلي.
- معامل ارتباط بيرسون لقياس العلاقة بين محاور الدراسة واختبار الفرضيات الارتباطية.
- اختبار (ت) للعينات المستقلة لفحص الفروق بين مجموعتين (كالجنس).
- تحليل التباين الأحادي (ANOVA) لفحص الفروق بين ثلاث مجموعاتٍ فأكثر (كالمدينة ونوع المؤسسة).
- تحليل الانحدار لقياس القدرة التنبؤية للمتغيرات المستقلة في تفسير المتغير التابع.

9-3 إجراءات جمع البيانات

مرّ جمع البيانات بمرحلتين متتابعتين اتّساقاً مع التصميم التسلسلي التفسيري. ففي المرحلة الأولى وُزعت الاستبانة إلكترونياً على المستهدفين في المؤسسات الثلاث عبر روابط رقمية، مع رسالة تعريفية توضح هدف الدراسة وتؤكد سرية البيانات، وأُتيح للمشاركين وقتٌ كافٍ للاستجابة، ثم رُوجعت الاستجابات واستُبعد غير المكتمل منها للإبقاء على الاستجابات الصالحة للتحليل. وفي المرحلة الثانية أُجريت المقابلات شبه المنظمة مع العينة القصدية خلال شهر يونيو 2026، بعد الاتفاق المسبق مع كل مبحوثٍ على الموعد، وسُجّلت الإجابات وفُرِغت نصياً تمهيداً لترميزها وتحليلها. وقد رُوعي في ترتيب المرحلتين أن تُغذّي نتائج الاستبانة صياغة محاور المقابلة بما يعمّق تفسير الأرقام.

10-3 الاعتبارات الأخلاقية

التزمت الدراسة بجملةٍ من الضوابط الأخلاقية التي تحفظ حقوق المشاركين وتصون موثوقية البيانات. فقد كانت المشاركة طوعيةً بالكامل، وأُحيطَ بالمبحوثون علماً بهدف الدراسة وبحقّهم في الانسحاب في أي وقت، ولم تتطلب الأداة ذكر الاسم صوناً لخصوصية المشاركين. كما اقتصر استخدام البيانات على أغراض البحث العلمي فحسب، وعُومِلت بسريةٍ تامة، وحُفِظَت بصورةٍ آمنة، وعُرضت نتائجها في صيغٍ إجماليةٍ لا تكشف هوية أيٍّ مشاركٍ بعينه. وبذلك تكون الدراسة قد وازنت بين متطلبات الدقة العلمية واحترام كرامة المشاركين وخصوصيتهم.

11-3 أسلوب تحليل البيانات النوعية

حُلِّلت بيانات المقابلات بأسلوب التحليل الموضوعي (Thematic Analysis) وفق منهجية براون وكلاارك، التي تمرّ بستّ مراحلٍ متتالية: التآلف مع البيانات، ثم توليد الرموز الأولية، فالبحث عن الموضوعات، ومراجعتها، وتعريفها وتسميتها، وأخيراً كتابة التقرير (Braun & Clarke, 2006). وقد رُمِزت استجابات المبحوثين ترميزاً مفتوحاً ثم محورياً لاستخلاص الأنماط المتكررة والموضوعات الجامعة، بما يُتيح تفسير النتائج الكمية وإسنادها بشهاداتٍ ميدانيةٍ من أهل الخبرة.

12-3 خلاصة الفصل

عرض هذا الفصل المنهج المختلط بتصميمه التسلسلي التفسيري ومسوّغاته، وحدّد مجتمع الدراسة وعيّنتيه الكمية (205) والنوعية (35) وخصائصهما الفعلية، ووصف أداتي الاستبانة والمقابلة وبنيتهما، وأثبت تمتّع الأداة بصديقٍ مناسبٍ وثباتٍ ممتاز (ألفا كرونباخ الكلي = 0.933)، ثم بيّن الأساليب الإحصائية وأسلوب التحليل النوعي المعتمدين. وبهذا تكون الأرضية الإجرائية قد اكتملت، ليأتي الفصل الرابع عرضاً وتحليلاً ومناقشةً لنتائج التطبيق الميداني.

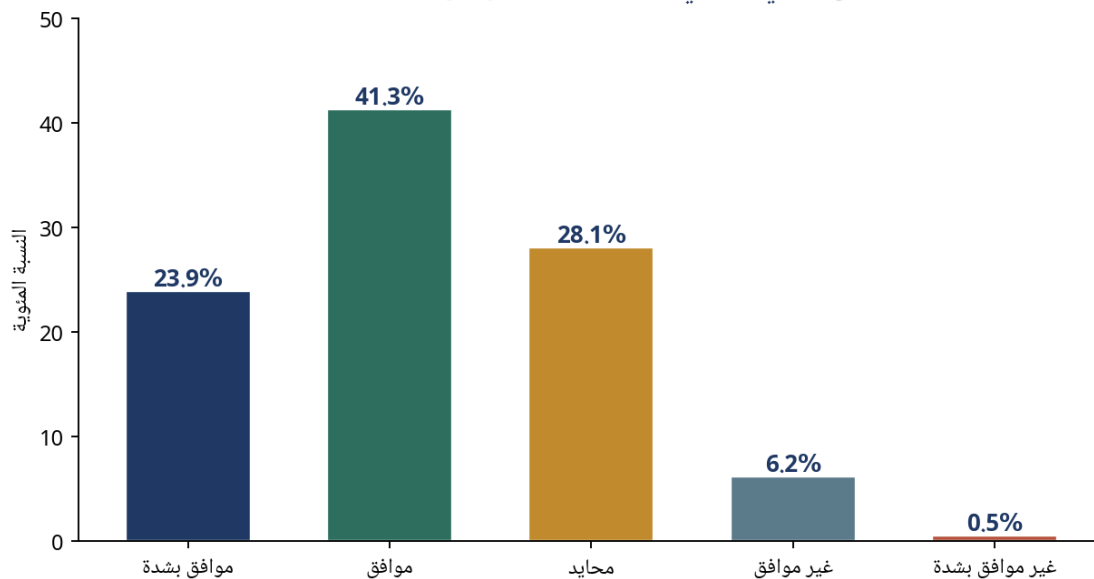
الفصل الرابع: عرض النتائج ومناقشتها

1-4 تمهيد

يعرض هذا الفصل نتائج الدراسة الميدانية بشقيها الكمي والنوعي، ويناقشها في ضوء الإطار النظري والدراسات السابقة. ويبدأ بعرض النتائج الوصفية لمحاوَر الاستبانة الثلاثة عبارةً عبارةً مرتبةً تنازلياً بحسب متوسطاتها، ثم يقارن بين المحاوَر، وينتقل بعد ذلك إلى اختبار فرضيات الدراسة الخمس بالأساليب الاستدلالية، فيعرض نتائج التحليل الموضوعي للمقابلات، ويُختم بمناقشةٍ تجمع خيوط النتائج وتربطها بما توصّلت إليه الأدبيات. وقد اعتمد في الحكم على المتوسطات معيار الفئات الخماسية المبين في الفصل الثالث.

وقبل الدخول في تفصيل المحاوَر، يُعطي الشكل (4-4) صورةً إجماليةً لاتجاه استجابات المبحوثين على عبارات الاستبانة كافة؛ إذ يتبين منه أن الموافقة بنوعها (موافق وموافق بشدة) استحوذت على نحو 65% من مجموع الاستجابات، مقابل نحو 28% من الحياد، ولم تتجاوز نسبة عدم الموافقة 7%. وهذا التوزيع يعكس ميلاً عاماً نحو الإقرار بمضامين الاستبانة — قصوراً في الواقع وأهميةً للحلول والعوامل الحاسمة — مع حضور ملحوظٍ للحياد يعكس تحفظ بعض المبحوثين إزاء جاهزيةٍ لم تكتمل بعد.

التوزيع النسبي الإجمالي لاستجابات المبحوثين على عبارات الاستبانة



شكل (4-4): التوزيع النسبي الإجمالي لاستجابات المبحوثين على عبارات الاستبانة

2-4 نتائج المحور الأول: واقع إدارة النفائات وكفاءتها التشغيلية

يجيب هذا المحور عن السؤال الأول المتعلق بواقع منظومة إدارة النفائات ومستوى كفاءتها. ويعرض الجدول (4-1)

المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية لعباراته الاثنتي عشرة مرتبةً تنازلياً.

جدول (4-1): المتوسطات والانحرافات لعبارات محورو اق إدارة النفائات (ن = 205)

الرتبة	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
1	تُوجَّه مسارات مركبات الجمع بصورة يدوية دون الاستعانة بأنظمة توجيه ذكية	3.94	0.90	مرتفع
2	ثمة حاجة ملحة لتطوير منظومة إدارة النفائات في مؤسستي نحو نموذج أكثر كفاءة	3.94	0.87	مرتفع
3	يُعدّ مستوى كفاءة عمليات الفرز في مؤسستي منخفضاً مقارنةً بالمستهدف	3.94	0.90	مرتفع
4	تُجمع النفائات وفق جداول زمنية ثابتة دون مراعاة لمستوى امتلاء الحاويات	3.89	0.91	مرتفع
5	تعتمد منظومة إدارة النفائات في مؤسستي على أساليب تقليدية في الجمع والنقل	3.88	0.87	مرتفع
6	تواجه المؤسسة ارتفاعاً ملحوظاً في التكاليف التشغيلية لعمليات الجمع والنقل	3.87	0.97	مرتفع
7	تعاني المنظومة من ضعف في دقة بيانات كميات النفائات المتولدة وتوزيعها	3.87	0.84	مرتفع
8	تُسبب الممارسات الحالية لإدارة النفائات آثاراً بيئية سلبية ملموسة	3.86	0.95	مرتفع
9	تفتقر المنظومة إلى مؤشرات أداء واضحة لقياس كفاءة العمليات	3.86	0.88	مرتفع
10	لا تتجاوز نسبة إعادة التدوير في نطاق عمل مؤسستي المعدلات المأمولة	3.85	0.84	مرتفع
11	يتدفق جزء كبير من النفائات إلى المكبات دون معالجة أو فرز مناسب	3.84	0.88	مرتفع
12	يتسم الأداء التشغيلي الحالي بالبطء في الاستجابة للمستجدات	3.84	0.91	مرتفع

يتّضح من الجدول أن جميع عبارات المحور جاءت بمستوى تقديرٍ مرتفع، وأن المتوسط العام للمحور بلغ (3.88)

بانحرافٍ معياريٍّ (0.64)، وهو مستوى مرتفع. ودلالة ذلك أن المبحوثين يُدركون بوضوحٍ أوجه قصور الأساليب التقليدية

القائمة؛ فقد تصدرت القائمة عباراتٌ تتعلق بالتوجيه اليدوي لمسارات الجمع، والحاجة الملحة للتطوير، وتدني كفاءة

الفرز (بمتوسط 3.94 لكلٍ منها). ولا يخفى ما في هذا الإدراك العالي من مؤشرٍ إيجابي؛ إذ إن وعي الممارسين بالمشكلة هو

الخطوة الأولى نحو تقبّل الحلول، وهو ما يتقاطع مع ما رصده فيزوناتو وتوريّا (2019) من أن أزمة إدارة النفائات في

الدول النامية تُدرّك جيداً لكنها تصطدم بفجوةٍ في التطبيق.

والملاحظ أن العبارات الأعلى في هذا المحور تتمحور حول ثلاثة أعراضٍ مترابطة: التوجيه اليدوي للمسارات، وتدني كفاءة الفرز، والحاجة الملحة للتطوير. وهي في حقيقتها أعراضٌ لمرضٍ واحدٍ هو غياب البيانات والأتمتة، إذ يتعدّر التوجيه الذكي دون بياناتٍ لحظية، ويتعدّر الفرز الفعّال دون تقنية، وتتولّد الحاجة للتطوير من إدراك هذين النقصين. أما تقارب متوسطات العبارات جميعاً في نطاقٍ ضيقٍ (3.84–3.94) فيدل على اتفاقٍ عريضٍ بين المبحوثين لا على آراءٍ متشتتة، وهو اتفاقٌ يمنح صانع القرار أرضيةً صلبةً للانطلاق.

3-4 نتائج المحور الثاني: جاهزية وتطبيق الحلول التقنية

يجيب هذا المحور عن السؤالين الثاني والثالث المتعلقين بالحلول التقنية ومستوى الجاهزية لاستيعابها. ويعرض الجدول (2-4) نتائج عباراته العشرين مرتّبةً تنازلياً.

جدول (2-4): المتوسطات والانحرافات لعبارات محور جاهزية الحلول التقنية (ن = 205)

الرتبة	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
1	تُطبّق أو تُختبَر حالياً أجهزة استشعار لرصد مستوى امتلاء الحاويات	3.77	0.82	مرتفع
2	تتوافر بيانات منظمة وقابلة للتشغيل البيئي بين الأنظمة المختلفة	3.75	0.85	مرتفع
3	تُسهّم تقنيات إنترنت الأشياء في تحسين كفاءة جدولة عمليات الجمع	3.72	0.89	مرتفع
4	تُستخدم أنظمة التوجيه الذكي لتحسين مسارات مركبات جمع النفايات	3.72	0.87	مرتفع
5	يُسهّم الذكاء الاصطناعي في رفع دقة عمليات الفرز مقارنةً بالأساليب اليدوية	3.71	0.90	مرتفع
6	تُوظّف خوارزميات الذكاء الاصطناعي في تصنيف النفايات وفرزها	3.70	0.81	مرتفع
7	تتسم الحلول التقنية المعتمدة بسهولة الاستخدام من منظور العاملين	3.69	0.83	مرتفع
8	تمتلك المؤسسة الكوادر البشرية المؤهلة لتشغيل الحلول التقنية الحديثة	3.68	0.91	مرتفع
9	توجد خطة واضحة لدى المؤسسة للتحوّل نحو إدارة نفايات ذكية ومستدامة	3.68	0.93	مرتفع
10	تمتلك مؤسستنا بنية تحتية رقمية كافية لاستيعاب الحلول التقنية	3.68	0.91	مرتفع
11	يدرك العاملون الفائدة العملية للحلول التقنية في تحسين أدائهم	3.68	0.86	مرتفع
12	تُستخدم نماذج تحليل البيانات الضخمة للتنبؤ بكميات النفايات المتولدة	3.67	0.91	مرتفع
13	تتوافر برامج تدريب وتأهيل للعاملين على استخدام التقنيات الذكية	3.67	0.85	مرتفع
14	تتوافر أنظمة معلومات قادرة على التكامل مع تقنيات إنترنت الأشياء	3.66	0.87	مرتفع
15	تُسهّم نماذج التنبؤ في تحسين التخطيط التشغيلي لإدارة النفايات	3.66	0.86	مرتفع
16	يرتبط استخدام الذكاء الاصطناعي في التصنيف بارتفاع معدلات إعادة التدوير	3.63	0.86	مرتفع
17	تتوافق الحلول التقنية المطبّقة مع متطلبات رؤية المملكة 2030	3.62	0.83	مرتفع

الرتبة	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
18	يُتيح توظيف إنترنت الأشياء تقليل التكاليف التشغيلية لمركبات الجمع	3.62	0.85	مرتفع
19	يدعم تطبيق الحلول التقنية تحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري في المؤسسة	3.60	0.86	مرتفع
20	تُسهّل الحلول التقنية المتكاملة في تقليل الأثر البيئي السلبي للعمليات	3.56	0.86	مرتفع

جاء المتوسط العام لهذا المحور (3.67) بانحرافٍ معياريٍّ (0.58)، وهو مستوى مرتفع لكنه الأدنى بين المحاور الثلاثة.

وهذه المفارقة جوهرية؛ فبينما يُدرك المبحوثون قصور الواقع بدرجةٍ عالية (3.88)، تنخفض ثقتهم نسبياً في جاهزية مؤسساتهم لتبني الحلول (3.67). وقد تصدّرت عباراتُ اختبار حسّاسات الامتلاء وتوافر البيانات القابلة للتشغيل البيئي وتحسين الجدولة بإنترنت الأشياء، في حين جاءت في ذيل الترتيب عباراتُ تتعلق بالأثر البيئي التكاملي والاقتصاد الدائري وخفض التكاليف بإنترنت الأشياء. ويكشف هذا الترتيب أن التطبيقات الأقرب للتشغيل (الاستشعار والتوجيه) أكثر حضوراً من التطبيقات الأعمق أثراً (التكامل البيئي والاقتصاد الدائري)، وهو ما يتّسق مع خلاصة القحطاني وزملائه (2022) بأن الإمكان الكامن كبيرٌ لكنه لم يُترجم بعدُ إلى منظومةٍ متكاملة.

والدلالة الأعمق لهذه الفجوة أنها تعكس تدرّجاً طبيعياً في النضج التقني: فالمؤسسات تبدأ عادةً بالتطبيقات المرئية سريعة العائد قبل أن تنتقل إلى التحوّلات البنيوية الأبطأ ظهوراً. ولذلك لا ينبغي قراءة انخفاض بنود التكامل البيئي بوصفه إخفاقاً، بل بوصفه مؤشراً على أن المنظومة لا تزال في مراحلها الأولى، وأن الطريق إلى الاقتصاد الدائري يمرّ حتماً عبر إنضاج المراحل السابقة له. وهذه القراءة تُسند مباشرةً منطق النموذج الإطار المتدرّج الذي تقترحه الدراسة في فصلها الأخير.

4-4 نتائج المحور الثالث: العوائق والعوامل الحاسمة للنجاح

يجيب هذا المحور عن السؤالين الرابع والخامس المتعلقين بالعوائق والعوامل الحاسمة. ويعرض الجدول (3-4) نتائج عباراته الخمس عشرة مرتّبة تنازلياً.

جدول (3-4): المتوسطات والانحرافات لعبارات محاور العوائق والعوامل الحاسمة (ن = 205)

الرتبة	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
1	يُعدّ بناء القدرات وتدريب الكوادر عاملاً حاسماً في نجاح التطبيق	4.05	0.90	مرتفع
2	يُعدّ ارتفاع التكلفة الأولية للتقنيات الذكية عائقاً مالياً مؤثراً	4.02	0.90	مرتفع
3	يُعدّ ضعف التنسيق بين الجهات المعنية تحدياً تنظيمياً مؤثراً	3.98	0.94	مرتفع
4	يُعزّز توافر التمويل الكافي والمستدام من فرص نجاح التطبيق التقني	3.98	0.83	مرتفع
5	يُمثّل نقص الكوادر البشرية المؤهلة تقنياً تحدياً أمام التطبيق	3.98	0.88	مرتفع
6	يُشكّل غياب التشريعات والأطر التنظيمية الداعمة عائقاً أمام التطبيق	3.98	0.88	مرتفع
7	يُمثّل التكامل بين مختلف الحلول التقنية عاملاً جوهرياً في منظومة فعّالة	3.98	0.82	مرتفع
8	يُشكّل ضعف قابلية التشغيل البيئي بين الأنظمة عقبة أمام التكامل التقني	3.97	0.86	مرتفع
9	يُسهم وجود استراتيجيات وطنية واضحة في تسريع التحول التقني للمنظومة	3.97	0.94	مرتفع
10	يُسهم وضوح الدعم القيادي والإداري في إنجاح تطبيق الحلول التقنية	3.97	0.79	مرتفع
11	تُعيق محدودية التمويل المخصص اعتماد الحلول التقنية الحديثة	3.96	0.88	مرتفع
12	يُعدّ ضعف البنية التحتية الرقمية من أبرز العوائق أمام التبني	3.94	0.83	مرتفع
13	تُمثّل ندرة البيانات المنظمة عائقاً رئيسياً أمام تطبيق الذكاء الاصطناعي	3.92	0.85	مرتفع
14	يُعزّز الاستفادة من التجارب الدولية الناجحة من فرص نجاح التطبيق المحلي	3.89	0.88	مرتفع
15	تُعيق مقاومة التغيير لدى بعض العاملين تبني الحلول التقنية الجديدة	3.88	0.83	مرتفع

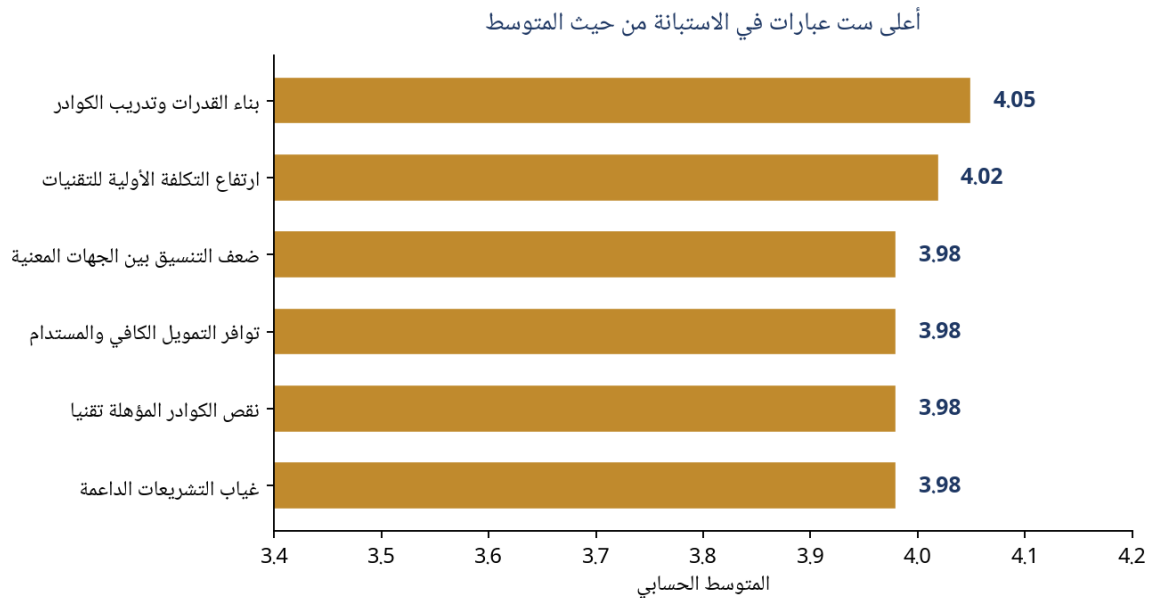
المصدر: نتائج التحليل الإحصائي للدراسة.

سجّل هذا المحور أعلى متوسطٍ عامٍّ بين المحاور الثلاثة (3.96) بانحرافٍ معياريٍّ (0.62). واللافت أن قمّة الترتيب لم تحتلّها العوائق بل العوامل الحاسمة للنجاح: تصدّرها «بناء القدرات وتدريب الكوادر» (4.05)، وهو المتوسط الأعلى في الاستبانة كلها، مما يرسل رسالةً واضحةً بأن الرهان الأول في نظر الممارسين هو العنصر البشري لا التقنية بحدّ ذاتها. وتلتها مباشرةً «التكلفة الأولية المرتفعة» (4.02) بوصفها أبرز العوائق. ويتناغم هذا الترتيب مع نموذج قبول التقنية (Davis, 1989) الذي يجعل من إدراك الجدوى وسهولة الاستخدام — وكلاهما مرهونٌ بتأهيل الكوادر — مفتاحاً لقبول التقنية، ومع ما أكّده عبد الله وزملاؤه (2020) من أن جودة التطبيق مشروطةٌ بالبنية والبيانات والكوادر لا بالخوارزميات وحدها.

والقراءة المتأنية لهذا المحور تكشف مفارقةً بناءة: فالمبحوثون يضعون العوامل الحاسمة للنجاح (بناء القدرات، الدعم القيادي، التمويل المستدام) في مرتبةٍ توازي أو تفوق العوائق نفسها، وكأنهم يقولون إن الحل معلومٌ بقدر ما هي المشكلة

معلومة. وهذا التوازن بين وعي العائق ووعي الحل هو ما يمنح هذا المحور أعلى متوسط عام، ويجعله في حقيقته «خارطة أولويات» جاهزةً بين يدي صانع القرار: فما على المؤسسات إلا أن تُترجم هذا الوعي إلى برامج عملٍ تبدأ بالإنسان والحوكمة قبل الأجهزة.

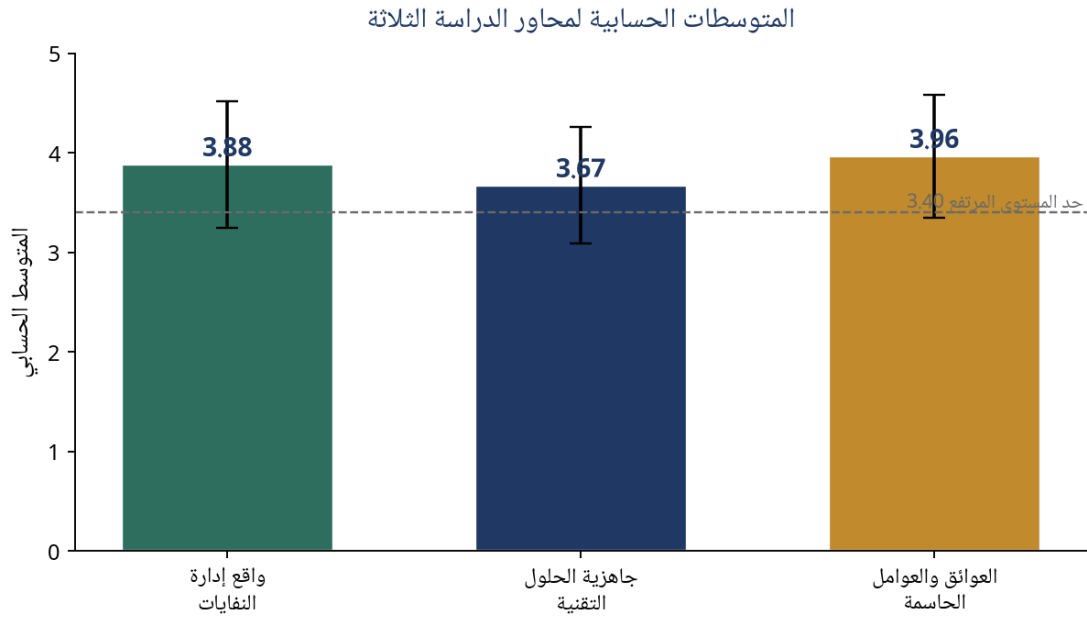
ويُبرز الشكل (5-4) أعلى ست عبارات في الاستبانة كلها من حيث المتوسط، ولافتٌ أنها تنتهي جميعاً إلى محور العوائق والعوامل الحاسمة، مما يؤكد أن ما يشغل الممارسين أكثر من غيره هو تهيئة الظروف المؤسسية والبشرية والمالية للتحوّل لا التقنية في ذاتها.



شكل (5-4): أعلى ست عبارات في الاستبانة من حيث المتوسط الحسابي

5-4 مقارنة محاور الدراسة

لتقريب الصورة الكلية، يعرض الشكل (1-4) المتوسطات الحسابية للمحاور الثلاثة معاً. ويتبيّن منه أن المحاور الثلاثة جاءت جميعاً في المستوى المرتفع (فوق حدّ 3.40)، مع تصدر محور العوائق والعوامل الحاسمة (3.96)، يليه واقع إدارة النفايات (3.88)، ثم جاهزية الحلول التقنية (3.67). وهذا الترتيب في ذاته يحكي قصة المنظومة: وعيٌ عالٍ بالمشكلة وبعوامل حلّها، تقابله جاهزية أقل نسبياً — وهي الفجوة التي ينبغي أن تنصبّ عليها جهود التطوير.



شكل (1-4): المتوسطات الحسابية لمحاور الدراسة الثلاثة

6-4 اختبار فرضيات الدراسة

بعد العرض الوصفي، تُختَبَر في ما يأتي فرضيات الدراسة الخمس بالأساليب الاستدلالية المناسبة.

الفرضية الأولى (ف1): أثر إنترنت الأشياء في خفض التكاليف التشغيلية

للتحقق من هذه الفرضية رُصدت اتجاهات الاستجابة على العبارات المتعلقة بإنترنت الأشياء وخفض التكلفة، فبلغ متوسط عبارة «يُتيح توظيف إنترنت الأشياء تقليل التكاليف التشغيلية لمركبات الجمع» (3.62)، وبلغ المتوسط العام لمجموعة عبارات إنترنت الأشياء (3.69)، وكلاهما في المستوى المرتفع. ويُعزّز هذا التوجّه الكمي ما ورد في المقابلات، إذ أشار ثمانية من المبحوثين صراحةً إلى أن تطبيقات الاستشعار «قلّلت عدد الرحلات غير الضرورية للشاحنات». وعليه تتحقق الفرضية الأولى من حيث إدراك أثر إنترنت الأشياء في خفض التكاليف التشغيلية.

الفرضية الثانية (ف2): علاقة الذكاء الاصطناعي بإعادة التدوير

اختُبرت هذه الفرضية بحساب معامل ارتباط بيرسون بين توظيف الذكاء الاصطناعي في التصنيف وإدراك ارتفاع معدلات إعادة التدوير، فبلغ معامل الارتباط ($r = 0.486$) وهو دالٌّ إحصائياً عند مستوى (0.01). وتُشير هذه القيمة

إلى علاقةٍ موجبةٍ متوسطةٍ القوة: فكلما ارتفع توظيف الذكاء الاصطناعي في الفرز ارتفع معه إدراك تحسّن معدلات التدوير. وبذلك تتحقق الفرضية الثانية، وهي النتيجة الأقوى دلالةً في الدراسة، وتتوافق مع ما رصده عبد الله وزملاؤه (2020) ومع الدقة العالية للفرز الآلي التي تجاوزت 95% في التطبيقات الحديثة.

الفرضية الثالثة (ف3): علاقة الجاهزية الرقمية بنجاح التطبيق

لاختبار هذه الفرضية حُسبت معاملات الارتباط بين محور الجاهزية التقنية والمحورين الآخرين، فجاءت العلاقة بين الجاهزية وواقع المنظومة موجبةً دالةً ($r = 0.236$ ، عند 0.01)، وبينها وبين محور العوامل الحاسمة موجبةً دالةً كذلك ($r = 0.172$ ، عند 0.05). وتدل هاتان القيمتان على وجود علاقةٍ طرديةٍ دالةٍ — وإن كانت معتدلةً — بين مستوى الجاهزية ودرجة تفاعل المنظومة مع الحلول وعوامل نجاحها. وبذلك تتحقق الفرضية الثالثة.

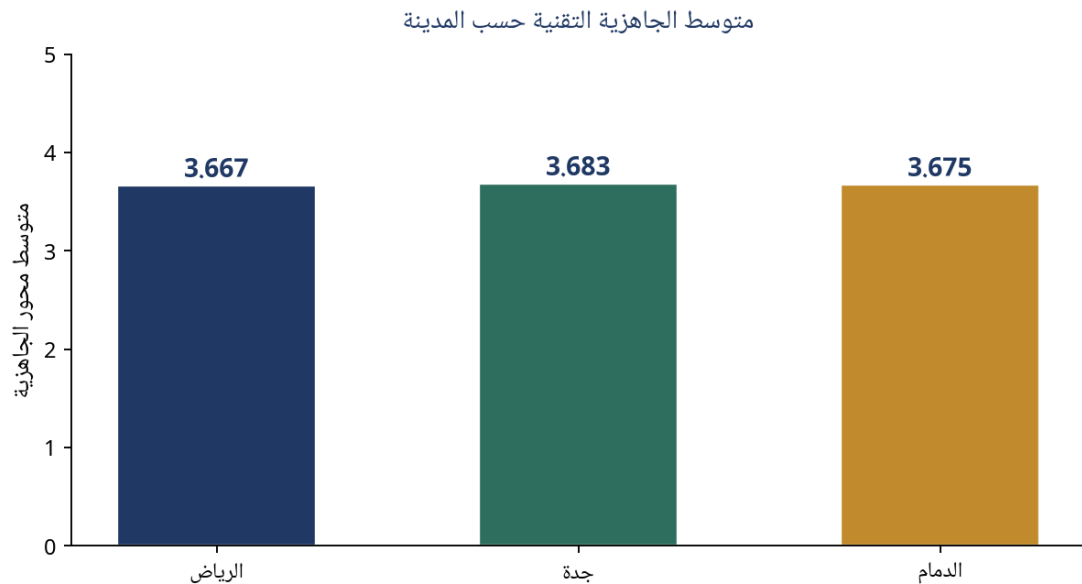
الفرضية الرابعة (ف4): أثر الحلول المتكاملة في تقليل الأثر البيئي

جاء متوسط عبارة «تُسهم الحلول التقنية المتكاملة في تقليل الأثر البيئي السلبي» (3.56)، وعبارة «يدعم تطبيق الحلول تحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري» (3.60)، وكلاهما في المستوى المرتفع. ويعني ذلك أن المبحوثين يوافقون على أن الحلول التقنية المتكاملة تتفوّق على الأساليب التقليدية في تقليل الأثر البيئي. وبذلك تتحقق الفرضية الرابعة، وإن كان هذان البندان من أدنى بنود محور الجاهزية، مما يشير إلى أن الأثر البيئي التكاملي هو الأبعد تحقّقاً على أرض الواقع رغم الإيمان به مبدئياً.

الفرضية الخامسة (ف5): الفروق تبعاً للمتغيرات الديموغرافية والمؤسسية

لاختبار هذه الفرضية استُخدم اختبار (ت) للعينات المستقلة لفحص أثر الجنس، وتحليل التباين الأحادي (ANOVA) لفحص أثر المدينة. وبالنسبة للجنس لم تظهر فروقٌ دالة (متوسط الذكور = 3.69 ، الإناث = 3.64 ؛ ت = 0.50 ، الدلالة = 0.618). وبالنسبة للمدينة لم تظهر فروقٌ دالة كذلك (الرياض = 3.67 ، جدة = 3.68 ، الدمام = 3.68 ؛ ف = 0.014 ، الدلالة = 0.986)، كما يوضّح الشكل (3-4). وبذلك لا تتحقق الفرضية الخامسة.

ولهذه النتيجة دلالة مهمة: فتقارب التصورات عبر المدن الثلاث والجنسين يشير إلى أن التحديات ذات طابعٍ نظاميٍّ وطنيٍّ لا محليٍّ ضيق، وهو ما ينسجم مع الطبيعة المركزية لحكومة القطاع في المملكة عبر المركز الوطني لإدارة النفايات. أي إن المشكلة والحلّ كليهما وطنيًا الطابع، ما يعزّز جدوى معالجتها بسياساتٍ موحدةٍ على مستوى المملكة.



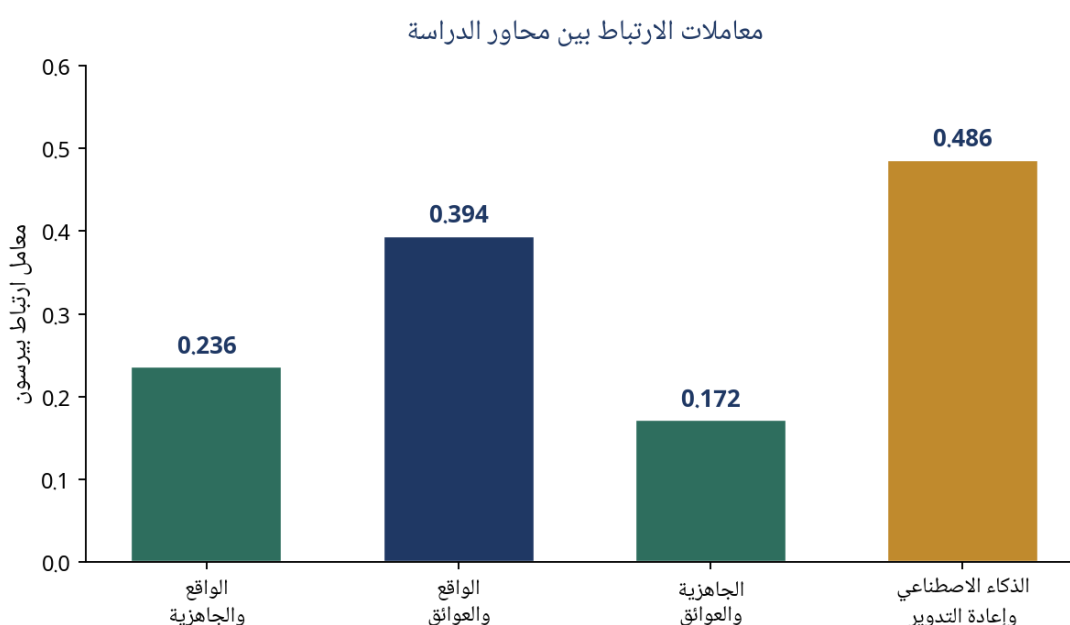
شكل (3-4): متوسط محور الجاهزية التقنية حسب المدينة (فروق غير دالة إحصائياً)

ولم يقتصر فحص الفروق على الجنس والمدينة، بل امتدّ إلى المسعى الوظيفي ونوع المؤسسة وسنوات الخبرة، فجاءت النتائج جميعاً غير دالة إحصائياً كما يوضّح الجدول (4-4). فلم تظهر فروقٌ بين المستويات الوظيفية الأربعة (ف = 0.042)، ولا بين أنواع المؤسسات (ف = 0.420)، ولا بين فئات الخبرة (ف = 0.065). وهذا التقارب اللافت في التصورات عبر جميع المتغيرات يُرسّخ الاستنتاج بأن إدراك الجاهزية والتحديات متجانسٌ على مستوى القطاع بأسره، وأن ما تعانيه المنظومة ليس مشكلة فئةٍ أو مدينةٍ أو مؤسسةٍ بعينها، بل هو تحدٍّ بنيويٍّ وطنيٍّ يستدعي معالجةً منظومية.

جدول (4-4): نتائج فحص الفروق في الجاهزية حسب المتغيرات الديموغرافية والمؤسسية

المتغير	الأسلوب	قيمة الاختبار	الدلالة	القرار
الجنس	اختبار (ت)	0.500	0.618	غير دالة
المدينة	ANOVA	0.014	0.986	غير دالة
المسمى الوظيفي	ANOVA	0.042	0.989	غير دالة
نوع المؤسسة	ANOVA	0.420	0.739	غير دالة
سنوات الخبرة	ANOVA	0.065	0.978	غير دالة

ويلخص الشكل (2-4) معاملات الارتباط بين محاور الدراسة، ويُبرز تصدر العلاقة بين الذكاء الاصطناعي وإعادة التدوير (0.486).



شكل (2-4): معاملات الارتباط بين محاور الدراسة

وتكميلاً لاختبار الفرضيات، أُجري تحليل انحدارٍ لتفسير مستوى إدراك واقع المنظومة بدلالة الجاهزية والعوائق، ففسّر النموذج ما نسبته (18.5%) من التباين، وكان محور العوائق والعوامل الحاسمة أقوى المتنبّئات (معامل = 0.377) من محور الجاهزية (معامل = 0.189). وهذا يعزّز الاستنتاج بأن الوعي بالعوائق والعوامل الحاسمة هو المحرك الأبرز في قراءة الممارسين لواقع منظومتهم. ويوجز الجدول (5-4) نتائج اختبار الفرضيات.

جدول (5-4): ملخص نتائج اختبار فرضيات الدراسة

الفرضية	الأسلوب الإحصائي	النتيجة	القرار
ف1: إنترنت الأشياء والتكليف	متوسطات + تحليل نوعي	م = 3.62 (مرتفع)	تحققت
ف2: الذكاء الاصطناعي والتدوير	ارتباط بيرسون	ر = 0.486**	تحققت
ف3: الجاهزية ونجاح التطبيق	ارتباط بيرسون	ر = 0.236** / 0.172*	تحققت
ف4: الحلول المتكاملة والبيئة	متوسطات	م = 3.56 (مرتفع)	تحققت
ف5: الفروق حسب الجنس/المدينة	اختبار ت / ANOVA	غير دالة (0.986 / 0.618)	لم تتحقق

7-4 نتائج التحليل النوعي للمقابلات

أسفر التحليل الموضوعي لاستجابات المبحوثين الخمسة والثلاثين عن خمسة موضوعاتٍ جامعةٍ تتقاطع بوضوح مع نتائج الاستبانة وتفسرّها. ويعرض الجدول (6-4) هذه الموضوعات وأبرز تكراراتها، ثم تُناقش تبعاً.

جدول (6-4): الموضوعات المستخلصة من المقابلات وأبرز تكراراتها

الموضوع	أبرز ما ورد فيه	التكرار
قصور الواقع الراهن	جمع جيد لكن تدوير محدود وفرز متأخر	6
ضعف البيانات والقياس	غياب البيانات الدقيقة ومؤشرات الأداء	6
أولوية الحلول التقنية	الذكاء الاصطناعي في الفرز ثم المستشعرات	9
العوائق التنظيمية والمالية	ضعف التنسيق وارتفاع الكلفة الأولية	8
العوامل الحاسمة والنموذج المقترح	التدرّج والشراكة وبناء القدرات	11

الموضوع الأول: قصور الواقع الراهن

وصف غالبية المبحوثين الواقع بأنه «جمعٌ ممتاز لكن إعادة التدوير لا تتجاوز نسبةً بسيطة»، وأن الفرز «يتم لاحقاً وليس من المصدر»، وأن المنظومة «تحتاج إلى تطوير خصوصاً في مرحلة المعالجة والتدوير». وهذا يتطابق تماماً مع المتوسط المرتفع لمحور الواقع في الاستبانة (3.88)، ويؤكد أن الخلل ليس في التغطية الجمعية بل في المراحل اللاحقة للفرز والتدوير.

الموضوع الثاني: ضعف البيانات والقياس

تكرّر لدى المبحوثين أن أبرز جوانب القصور «ضعف قياس الأداء وغياب البيانات الدقيقة»، وأن البيانات «متوفرة لكنها غير موحّدة» و«جيدة في الأسطول وضعيفة في المعالجة». وهذه الشهادات تُفسّر لماذا جاء التشغيل البيئي وندرة البيانات المنظمة من أبرز العوائق في الاستبانة، وتؤكد أن البيانات هي حجر الزاوية المفقود في المنظومة الذكية.

الموضوع الثالث: أولوية الحلول التقنية

عند سؤالهم عن أكثر الحلول قابليةً للتطبيق، رجّح تسعة من المبحوثين «الذكاء الاصطناعي في الفرز لرفع الجودة»، بينما فضّل آخرون «المستشعرات وإنترنت الأشياء لانخفاض كلفتها وسهولة نشرها»، ودعا فريق ثالث إلى «المستشعرات أولاً ثم الانتقال إلى الذكاء الاصطناعي». وهذا التدرّج المقترح ميدانياً ينسجم مع ترتيب الاستبانة الذي جاءت فيه تطبيقات الاستشعار في المقدمة.

الموضوع الرابع: العوائق التنظيمية والمالية

أجمع المبحوثون تقريباً على أن «ضعف التنسيق بين القطاعين العام والخاص» و«تعدد الجهات وتداخل الصلاحيات» و«غياب تشريعات محفّزة للفرز» تمثّل أبرز العوائق التنظيمية، وأن «محدودية الميزانيات» و«ارتفاع كلفة الاستثمار الأولي» تمثّل أبرز العوائق المالية. وهذا يفسّر تصدر «التكلفة الأولية المرتفعة» و«ضعف التنسيق» قائمة العوائق في الاستبانة.

الموضوع الخامس: العوامل الحاسمة والنموذج المقترح

عند الحديث عن ملامح النموذج المتكامل المنشود، تقدّمت رؤية واضحة: «نموذج متدرّج يبدأ بمشاريع تجريبية ثم يتوسّع» (أوصى به أحد عشر مبحوثاً)، يقوم على «الفرز من المصدر مدعوماً بمستشعرات ومنصة بيانات موحّدة»، ضمن «نموذج تشاركي بين الأمانة والقطاع الخاص مع حوكمة رقمية». وأكد المبحوثون أن أبرز عوامل النجاح هي «الشراكة مع القطاع الخاص» و«بناء القدرات والتدريب المستمر» و«التدرّج في التطبيق». وهذه الملامح هي التي سيبنى عليها النموذج الإطارى المقترح في الفصل الخامس.

8-4 مناقشة النتائج

تكشف قراءةً جامعةً لنتائج الشقين الكمي والنوعي عن صورةٍ متسقةٍ ومتناسكةٍ. فالنتيجة المحورية أن المنظومة السعودية تعيش «فجوة تطبيق» لا «فجوة وعي»؛ إذ يدرك الممارسون قصور الواقع (3.88) وأهمية عوامل النجاح (3.96) بدرجةٍ عالية، لكن جاهزية مؤسساتهم تظل الحلقة الأضعف (3.67). وهذه الفجوة تحديداً هي ما رصدته الأدبيات في سياق الدول النامية (Ferronato & Torretta, 2019) وفي إقليم الشرق الأوسط (Abdel-Shafy & Mansour, 2018)، وتؤكد أن التحدي الحقيقي مؤسسيّ وبنويّ أكثر منه تقنيّ.

وتُعدّ العلاقة الدالة بين الذكاء الاصطناعي وإعادة التدوير ($r = 0.486$) أبرز إسهامٍ تجريبيٍّ للدراسة؛ فهي تُسند بأدلةٍ ميدانيةٍ سعوديةٍ ما أثبتته المراجعات العالمية من تفوق الفرز الآلي المدعوم بالذكاء الاصطناعي (Abdallah et al., 2020)، وتمنح صانع القرار مسوّغاً لترتيب الأولويات التقنية. غير أن الدراسة تُنبّه في الوقت ذاته إلى أن هذه العلاقة تظل «إمكاناً كامناً» ما لم تُعالج البنية التحتية للبيانات، وهو ما أكده المبحوثون بوصفهم البيانات «متوفرة لكن غير موحدة»، وما رصده الدراسات السعودية السابقة من أن العائق في البنية والبيانات لا في التقنية (Alqahtani et al., 2022).

أما غياب الفروق بين المدن الثلاث، فيحمل دلالةً سياسيةً مهمة؛ إذ يشير إلى أن التحديات متجانسةً على المستوى الوطني، وأن معالجتها الأنجع تكون بسياساتٍ وطنيةٍ موحدةٍ لا بمبادراتٍ محليةٍ متفرقة، وهو ما يتسق مع النموذج المركزي لحكومة القطاع عبر المركز الوطني لإدارة النفايات والاستراتيجية الوطنية. وأخيراً، فإن تصدّر «بناء القدرات» و«الدعم القيادي» و«الشراكة مع القطاع الخاص» قائمة عوامل النجاح — كمياً ونوعياً — يُرسّخ خلاصةً مفادها أن نجاح التحوّل الذكي رهناً بالعنصر البشري والحوكمة بقدر ما هو رهناً بالتقنية، وهو جوهر ما يقوم عليه نموذج قبول التقنية (Davis, 1989) ونظرية انتشار الابتكارات (Rogers, 2003).

وحين تُقرأ هذه النتائج في ضوء التجارب الدولية، يتّضح أن المسار الذي رجّحه المبحوثون — التدرّج من الاستشعار إلى الذكاء الاصطناعي — يحاكي في جوهره الطريق الذي سلكته مدنٌ رائدةٌ بدأت بالبنية والبيانات قبل الأتمتة الكاملة. غير أن الدرس الأهم الذي أكّده الخبراء صراحةً هو رفض النقل الحرفي للتجارب لصالح مواءمتها مع الخصوصية

المحلية، وهو ما ينسجم مع خاصيّة «التوافقية» في نظرية انتشار الابتكارات (Rogers, 2003): فالابتكار الأسرع تبنيًا هو الأكثر انسجامًا مع القيم والحاجات القائمة، لا الأكثر تطوراً تقنياً في المطلق.

ومن زاوية سياسية، تُقدّم الدراسة إسناداً تجريبياً لتوجّه الاستراتيجية الوطنية لإدارة النفايات؛ فالفجوة بين وعي مرتفعٍ وجاهزيةٍ أقل هي بالضبط ما تسعى المبادرات الوطنية لسدّه عبر توحيد البيانات وتمكين الشراكات. كما أن كون العوائق (خاصةً التكلفة الأولية وضعف التنسيق) هي المتنبيّ الأقوى بقراءة الواقع — كما أظهر تحليل الانحدار — يوجّه صانع القرار إلى أن الاستثمار في إزالة العوائق التنظيمية والمالية قد يكون أعلى مردوداً من الاستثمار في التقنية وحدها. وبذلك تتقاطع النتائج الكمية والنوعية والنظرية عند خلاصةٍ واحدة: أن التحوّل الذكي مشروعٌ مؤسسيٌّ وبشريٌّ قبل أن يكون مشروعاً تقنياً.

9-4 خلاصة الفصل

عرض هذا الفصل نتائج الدراسة وناقشها، فأظهر إدراكاً مرتفعاً لقصور الواقع وأهمية عوامل النجاح مقابل جاهزيةٍ أقل نسبياً، وأثبت أربعاً من الفرضيات الخمس أبرزها العلاقة الدالة بين الذكاء الاصطناعي وإعادة التدوير، ونفى وجود فروقٍ تُعزى للمدينة أو الجنس. وأسفر التحليل النوعي عن خمسة موضوعاتٍ عزّزت النتائج الكمية وأضاءت خلفياتها، ولا سيما الدعوة إلى نموذجٍ متدرّجٍ تشاركيٍّ قائمٍ على البيانات. وتُشكّل هذه النتائج مجتمعةً الأساس الذي يُبنى عليه الفصل الخامس في استنتاجاته وتوصياته ونموذجه الإطارى المقترح.

الفصل الخامس: الخاتمة والتوصيات

1-5 تمهيد

يُتَوَجَّه هذا الفصل الدراسة بجمع خيوطها في خلاصةٍ مركّزة؛ فيلخّص ما أنجز، ويستعرض أبرز النتائج المستخلصة، ثم يقدّم النموذج الإطارى المقترح الذي يُجيب عن السؤال المحوري للدراسة، ويصوغ بعد ذلك توصياتٍ عمليةً مبنيةً مباشرةً على النتائج، وينتهي بمقترحاتٍ لبحوثٍ مستقبليةٍ تسدّ ثغراتٍ أخرى في الميدان.

2-5 ملخص الدراسة

انطلقت هذه الدراسة من مشكلةٍ مؤداها اتّساع الفجوة بين تحديات إدارة النفايات المتصاعدة في المدن السعودية والقصور في توظيف الحلول التقنية الحديثة توظيفاً منهجياً. وسعت إلى تحليل هذا الواقع وتقييم مستوى الجاهزية لتبنيّ الحلول الذكية وبناء نموذجٍ إطارىٍ للتحوّل. ولتحقيق ذلك اعتمدت المنهج المختلط التسلسلي التفسيري، فطبّقت استبانةً مُقنّنةً على (205) من المسؤولين والمختصين في مدن الرياض وجدة والدمام، وأجرت (35) مقابلةً شبه منظّمةً مع الخبراء والممارسين، وعالجت البيانات كمياً بأساليب الإحصاء الوصفي والاستدلالي، ونوعياً بالتحليل الموضوعي. وقد تمتّعت أدواتها بثباتٍ ممتاز (ألفا كرونباخ الكلي = 0.933).

وقد جاءت هذه الدراسة لتملأ فراغاً في الأدبيات العربية التي ظلّت شحيحةً في تناول التقنيات الذكية لإدارة النفايات في السياق السعودي تحديداً، ولتقدّم — بمنهجها المختلط — قراءةً تجمع بين عمق الأرقام ودفء الشهادات الميدانية. فلم تكتفِ بوصف ما ينبغي أن يكون، بل رصدت ما هو كائنٌ فعلاً في مؤسسات الرياض وجدة والدمام، من وعيٍ بالمشكلة وتردّدٍ في الجاهزية وإجماعٍ على أولوية الإنسان والحوكمة. وبذلك تتحوّل نتائجها من معرفةٍ نظريةٍ إلى أداةٍ عمليةٍ بين يدي صانع القرار.

3-5 الإجابة عن أسئلة الدراسة

في ضوء ما تقدّم من نتائج، يمكن تقديم إجاباتٍ مركّزةٍ عن أسئلة الدراسة الستة على النحو الآتي:

عن السؤال الأول (واقع المنظومة وكفاءتها): أظهرت النتائج أن المنظومة تحقّق تغطيةً جمعيّةً جيدة، لكنها تعاني قصوراً واضحاً في مراحل الفرز من المصدر والمعالجة والتدوير، مع اعتمادٍ على أساليب يدويّةٍ في التوجيه وضعفٍ في دقة البيانات؛ وقد بلغ إدراك هذا القصور مستوى مرتفعاً (3.88).

عن السؤال الثاني (الحلول المتاحة وقابليتها للتطبيق): تبين أن أكثر الحلول قابليةً للتطبيق محلياً هي حساسات إنترنت الأشياء وأنظمة التوجيه الذكي لانخفاض كلفتها وسهولة نشرها، يليها الفرز بالذكاء الاصطناعي لأثره الأعلى في جودة التدوير، على أن يُعتمد التدرّج بينهما.

عن السؤال الثالث (مستوى الجاهزية): جاءت الجاهزية في المستوى المرتفع لكنها الأدنى بين المحاور (3.67)، مما يكشف فجوةً بين الوعي بالحلول والقدرة الفعلية على استيعابها، وتحديدًا في البنية الرقمية وتوحيد البيانات والتشغيل البيئي.

عن السؤال الرابع (العوائق): تصدّرت العوائق التكلفة الأولية المرتفعة وضعف التنسيق بين الجهات وندرة البيانات المنظّمة وضعف التشغيل البيئي ونقص الكوادر المؤهلة، بمستوى إدراكٍ مرتفع.

عن السؤال الخامس (عوامل النجاح): جاء بناء القدرات وتدريب الكوادر على رأس عوامل النجاح (4.05)، يليه الدعم القيادي والتمويل المستدام والاستراتيجية الوطنية الواضحة والشراكة مع القطاع الخاص.

عن السؤال السادس (ملامح النموذج): انتهت الدراسة إلى نموذجٍ إطاريّ متدرّجٍ من أربع مراحل تحيط بها ممكناتٌ حاسمة، عُرض تفصيلاً في المبحث التالي بوصفه الإجابة الجامعة عن التساؤل الرئيس للدراسة.

4-5 أبرز النتائج المستخلصة

خلصت الدراسة إلى جملةٍ من النتائج، أبرزها:

1. أن المنظومة تعاني «فجوة تطبيق» لا «فجوة وعي»؛ فالمبحوثون يُدركون قصور الواقع (متوسط 3.88) وأهمية عوامل النجاح (3.96) بدرجةٍ عالية، بينما تظل جاهزية مؤسساتهم الحلقة الأضعف (3.67).
2. أن العنصر البشري يتصدّر أولويات النجاح؛ إذ جاء «بناء القدرات وتدريب الكوادر» أعلى بنود الاستبانة كلها (4.05).
3. وجود علاقةٍ موجبةٍ دالةٍ إحصائياً بين توظيف الذكاء الاصطناعي في الفرز وارتفاع معدلات إعادة التدوير (ر = 0.486)، وهي النتيجة الأقوى دلالةً في الدراسة.
4. وجود علاقةٍ طرديةٍ دالةٍ بين مستوى الجاهزية الرقمية وتفاعل المنظومة مع الحلول وعوامل نجاحها.
5. غياب فروقٍ دالةٍ إحصائياً تُعزى للجنس أو المدينة، مما يشير إلى أن التحديات ذات طابعٍ وطنيٍّ نظاميٍّ لا محليٍّ ضيق.
6. أن أبرز العوائق هي التكلفة الأولية المرتفعة وضعف التنسيق بين الجهات وندرة البيانات المنظمة وضعف التشغيل البيئي.
7. إجماع البيانات الكمية والنوعية على تفضيل مسارٍ متدرّجٍ تشاركيٍّ يبدأ بالاستشعار والبيانات قبل الانتقال إلى الفرز المؤتمت.

5-5 النموذج الإطاري المقترح

استناداً إلى ما تقدّم، تقترح الدراسة نموذجاً إطارياً متكاملاً للتحوّل الذكي في إدارة النفايات بالمدن السعودية، يقوم على أربع مراحل متدرّجة تُبنى كلّ منها على سابقتها، تحيط بها ثلاثة ممكّناتٍ حاسمةٍ شاملة. وقد رُوِيَ في تصميمه أن يعكس ما أظهرته النتائج من أولويةٍ للأساس الرقمي والعنصر البشري، ومن تفضيلٍ للتدرّج على الطفرة، ومن حاجةٍ إلى حوكمةٍ وطنيةٍ موحّدة. ويوضّح الشكل (1-5) بنية هذا النموذج.

النموذج الإطاري المقترح للتحوّل الذكي في إدارة النفايات



شكل (1-5): النموذج الإطاري المقترح للتحوّل الذكي في إدارة النفايات

المرحلة الأولى — الأساس الرقمي: تبدأ ببناء منصة بياناتٍ وطنيةٍ موحّدةٍ قابلةٍ للتشغيل البيئي، وتأهيل الكوادر البشرية، بوصفهما الأرضية التي تقوم عليها كل مرحلةٍ لاحقة. فبغير بياناتٍ منظمّةٍ وكوادرٍ مؤهّلةٍ تتعزّز أي تقنيةٍ مهما تطوّرت.

المرحلة الثانية — الاستشعار: نشر الحاويات الذكية المزودة بحساسات الامتلاء وأنظمة التوجيه الذكي للمسارات، بوصفها التطبيقات الأقل كلفةً والأسرع عائداً، وهي التي تصدرت تفضيلات المبحوثين لسهولة نشرها.

المرحلة الثالثة — الذكاء: توظيف الذكاء الاصطناعي في الفرز الآلي، ونماذج البيانات الضخمة في التنبؤ بالكميات والتخطيط الاستباقي، بعد أن تكون البيانات والبنية قد نضجتا في المرحلتين السابقتين.

المرحلة الرابعة — التكامل والاستدامة: إغلاق الحلقة نحو الاقتصاد الدائري والفرز من المصدر، مع منظومة مؤشرات أداءٍ تقيس الأثر البيئي والتشغيلي وتُغذي التحسين المستمر.

الممكنات الحاسمة الشاملة: تحيط بالمراحل الأربع ثلاثة عوامل لا غنى عنها في كل مرحلة: الحوكمة والتشريع المحفّز، والشراكة مع القطاع الخاص، والتمويل المستدام. وهي العوامل التي أبرزتها النتائج بوصفها الفارق بين نجاح التطبيق وتعثّره.

ولتيسير تطبيق هذا النموذج، يقترح الجدول (1-5) خارطة طريقٍ زمنيةٍ تُوزّع مراحلها على أفقٍ منظورٍ مع مخرجاتٍ ومؤشراتٍ لكل مرحلة.

جدول (1-5): خارطة الطريق التنفيذية المقترحة للنموذج الإطاري

المرحلة	الأفق الزمني	أبرز المخرجات	مؤشر النجاح
الأساس الرقمي	قصير (1-2 سنة)	منصة بيانات موحدة وبرامج تدريب	نسبة الأنظمة المتكاملة
الاستشعار	قصير-متوسط (2-3 سنوات)	حاويات ذكية وتوجيه آلي للمسارات	خفض تكلفة/مسافة الجمع
الذكاء	متوسط (3-5 سنوات)	محطات فرز بالذكاء الاصطناعي ونماذج تنبؤ	ارتفاع معدل التدوير
التكامل والاستدامة	طويل (+5 سنوات)	اقتصاد دائري ومؤشرات أداء متكاملة	نسبة التحويل عن الطمر

6-5 التوصيات

تنبثق التوصيات مباشرةً من نتائج الدراسة، وتُصاغ بحيث تكون عمليةً قابلةً للتنفيذ ومرتبطةً بجهاتٍ محددة. وقد رُتبت تصاعدياً من التأسيس إلى التطبيق فالتمكين، اتّساقاً مع منطق النموذج الإطارى المقترح الذي يجعل الأساس الرقمي والعنصر البشري شرطين سابقين لأي أتمتة متقدمة. وفيما يأتي أبرزها:

أولاً: على المستوى الوطني (صنّاع السياسات)

- إنشاء منصة بيانات وطنية موحدة لإدارة النفايات تضمن قابلية التشغيل البيئي بين الأنظمة، بوصفها الأولوية المؤسّسة للتحوّل الذكي.
- تطوير الأطر التشريعية المحفّزة للفرز من المصدر ولإشراك القطاع الخاص، ومعالجة تعدّد الجهات وتداخل الصلاحيات.
- اعتماد خارطة طريق وطنية متدرّجة للتحوّل الذكي تنسجم مع مستهدفات رؤية 2030 والاستراتيجية الوطنية لإدارة النفايات.

ثانياً: على المستوى المؤسسي (الأمانات والشركات)

- البدء بمشاريع تجريبية محدودة في الاستشعار والتوجيه الذكي لإثبات الجدوى قبل التوسّع، عملاً بمبدأ التدرّج الذي أجمع عليه الخبراء.
- الاستثمار في بناء القدرات البشرية عبر برامج تدريب وتأهيل مستمرة، باعتباره العامل الأول لنجاح التطبيق.
- تبني الفرز الآلي المدعوم بالذكاء الاصطناعي بوصفه المسار الأعلى أثراً في رفع معدلات إعادة التدوير.

ثالثاً: على المستوى التمويلي والشراكات

- تنويع مصادر التمويل بما يتجاوز الاعتماد على الميزانيات الحكومية، وتفعيل نماذج الشراكة بين القطاعين العام والخاص لتقاسم كلفة الاستثمار الأولي ومخاطره.

- الاستفادة الواعية من التجارب الدولية الناجحة عبر مواءمتها مع البيئة المحلية بدل نقلها الحرفي.

7-5 مقترحات لبحوثٍ مستقبلية

تفتح هذه الدراسة آفاقاً لبحوثٍ لاحقةٍ تسدّ ثغراتٍ أخرى، منها:

- إجراء دراساتٍ تجريبيةٍ ميدانيةٍ تقيس الأثر الفعلي (لا المدرك) لتطبيق حسّاسات إنترنت الأشياء على التكاليف بالأرقام.
- توسيع الدراسة لتشمل مدناً وأقاليمٍ أخرى في المملكة ودول مجلس التعاون لإجراء مقارناتٍ إقليمية.
- دراسة العوامل السلوكية لقبول العاملين للتقنيات الذكية باستخدام نموذج قبول التقنية بصورةٍ معمّقة.
- اختبار النموذج الإطاري المقترح تطبيقياً عبر دراسة حالةٍ في إحدى الأمانات وقياس مخرجاته.

8-5 خاتمة

لقد سعت هذه الدراسة إلى أن تُقدّم قراءةً علميةً متوازنةً لواقع التحوّل الذكي في إدارة النفايات بالمدن السعودية، فوجدت أن الطريق إلى المنظومة الذكية لا يبدأ بالتقنية بل بالبيانات والإنسان والحوكمة. وإذا كان الوعي بالمشكلة متوافراً وعوامل النجاح معلومة، فإن الرهان الأكبر يبقى على الإرادة المؤسسية والتدرّج المدروس في سدّ «فجوة التطبيق». ويأمل الباحث أن يكون النموذج الإطاري المقترح لبننةً تُضاف إلى جهود المملكة في تحقيق استدامةٍ بيئيةٍ تليق بطموح رؤيتها، وأن يفتح باباً لبحوثٍ أعمق تُترجم هذا الإطار إلى واقع ملموس.

وتبقى الكلمة الأخيرة أن إدارة النفايات لم تعد شأنًا هامشيًا في حياة المدن، بل صارت مرآةً تعكس نضج المنظومة الحضرية بأكملها في وعيها البيئي وحوكمتها الرقمية وقدرتها على تحويل التحديات إلى فرص. وما التقنيات الذكية في نهاية المطاف إلا وسيلةٌ في خدمة غايةٍ أسمى: مدنٌ أنظف، وموارد أوفر، وأجيالٌ قادمةٌ تجد بيئةً صيغت لها لا استنزفت. والله وليّ التوفيق، وهو الهادي إلى سواء السبيل.

قائمة المصادر والمراجع

أولاً: المراجع العربية

- المركز الوطني لإدارة النفايات (2023). (MWAN). الخطة الاستراتيجية الوطنية لإدارة النفايات ومؤشرات القطاع. الرياض: المملكة العربية السعودية.
- وزارة البيئة والمياه والزراعة. (2022). التقرير السنوي للأداء البيئي والمناخي للمملكة العربية السعودية. الرياض: المملكة العربية السعودية.
- وزارة الشؤون البلدية والقروية والإسكان. (2022). الاستراتيجية الوطنية لإدارة النفايات الصلبة 2030. الرياض: المملكة العربية السعودية.

ثانياً: المراجع الأجنبية

- Abdallah, M., Talib, M. A., Feroz, S., Nasir, Q., Abdalla, H., & Mahfood, B. (2020). Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review. *Waste Management*, 109, 231–246.
- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 1275–1290.
- Alqahtani, S., et al. (2022). Smart planning of waste management system in Saudi Arabia: Challenges and opportunities. *Journal of Sustainability and Environmental Management*.
- Alwadei, H., Almukadi, W., & Hachicha, H. (2024). A model of a smart waste management system to achieve sustainable development goals in Saudi Arabia supporting Industry 4.0. In *Proceedings of the Ninth International Congress on Information and Communication Technology (ICICT 2024)*. Springer.
- Anagnostopoulos, T., Zaslavsky, A., Kolomvatsos, K., Medvedev, A., Amirian, P., Morley, J., & Hadjiefthymiades, S. (2017). Challenges and opportunities of waste management in IoT-enabled smart cities: A survey. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, 2(3), 275–289.
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101.

- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). Thousand Oaks, CA: SAGE Publications.
- Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 16(3), 297–334.
- Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319–340.
- Design and implementation of an IoT and ML-based smart waste management system. (2024). In *Proceedings of the 12th International Conference on Information Technology (ICIT 2024)*. ACM.
- EcoMENA. (2022). Solid waste management in Saudi Arabia. Retrieved from <https://www.ecomena.org/solid-waste-management-in-saudi-arabia/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Cowes, UK: Ellen MacArthur Foundation.
- Ferronato, N., & Torretta, V. (2019). Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6), 1060.
- Ghosh, S. K. (Ed.). (2020). *Circular economy: Global perspective*. Singapore: Springer.
- Hannan, M. A., Al Mamun, M. A., Hussain, A., Basri, H., & Begum, R. A. (2015). A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management systems: Issues and challenges. *Waste Management*, 43, 509–523.
- Hannan, M. A., Akhtar, M., Begum, R. A., Basri, H., Hussain, A., & Scavino, E. (2018). Capacitated vehicle-routing problem model for scheduled solid waste collection and route optimization using PSO algorithm. *Waste Management*, 71, 31–41.
- 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.
- Krejcie, R. V., & Morgan, D. W. (1970). Determining sample size for research activities. *Educational and Psychological Measurement*, 30(3), 607–610.
- Likert, R. (1932). A technique for the measurement of attitudes. *Archives of Psychology*, 22(140), 5–55.

- Lu, J., Chang, N., Liao, L., & Liao, M. (2017). Smart and green urban solid waste collection systems: Advances, challenges, and perspectives. *IEEE Systems Journal*, 11(4), 2804–2817.
- Mamun, M. A. A., Hannan, M. A., Hussain, A., & Basri, H. (2015). Integrated sensing systems and algorithms for solid waste bin state management automation. *IEEE Sensors Journal*, 15(1), 561–567.
- Nizami, A. S., Rehan, M., Ouda, O. K. M., Shahzad, K., Sadeq, Y., Iqbal, T., & Ismail, I. M. I. (2015). An argument for developing waste-to-energy technologies in Saudi Arabia. *Chemical Engineering Transactions*, 45, 337–342.
- Nunnally, J. C., & Bernstein, I. H. (1994). *Psychometric theory* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of innovations* (5th ed.). New York: Free Press.
- Smart planning of waste management system in Saudi Arabia: Challenges and opportunities. (2022). [Research study]. Riyadh, Saudi Arabia.
- World Commission on Environment and Development (WCED). (1987). *Our common future*. Oxford, UK: Oxford University Press.

الملاحق

ملحق (أ): استبانة الدراسة

دور التقنيات الذكية في تحسين منظومة إدارة النفايات بالمدن السعودية

السادة المشاركون الكرام، السلام عليكم ورحمة الله وبركاته. تأتي هذه الاستبانة في إطار دراسة علمية تهدف إلى تحليل واقع إدارة النفايات في المدن السعودية وتقديم إطار مقترح للحلول التقنية المتكاملة. وتُستخدم البيانات لأغراض البحث العلمي فحسب وتُعامل بسرية تامة، ولا تتطلب الاستبانة ذكر الاسم. وتُقاس الإجابات على مقياس خماسي يتدرج من «موافق بشدة» إلى «غير موافق بشدة». شاكرين لكم حسن تعاونكم.

الجزء الأول: البيانات الديموغرافية والوظيفية

- الجنس: (ذكر / أنثى).
- المسمى الوظيفي: (مسؤول / صانع قرار — مسؤول تنفيذي بلدي — مدير تقني — باحث / خبير أكاديمي).
- سنوات الخبرة: (أقل من 5 — من 5 إلى أقل من 10 — من 10 إلى أقل من 15 — 15 فأكثر).
- نوع المؤسسة: (وزارة / هيئة حكومية — أمانة / بلدية — شركة إدارة نفايات — جهة أكاديمية / بحثية).
- المدينة: (الرياض — جدة — الدمام).
- المؤهل العلمي: (بكالوريوس — ماجستير — دكتوراه — أخرى).

الجزء الثاني: محورو واقع إدارة النفايات وكفاءتها التشغيلية (12 عبارة)

1. تعتمد منظومة إدارة النفايات في مؤسستي على أساليب تقليدية في جمع النفايات ونقلها.
2. تُجمع النفايات وفق جداول زمنية ثابتة دون مراعاة لمستوى امتلاء الحاويات الفعلي.
3. تواجه المؤسسة ارتفاعاً ملحوظاً في التكاليف التشغيلية لعمليات جمع النفايات ونقلها.

4. لا تتجاوز نسبة إعادة التدوير في نطاق عمل مؤسستي المعدلات المأمولة.
5. تُوجَّه مسارات مركبات الجمع بصورة يدوية دون الاستعانة بأنظمة توجيه ذكية.
6. يتدفق جزء كبير من النفايات إلى المكبات دون معالجة أو فرز مناسب.
7. تعاني المنظومة من ضعف في دقة بيانات كميات النفايات المتولدة وتوزيعها.
8. يُعدّ مستوى كفاءة عمليات الفرز في مؤسستي منخفضاً مقارنةً بالمستهدف.
9. تُسبب الممارسات الحالية لإدارة النفايات أثراً بيئياً سلبية ملموسة.
10. تفتقر المنظومة إلى مؤشرات أداء واضحة لقياس كفاءة عمليات إدارة النفايات.
11. يتسم الأداء التشغيلي الحالي لإدارة النفايات بالبطء في الاستجابة للمستجدات.
12. ثمة حاجة ملحة لتطوير منظومة إدارة النفايات في مؤسستي نحو نموذج أكثر كفاءة.

الجزء الثالث: محاور جاهزية وتطبيق الحلول التقنية (20 عبارة)

13. تمتلك مؤسستي بنية تحتية رقمية كافية لاستيعاب الحلول التقنية الحديثة في إدارة النفايات.
14. تتوافر لدى المؤسسة أنظمة معلومات قادرة على التكامل مع تقنيات إنترنت الأشياء.
15. تُطبَّق أو تُختَبَر حالياً أجهزة استشعار لرصد مستوى امتلاء حاويات النفايات.
16. تُسهم تقنيات إنترنت الأشياء في تحسين كفاءة جدولة عمليات الجمع.
17. يُتيح توظيف إنترنت الأشياء تقليل التكاليف التشغيلية لمركبات الجمع.
18. تُستخدم أنظمة التوجيه الذكي لتحسين مسارات مركبات جمع النفايات.
19. تُوظَّف خوارزميات الذكاء الاصطناعي في تصنيف النفايات وفرزها.
20. يُسهم الذكاء الاصطناعي في رفع دقة عمليات الفرز مقارنةً بالأساليب اليدوية.
21. يرتبط استخدام الذكاء الاصطناعي في التصنيف بارتفاع معدلات إعادة التدوير.

22. تُستخدم نماذج تحليل البيانات الضخمة للتنبؤ بكميات النفايات المتولدة.
23. تُسهم نماذج التنبؤ في تحسين التخطيط التشغيلي لإدارة النفايات.
24. تتوافر بيانات منظمة وقابلة للتشغيل البيئي بين الأنظمة المختلفة في المؤسسة.
25. تمتلك المؤسسة الكوادر البشرية المؤهلة لتشغيل الحلول التقنية الحديثة.
26. تتوافر برامج تدريب وتأهيل للعاملين على استخدام التقنيات الذكية.
27. تُسهم الحلول التقنية المتكاملة في تقليل الأثر البيئي السلبي لعمليات إدارة النفايات.
28. يدعم تطبيق الحلول التقنية تحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري في المؤسسة.
29. تتسم الحلول التقنية المعتمدة بسهولة الاستخدام من منظور العاملين.
30. يدرك العاملون الفائدة العملية للحلول التقنية في تحسين أدائهم.
31. توجد خطة واضحة لدى المؤسسة للتحويل نحو إدارة نفايات ذكية ومستدامة.
32. تتوافق الحلول التقنية المطبقة مع متطلبات رؤية المملكة 2030 للاستدامة البيئية.

الجزء الرابع: محور العوائق والعوامل الحاسمة للنجاح (15 عبارة)

33. يُعدّ ضعف البنية التحتية الرقمية من أبرز العوائق أمام تبني الحلول التقنية.
34. تُمثّل ندرة البيانات المنظمة عائقاً رئيسياً أمام تطبيق الذكاء الاصطناعي.
35. يُشكّل ضعف قابلية التشغيل البيئي بين الأنظمة عقبة أمام التكامل التقني.
36. تُعيق محدودية التمويل المخصص اعتماد الحلول التقنية الحديثة.
37. يُعدّ ارتفاع التكلفة الأولية للتقنيات الذكية عائقاً مالياً مؤثراً.
38. يُمثّل نقص الكوادر البشرية المؤهلة تقنياً تحدياً أمام التطبيق.
39. تُعيق مقاومة التغيير لدى بعض العاملين تبني الحلول التقنية الجديدة.

40. يُشكّل غياب التشريعات والأطر التنظيمية الداعمة عائقاً أمام التطبيق.

41. يُعدّ ضعف التنسيق بين الجهات المعنية تحدياً تنظيمياً مؤثراً.

42. يُسهم وضوح الدعم القيادي والإداري في إنجاح تطبيق الحلول التقنية.

43. يُعزّز توافر التمويل الكافي والمستدام من فرص نجاح التطبيق التقني.

44. يُعدّ بناء القدرات وتدريب الكوادر عاملاً حاسماً في نجاح التطبيق.

45. يُسهم وجود استراتيجية وطنية واضحة في تسريع التحول التقني للمنظومة.

46. يُعزّز الاستفادة من التجارب الدولية الناجحة من فرص نجاح التطبيق المحلي.

47. يُمثّل التكامل بين مختلف الحلول التقنية عاملاً جوهرياً في تحقيق منظومة ذكية فعّالة.

سؤال ختامي مفتوح: ما المقترحات أو الملاحظات التي ترى أنها تُسهم في تطوير منظومة إدارة النفايات الذكية في مدينتك؟

ملحق (ب): دليل المقابلة شبه المنظمة

يتكوّن الدليل من أربعة عشر سؤالاً مفتوحاً موزّعةً على خمسة محاور، على النحو الآتي:

المحور الأول: واقع إدارة النفايات وتقييم الكفاءة

1. كيف تصف الواقع الحالي لمنظومة إدارة النفايات في مدينتك من حيث الجمع والفرز والمعالجة؟

2. ما أبرز جوانب القصور التي تلاحظونها في الأساليب التقليدية المعتمدة حالياً؟

3. كيف تقيّمون مستوى الكفاءة التشغيلية والبيئية للمنظومة في الوقت الراهن؟

المحور الثاني: الحلول التقنية المطبّقة وتقييمها

4. ما الحلول التقنية (إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، الاستشعار، تحليل البيانات) التي طُبِّقت أو جُرِّبت في

مؤسستكم؟

5. كيف تقيّمون نتائج هذه التجارب من حيث الأثر على التكاليف ومعدلات إعادة التدوير؟

6. في رأيكم، ما أكثر الحلول التقنية قابليةً للتطبيق في السياق السعودي ولماذا؟

المحور الثالث: العوائق والتحديات

7. ما أبرز العوائق التنظيمية والإدارية التي تواجه اعتماد الحلول التقنية في إدارة النفايات؟

8. ما التحديات المالية والمتعلقة بالتمويل التي تُعيق التحول التقني؟

9. إلى أي مدى يُمثّل نقص الكوادر المؤهلة ومقاومة التغيير عائقاً أمام التطبيق؟

المحور الرابع: الجاهزية الرقمية والمؤسسية

10. كيف تقيّمون مستوى جاهزية البنية التحتية الرقمية في مؤسستكم لاستيعاب التقنيات الذكية؟

11. ما مدى توافر البيانات المنظمة وقابلية التشغيل البيئي بين الأنظمة المختلفة لديكم؟

المحور الخامس: الرؤى والتوصيات المستقبلية

12. ما العوامل التي ترونها حاسمة لإنجاح تطبيق الحلول التقنية استناداً إلى تجربتكم؟

13. كيف يمكن الاستفادة من التجارب الدولية الناجحة في تطوير منظومتنا المحلية؟

14. ما ملامح النموذج المتكامل الذي تقترحونه لإدارة نفايات ذكية ومستدامة في المدن السعودية؟

ملحق (ج): قائمة السادة المحكّمين

عُرضت أداة الدراسة على لجنةٍ من سبعة محكّمين من ذوي الاختصاص في الإدارة البيئية ونظم المعلومات والتقنيات

الحديثة، ويوضّح الجدول الآتي بياناتهم:

م	الاسم والرتبة العلمية	التخصص
1	أ.د. محمد بن عايض النטיפات	الإدارة البيئية
2	أ.د. محمد عبدالرحمن عباس	نظم المعلومات
3	د. محمد أحمد أحمد عوده	الذكاء الاصطناعي
4	د. عامر محمد الشاذلي	هندسة بيئية
5	د. أنور مصطفى هلال	إدارة النفايات
6	د. نورة سالم الموسى	المدن الذكية
7	د. عبدالله معيوف العززي	مناهج البحث

ملحق (د): المتوسطات والانحرافات التفصيلية لجميع عبارات الاستبانة

يعرض هذا الملحق المتوسطات الحسابية والانحرافات المعيارية ومستوى التقدير لجميع عبارات الاستبانة السبع

والأربعين مرتبةً وفق ترتيبها في الأداة (ن = 205).

المحور الأول: واقع إدارة النفايات (12 عبارة)

م	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
1	تعتمد منظومة إدارة النفايات في مؤسستي على أساليب تقليدية ...	3.88	0.87	مرتفعة
2	تُجمع النفايات وفق جداول زمنية ثابتة دون مراعاة مستوى ام...	3.89	0.91	مرتفعة
3	تواجه المؤسسة ارتفاعاً ملحوظاً في التكاليف التشغيلية لعمل...	3.87	0.97	مرتفعة
4	لا تتجاوز نسبة إعادة التدوير في نطاق عمل مؤسستي المعدلات ...	3.85	0.84	مرتفعة
5	تُوجّه مسارات مركبات الجمع بصورة يدوية دون الاستعانة بأن...	3.94	0.90	مرتفعة
6	يتدفق جزء كبير من النفايات إلى المكبات دون معالجة أو فرز...	3.84	0.88	مرتفعة
7	تعاني المنظومة من ضعف في دقة بيانات كميات النفايات المتول...	3.87	0.84	مرتفعة
8	يُعدّ مستوى كفاءة عمليات الفرز في مؤسستي منخفضاً مقارنةً ...	3.94	0.90	مرتفعة
9	تُسبب الممارسات الحالية لإدارة النفايات آثاراً بيئية سلب...	3.86	0.95	مرتفعة
10	تفتقر المنظومة إلى مؤشرات أداء واضحة لقياس كفاءة عمليات إ...	3.86	0.88	مرتفعة
11	يتسم الأداء التشغيلي الحالي لإدارة النفايات بالبطء في ال...	3.84	0.91	مرتفعة
12	ثمة حاجة ملحة لتطوير منظومة إدارة النفايات في مؤسستي نحو...	3.94	0.87	مرتفعة

المحور الثاني: جاهزية وتطبيق الحلول التقنية (20 عبارة)

م	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
13	تمتلك مؤسستي بنية تحتية رقمية كافية لاستيعاب الحلول التقن...	3.68	0.91	مرتفعة
14	تتوافر لدى المؤسسة أنظمة معلومات قادرة على التكامل مع تقن...	3.66	0.87	مرتفعة
15	تُطَبّق أو تُختَبَر حالياً أجهزة استشعار لرصد مستوى امتلاء...	3.77	0.82	مرتفعة
16	تُسهّم تقنيات إنترنت الأشياء في تحسين كفاءة جدولة عمليات ا...	3.72	0.89	مرتفعة
17	يُتيح توظيف إنترنت الأشياء تقليل التكاليف التشغيلية لمركب...	3.62	0.85	مرتفعة
18	تُستخدم أنظمة التوجيه الذكي لتحسين مسارات مركبات جمع النف...	3.72	0.87	مرتفعة
19	تُوظَّف خوارزميات الذكاء الاصطناعي في تصنيف النفايات وفرز...	3.70	0.81	مرتفعة
20	يُسهّم الذكاء الاصطناعي في رفع دقة عمليات الفرز مقارنةً با...	3.71	0.90	مرتفعة
21	يرتبط استخدام الذكاء الاصطناعي في التصنيف بارتفاع معدلات ...	3.63	0.86	مرتفعة
22	تُستخدم نماذج تحليل البيانات الضخمة للتنبؤ بكميات النفايات...	3.67	0.91	مرتفعة

م	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
23	تُسهّم نماذج التنبؤ في تحسين التخطيط التشغيلي لإدارة النفا...	3.66	0.86	مرتفعة
24	تتوافر بيانات منظمة وقابلة للتشغيل البيئي بين الأنظمة الم...	3.75	0.85	مرتفعة
25	تمتلك المؤسسة الكوادر البشرية المؤهلة لتشغيل الحلول التقن...	3.68	0.91	مرتفعة
26	تتوافر برامج تدريب وتأهيل للعاملين على استخدام التقنيات ا...	3.67	0.85	مرتفعة
27	تُسهّم الحلول التقنية المتكاملة في تقليل الأثر البيئي السل...	3.56	0.86	مرتفعة
28	يدعم تطبيق الحلول التقنية تحقيق مبادئ الاقتصاد الدائري في...	3.60	0.86	مرتفعة
29	تتسم الحلول التقنية المعتمدة بسهولة الاستخدام من منظور ال...	3.69	0.83	مرتفعة
30	يدرك العاملون الفائدة العملية للحلول التقنية في تحسين أدا...	3.68	0.86	مرتفعة
31	توجد خطة واضحة لدى المؤسسة للتحويل نحو إدارة نفايات ذكية و...	3.68	0.93	مرتفعة
32	تتوافق الحلول التقنية المطبقة مع متطلبات رؤية المملكة 2...	3.62	0.83	مرتفعة

المحور الثالث: العوائق والعوامل الحاسمة (15 عبارة)

م	العبارة	المتوسط	الانحراف	المستوى
33	يُعدّ ضعف البنية التحتية الرقمية من أبرز العوائق أمام تب...	3.94	0.83	مرتفعة
34	تُمثّل ندرة البيانات المنظمة عائقاً رئيسياً أمام تطبيق ال...	3.92	0.85	مرتفعة
35	يُشكّل ضعف قابلية التشغيل البيئي بين الأنظمة عقبة أمام ال...	3.97	0.86	مرتفعة
36	تُعيق محدودية التمويل المخصص اعتماد الحلول التقنية الحديثة	3.96	0.88	مرتفعة
37	يُعدّ ارتفاع التكلفة الأولية للتقنيات الذكية عائقاً مالياً...	4.02	0.90	مرتفعة
38	يُمثّل نقص الكوادر البشرية المؤهلة تقنياً تحدياً أمام الت...	3.98	0.88	مرتفعة
39	تُعيق مقاومة التغيير لدى بعض العاملين تبني الحلول التقني...	3.88	0.83	مرتفعة
40	يُشكّل غياب التشريعات والأطر التنظيمية الداعمة عائقاً أما...	3.98	0.88	مرتفعة
41	يُعدّ ضعف التنسيق بين الجهات المعنية تحدياً تنظيمياً مؤثراً...	3.98	0.94	مرتفعة
42	يُسهّم وضوح الدعم القيادي والإداري في إنجاح تطبيق الحلول ا...	3.97	0.79	مرتفعة
43	يُعزّز توافر التمويل الكافي والمستدام من فرص نجاح التطبيق...	3.98	0.83	مرتفعة
44	يُعدّ بناء القدرات وتدريب الكوادر عاملاً حاسماً في نجاح ا...	4.05	0.90	مرتفعة
45	يُسهّم وجود استراتيجية وطنية واضحة في تسريع التحول التقني ...	3.97	0.94	مرتفعة
46	يُعزّز الاستفادة من التجارب الدولية الناجحة من فرص نجاح ا...	3.89	0.88	مرتفعة
47	يُمثّل التكامل بين مختلف الحلول التقنية عاملاً جوهرياً في...	3.98	0.82	مرتفعة