البحث التطبيقي

جمهورية مصر العربية
معهد التخطيط القومي
الدراسات العليا

عنوان البحث باللغة العربية	دور الذكاء الأصطناعى في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة
عنوان البحث باللغة الإنجليزية	The Role of Artificial Intelligence in Fabric Waste Recycling
إعداد	منه مصطفى أنور حموده
إشراف	د. شيماء عزب مدرس التخطيط البيئي – مركز التخطيط والتنمية البيئية

لاستكمال متطلبات

الحصول على الماجستير المهني

"التخطيط للتنمية المستدامة"

مايو 2026

المستخلص:

يهدف هذا البحث إلى دراسة دور الذكاء الاصطناعي في تطوير منظومة إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، بوصفها أحد التحديات البيئية والاقتصادية الرئيسة التي تواجه قطاع الصناعات النسيجية في مصر . وينطلق البحث من حقيقة أن صناعة المنسوجات تعد من أكثر القطاعات توليدًا للمخلفات الصلبة واستهلاكًا للموارد الطبيعية، بما ينعكس سلبًا على البيئة ويزيد من الانبعاثات الكربونية، وهو ما يتعارض مع مستهدفات التنمية المستدامة ورؤية مصر 2030.

ويعتمد البحث على المنهج الوصفي التحليلي، من خلال مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة، وتحليل الإطار المؤسسي والتشريعي لإدارة المخلفات، ومتابعة التطبيقات المعاصرة لتقنيات الذكاء الاصطناعي، مثل التعلم الآلي والرؤية الحاسوبية وتحليل البيانات الضخمة، في مراحل فرز وتصنيف ومعالجة المخلفات النسيجية. كما يتناول البحث مقارنة بين كفاءة الأساليب التقليدية والأنظمة الذكية في إعادة التدوير من حيث الدقة التشغيلية، وتقليل الهدر، وتحسين جودة الألياف المعاد تدويرها.

وتوصل البحث إلى أن توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي تسهم بشكل ملحوظ في رفع كفاءة فرز المخلفات النسيجية، وتقليل التكاليف التشغيلية، وخفض الانبعاثات البيئية، ودعم التحول نحو الاقتصاد الدائري في قطاع النسيج. وفي المقابل، يواجه تطبيق هذه التقنيات تحديات تتعلق بارتفاع تكلفة الاستثمار، وضعف البنية التكنولوجية، ونقص قواعد البيانات، خاصة في المصانع الصغيرة والمتوسطة.

وفى ختام البحث تم التوصل الى إقتراح مجموعة من السياسات والآليات القابلة للتنفيذ لدعم إدماج الذكاء الاصطناعي في منظومة إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، بما يسهم في تحقيق التوازن بين النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة.

الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي – إعادة تدوير مخلفات الأقمشة – المخلفات النسيجية – الاقتصاد الدائري – التنمية المستدامة.

Abstract:

This research aims to examine the role of artificial intelligence in enhancing fabric waste recycling systems as one of the major environmental and economic challenges facing the textile industry in Egypt. The textile sector is considered one of the most resource-intensive and waste-generating industries, contributing significantly to environmental degradation and carbon emissions, which contradicts the objectives of sustainable development and Egypt Vision 2030.

The study adopts a descriptive analytical approach, relying on a review of relevant literature, analysis of the institutional and legislative framework for waste management, and an assessment of contemporary AI applications such as machine learning, computer vision, and big data analytics in textile waste sorting, classification, and processing. The research also compares traditional recycling methods with AI-driven systems in terms of operational efficiency, waste reduction, and the quality of recycled fibers.

The Study indicate that AI technologies significantly improve sorting accuracy, reduce operational costs, minimize environmental impacts, and support the transition toward a circular economy in the textile sector. However, several challenges hinder large-scale implementation, including high initial investment costs, limited technological infrastructure, and insufficient data availability, particularly in small and medium-sized enterprises.

The study concluded a set of practical policy measures and implementation mechanisms to facilitate the integration of AI into textile waste recycling systems, thereby promoting sustainable industrial development and environmental protection.

Keywords: Artificial Intelligence – Textile Waste Recycling – Fabric Waste – Circular Economy – Sustainable Development.

جدول المحتويات

المحتويات	رقم الصفحة
الإطار العام للبحث.....	**3**
• تمهيد.....	**3**
• المشكلة البحثية.....	**3**
• الأهداف البحثية.....	**5**
• الأهمية البحثية.....	**5**
• التساؤلات البحثية.....	**6**
• المنهجية البحثي.....	**6**
• الحدود البحثية.....	**8**
• مصادر البيانات.....	**9**
• الدراسات السابقة.....	**9**
• المفاهيم البحثية.....	**14**
الفصل الأول: الإطار النظري للذكاء الاصطناعي وإعادة تدوير المخلفات النسيجية.....	**16**
الفصل الثاني: الدراسة الميدانية والتطبيقية.....	**34**
الفصل الثالث: توصيات البحث.....	**43**
ملحق (1): استطلاع رأي حول دور الذكاء الأصطناعى في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة..	**44**
ملحق (2) : استمارة أستبيان حول دور الذكاء الأصطناعى في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة لمصنع KCG Textile Egypt	**48**
قائمة المراجع.....	**50**

الإطار العام للبحث

1. تمهيد:

في ظل التحديات البيئية المتزايدة التي تواجهها الدول النامية والمتقدمة على حد سواء، ولا سيما التغيرات المناخية، أصبحت إدارة المخلفات الصناعية، وبخاصة مخلفات الأقمشة والمنسوجات، من القضايا المحورية المرتبطة بتحقيق التنمية المستدامة. ويعتبر قطاع المنسوجات من أكثر القطاعات استهلاكًا للموارد الطبيعية وتوليدًا للمخلفات الصلبة، مما يسهم في زيادة الضغوط البيئية، وارتفاع معدلات التلوث، واستنزاف الموارد غير المتجددة، وهو ما يتعارض مع متطلبات التحول نحو أنماط إنتاج واستهلاك مستدامة. وفي هذا الإطار، أولت رؤية مصر 2030 اهتمامًا كبيرًا بإدارة المخلفات نظرًا لما تسببه من آثار بيئية جسيمة، ويعتبر المحور البيئي أحد الركائز الأساسية لتحقيق التنمية الشاملة والمستدامة. ويتجلى ذلك في الهدف الفرعي الثاني المعني باستدامة الموارد الطبيعية، والهدف الفرعي الرابع المعني بإدارة المخلفات، ضمن المحور الاستراتيجي الثالث من النسخة المحدثة للاستراتيجية، والذي يستهدف الوصول إلى نظام بيئي متكامل. كما تولي الدولة اهتمامًا خاصًا بتطوير قطاع المنسوجات وتحديثه، بهدف تحسين كفاءة الإنتاج، وترشيد استخدام الموارد، وتحقيق رفاهية العاملين.

ويأتي قطاع صناعة المنسوجات ضمن القطاعات ذات الأولوية نظرًا لأهميته الاقتصادية من ناحية، وتأثيراته البيئية من ناحية أخرى، إذ يوفر نحو 1.5 مليون فرصة عمل، ويسهم بحوالي 3% من الناتج المحلي الإجمالي، ونحو 12% من إجمالي الصادرات المصرية (UNIDO, 2022)، الأمر الذي يستدعي تبني حلول تكنولوجية متقدمة لمعالجة مخلفاته بكفاءة، والحد من آثاره البيئية السلبية، ودعم مسار التنمية المستدامة.

لذا، يبرز الذكاء الاصطناعي كأحد الأدوات التكنولوجية الحديثة القادرة على إحداث نقلة نوعية في منظومة إعادة تدوير مخلفات الأقمشة. إذ تسهم تطبيقاته المتقدمة، مثل تقنيات التعلم الآلي والرؤية الحاسوبية في تحسين عمليات فرز الأقمشة مما يعزز كفاءة عمليات إعادة التدوير. كما تسهم هذه التقنيات في تقليل الفاقد، وخفض التكاليف التشغيلية، وتحسين جودة المواد المعاد تدويرها، الأمر الذي يدعم الاستخدام الأمثل للموارد، ويحد من الأضرار البيئية الناتجة عن ممارسات إدارة المخلفات التقليدية، ويعزز التحول نحو الاقتصاد الدائري في قطاع المنسوجات.وعليه، يسعى هذا البحث إلى رصد دور الذكاء الاصطناعي في تطوير منظومة إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، وبيان دوره الحيوي في تعزيز كفاءة إدارة المخلفات الصناعية، ودعم التحول نحو الاقتصاد الدائري، وتحقيق التوازن بين النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة.

2. المشكلة البحثية:

يعد قطاع المنسوجات وصناعة الأقمشة من أكثر القطاعات استهلاكًا للموارد الطبيعية وتوليدًا للمخلفات الصلبة، إذ يساهم تراكم هذه المخلفات واستنزاف المواد الخام في التلوث البيئي وزيادة الانبعاثات الكربونية، مما يتسبب في تسريع وتيرة التغيرات المناخية وزيادة الضغوط البيئية على النظم الطبيعية. أي أن المخلفات الصناعية الناتجة عن صناعة الأقمشة ليست مجرد عبء بيئي محلي، بل تعتبر عاملًا مساهماً في تفاقم المشكلات البيئية العالمية، حيث يؤدي حرق المخلفات أو دفنها إلى إطلاق غازات دفيئة تسهم في الاحتباس الحراري وتدهور البيئة.

وعلى المستوى العالمي، يُقدَّر استهلاك صناعة المنسوجات والملابس بنحو93مليار متر مكعب من القماش الخام سنويًا لإنتاج ما يقرب من 150–100مليار قطعة ملابس، وهو ما يؤدي إلى توليد حوالي92 مليون طن من مخلفات المنسوجات سنويًا. وفي المقابل، لا تتجاوز نسبة ما يُعاد تدويره من هذه المخلفات20%–15 فقط، بينما ينتهي المطاف بأكثر من 80% من مخلفات الأقمشة في مكبات المخلفات أو يتم حرقها، مما يسهم في زيادة البصمة الكربونية وفقدان الطاقة وهدر المواد الخام. كما تُعد صناعة المنسوجات مسؤولة عن نحو 1.2مليار طن من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون سنويًا، فضلًا عن تلويث المحيطات بحوالي500 ألف طن من الجزيئات البلاستيكية الدقيقة الناتجة عن الألياف الصناعية، وهو ما يعكس حجم الأثر البيئي السلبي لهذه الصناعة، ويؤكد الحاجة الملحّة إلى تبني نماذج الاقتصاد الدائري في إدارة المخلفات النسيجية (Ellen MacArthur Foundation,2017) و(United Nations Environment Programme (UNEP) ,2023).

وفي مصر، تمثل المخلفات النسيجية حوالي 3–5% من إجمالي المخلفات الصلبة، بما يعادل نحو 385 ألف طن سنويًا (مركز بحوث الصناعة، 2022)، ويأتي 60% منها من الأسر، و25% من مصانع الملابس، و10% من محلات البيع، و5% من قطاعات أخرى (مصطفى، م. أ ،2021). وعلى الرغم من الكميات الضخمة المهدرة من مخلفات الأقمشة وغياب الوعي الكافي بإمكانيات الاستفادة منها، لا يزال توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات فرز وإعادة تدوير هذه المخلفات محدود التطبيق. في المقابل، تشير دراسات علمية حديثة إلى أن أنظمة الفرز الذكية المعتمدة على التعلم العميق والرؤية الحاسوبية قادرة على تحقيق دقة تصنيف تتراوح بين 95% و97 % في تحديد أنواع الأقمشة، مقارنة بدقة لا تتجاوز نحو 65–70 %في حالات الفرز اليدوي التقليدي، وهو ما يعكس فجوة واضحة بين الإمكانات التقنية المتاحة ومستوى التطبيق الفعلي لها (Spyridis, Y., & Argyriou, V , 2025) و (Faghih, E., Saki, Z., & M Moore, M , 2025). كما تستهدف رؤية مصر 2030 رفع نسبة إعادة التدوير من 20% إلى 60% بحلول عام 2030 (وزارة التخطيط والتنمية الاقتصادية، 2022).

لذا، تكمن المشكلة البحثية في وجود فجوة واضحة بين إمكانيات الذكاء الاصطناعي وما توفره من كفاءة في إدارة المخلفات والنسيجية، وبين محدودية تطبيقها عمليًا في المصانع المصرية. ويترتب على هذا القصور استمرار انخفاض دقة الفرز، وزيادة الهدر، وارتفاع التكاليف التشغيلية، فضلاً عن تفاقم الانبعاثات الكربونية الناتجة عن حرق أو دفن المخلفات، مما يعيق تحقيق مستهدفات التنمية المستدامة المتعلقة برفع نسبة إعادة التدوير.

وتبرز أهمية المشكلة في أن غياب الأنظمة الذكية في المصانع يؤدي إلى هدر الموارد وزيادة التكاليف، في حين تشير دراسات الجدوى الاجتماعية والاقتصادية إلى أن اعتماد تقنيات الذكاء الاصطناعي يمكن أن يقلل الوقت والتكلفة، ويعزز كفاءة الإنتاج والعوائد الاقتصادية (مصطفى، 2021). ومع ذلك، تواجه المؤسسات تحديات تتعلق بارتفاع تكلفة الاستثمار في التكنولوجيا، ونقص قواعد البيانات اللازمة لتدريب الأنظمة الذكية. وبالتالي، يصبح إدماج الذكاء الاصطناعي في منظومة إدارة المخلفات الصناعية للقطاع النسيجي ضرورة وطنية لتعزيز الاقتصاد الدائري، وتقليل الفاقد، وتحقيق التوازن بين التنمية الاقتصادية والحفاظ على البيئة.

3.الأهداف البحثية:

يهدف هذا البحث إلى استكشاف دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين عمليات إعادة تدوير مخلفات الأقمشة في مصر، بما يتماشى مع التحديات البيئية والاقتصادية المعاصرة، ويساهم في تحقيق مستهدفات الاستدامة الوطنية ورؤية مصر 2030، وسيتم تحقيق هذا الهدف من خلال الأهداف الفرعية التالية:

- التعرف على أنواع المخلفات النسيجية في مصر ومصادرها، وتحليل الخصائص لتحديد مدى قابليتها لإعادة التدوير.
- رصد إمكانيات توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة مقارنة بالطرق التقليدية كأداة لتعزيز الاستفادة القصوى من المخلفات.
- رصد التحديات والفرص المرتبطة التي تواجه تطبيق الذكاء الاصطناعي في مصانع إعادة تدوير مخلفات الاقمشة.
- اقتراح سياسات داعمة قابلة للتنفيذ تسهم في إدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة ضمن منظومة إدارة المخلفات.

4.الأهمية البحثية:

4.1 الأهمية النظرية للبحث:

تنبع الأهمية النظرية لهذا البحث من معالجته لفجوة متعلقة بتطبيقات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، خاصة في السياق المصري، حيث لا تزال الدراسات المحلية محدودة ولا تقدم إطارًا معرفيًا متكاملًا يربط بين الذكاء الاصطناعي ومنظومة الاقتصاد الدائري في قطاع صناعة النسيج.

ويسهم البحث في بناء إطار نظري تحليلي يساعد في تفسير آليات توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي مثل الرؤية الحاسوبية والتعلم العميق وتحليل البيانات التنبؤية في رفع دقة فرز المخلفات النسيجية، وتحسين جودة الألياف المعاد تدويرها، وتقليل نسب الهدر الناتج عن قصور الأساليب التقليدية المعتمدة على الفرز اليدوي.

كما يقدم البحث إضافة نظرية جديدة من خلال دمج مفاهيم التحول الرقمي الصناعي مع مبادئ الاقتصاد الدائري، بما يساهم في الانتقال من النموذج الخطي التقليدي (إنتاج–استهلاك–إلقاء) إلى نموذج إنتاجي متجدد قائم على إعادة الاستخدام وإطالة دورة حياة المواد، بما يعزز القيمة العلمية للنماذج المقترحة لإدارة المخلفات النسيجية الذكية.

4.2 الأهمية التطبيقية للبحث

تتمثل الأهمية التطبيقية للبحث في كونه يقدم حلولًا عملية قابلة للتنفيذ تسهم في دعم جهود المؤسسات الصناعية وصناع القرار في مصر في مواجهة تحديات تزايد كميات المخلفات النسيجية وارتفاع تكاليف إدارتها وتأثيرها البيئي. ويوضح البحث الدور المحوري لتقنيات الذكاء الاصطناعي في رفع كفاءة الفرز وتقليل الهدر وتحسين إنتاجية خطوط إعادة التدوير، وهو ما أكدته دراسات مثل (Muthu وآخرون، 2020)التي بينت قدرة النظم الذكية على خفض الوقت والتكاليف التشغيلية مقارنة بالطرق التقليدية.

كما يعزز البحث قدرة الشركات الصغيرة والمتوسطة العاملة في إعادة تدوير الأقمشة على التكيف مع المتغيرات التكنولوجية من خلال توفير إطار تطبيقي يساعد على تجاوز مشكلات ضعف البنية التكنولوجية ونقص قواعد البيانات اللازمة لتدريب الأنظمة الذكية، وهي تحديات رصدتها دراسات(Zambrano وآخرين،2021) و(Bressanelli وآخرين،2023) .

وتتسع الأهمية التطبيقية للبحث لتشمل دعم السياسات العامة المتوافقة مع مستهدفات رؤية مصر 2030، إذ يبرز البحث الدور الذي يمكن أن يقوم به الذكاء الاصطناعي في دعم هدف رفع نسبة إعادة التدوير من 20% إلى60% بحلول عام 2030 (وزارة التخطيط والتنمية

الاقتصادية، 2022)، من خلال خفض العبء البيئي وتقليل الاعتماد على المدافن والحرق المفتوح. كما يتكامل البحث مع توجهات التمويل الأخضر لدى البنك المركزي المصري، وبرامج الدعم الموجه للمشروعات البيئية بالتعاون مع مؤسسات دولية مثل البنك الأوروبي لإعادة الإعماروالتنميةEBRD ومنظمة التعاون الاقتصادي والتنمية OECD، مما يعزز فرص تبني مخرجات البحث على أرض الواقع.

وأخيرًا، يساهم البحث في تحسين إدارة الموارد وتقليل الانبعاثات من خلال توظيف نماذج الذكاء الاصطناعي في تحليل تدفقات المخلفات والتنبؤ بكمياتها وتوجيه عمليات إعادة الاستخدام، حيث أوضحت دراسات مثل Niero وآخرين (2023) أن توظيف تقنيات تحليل البيانات الضخمة في إدارة الموارد الصناعية ساهم في رفع الكفاءة التشغيلية بنسبة 25%، وهي نتائج تؤكد الجدوى البيئية والاقتصادية للتوسع في تطبيق الذكاء الاصطناعي داخل قطاع إعادة تدوير مخلفات الأقمشة.

الدوافع النظرية للبحث

ينطلق هذا البحث من مجموعة دوافع علمية تؤكد أهميته، أبرزها الحاجة إلى بناء إطار منهجي يوضح كيفية توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي لخدمة أهداف الاقتصاد الدائري في قطاع النسيج المصري، الذي يعد من أكثر القطاعات توليدًا للمخلفات الصناعية وأكثرها تأثيرًا على البيئة.

وعلى الرغم من وجود معارف أثبتت أن الذكاء الاصطناعي قادر على تحسين عمليات الفرز وإعادة التدوير إلا أن يوجد فجوة في الدراسات التطبيقية اللازمة لتعزيز قابلية تطبيق هذه التقنيات محليًا في ضوء التحديات التشريعية والبنيوية والتكنولوجية. كما أيضاً، يتسق البحث مع الاتجاه العالمي المتزايد نحو دعم الحلول الرقمية والعمليات منخفضة الكربون، إذ تعد صناعة الأقمشة من أكثر القطاعات استهلاكًا للموارد المائية والطاقة وإنتاجًا للانبعاثات.

وقد أكدت دراسات بيئية أن إعادة تدوير المخلفات النسيجية تساهم في خفض الانبعاثات الكربونية وتحسين جودة البيئة (Sandin &Peters،2018) .إلا أن تعظيم هذه الفوائد مرهون بتحديث تقنيات المعالجة والفرز، الأمر الذي يعزز الحاجة إلى تبني الذكاء الاصطناعي كأداة نظرية وتطبيقية قادرة على تطوير المنظومة الحالية وتحسين كفاءتها.

5.التساؤلات البحثية:

يسعى هذا البحث إلى اقتراح آليات تطبيقية قابلة للتنفيذ تدعم إدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، بما يسهم في تحسين كفاءة إدارة المخلفات، وتعظيم الاستفادة منها، وتقليل الفاقد، بما يتسق مع مستهدفات رؤية مصر 2030. ومن أجل تحقيق هذا الهدف، يسعى البحث إلى الإجابة عن التساؤلات التالية:

- ما هي أنواع المخلفات النسيجية في مصر ومصادرها وخصائصها؟
- ما إمكانيات توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة؟
- ما أبرز التحديات والفرص المرتبطة بتطبيق الذكاء الاصطناعي في مصانع إعادة تدوير مخلفات الأقمشة؟
- ما السياسات اللازمة لإدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي في منظومة إدارة المخلفات؟

6.المنهجية البحثية:

يعتمد هذا البحث على المنهج الوصفي التحليلي، من خلال الدمج بين التحليل النظري والدراسة التطبيقية، بهدف التعرف على دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين عمليات إعادة تدوير مخلفات الأقمشة في مصر، واستكشاف التحديات والفرص المرتبطة بتطبيقها.

تعتمد الدراسة النظرية على مراجعة الأدبيات والدراسات السابقة المرتبطة بإدارة المخلفات النسيجية، والاقتصاد الدائري، وتطبيقات الذكاء الاصطناعي في إعادة التدوير، وذلك بهدف:

- التعرف على أنواع مخلفات الأقمشة ومصادرها وخصائصها.
- رصد امكانيات تطبيقات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في فرز وتصنيف ومعالجة المخلفات النسيجية، مثل التعلم الآلي والرؤية الحاسوبية وتحليل البيانات.

- المقارنة بين الأساليب التقليدية والأنظمة الذكية في إعادة التدوير من حيث الكفاءة التشغيلية وتقليل الفاقد وتحسين جودة الألياف المعاد تدويرها.
- مراجعة الإطار التشريعي والمؤسسي المنظم لإدارة المخلفات في مصر، وتقييم مدى دعمه لتبني تقنيات الذكاء الاصطناعي في قطاع إعادة التدوير.

كما يتناول البحث جمع وتحليل البيانات الميدانية المتاحة حول المخلفات وعمليات إعادة التدوير، بما في ذلك كميات المخلفات، مصادرها، وخصائصها، بالإضافة إلى استطلاع ميداني (دراسة حالة) لتقييم جاهزية المصانع المصرية لتبني أنظمة الذكاء الاصطناعي، واستطلاع ممارساتها الحالية، ورصد التحديات الفنية والاقتصادية والتكنولوجية المرتبطة بتطبيق هذه التقنيات.

وفي ضوء التحليل النظري والبيانات الميدانية، يسعى البحث إلى اقتراح آليات عملية قابلة للتنفيذ لتعزيز إدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي في منظومة إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، وتقليل الهدر، وتحسين جودة المواد المعاد تدويرها، بما يدعم تحقيق أهداف الاستدامة البيئية والاقتصادية، ومستهدفات رؤية مصر 2030.

كما تعتمد الدراسة التطبيقية على منهج دراسة الحالة(Case Study) ، إلى جانب استخدام عدد من أدوات البحث الميداني بهدف جمع البيانات المتعلقة بواقع إدارة مخلفات الأقمشة ومدى إمكانية توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات إعادة التدوير داخل قطاع الصناعات النسيجية في مصر.

وتتضمن الدراسة التطبيقية ما يلي:

- إعداد استبيان ميداني وتوزيعه على مجموعة من الجهات المرتبطة بقطاع المنسوجات وإدارة المخلفات، والتي تشمل مصانع الصباغة والتجهيز، وشركات إعادة التدوير، والمراكز البحثية المتخصصة، وذلك بهدف التعرف على واقع إدارة المخلفات النسيجية ومدى جاهزية المؤسسات لتبني تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة المخلفات النسيجية.
- إجراء مقابلات شبه مقننة مع مسؤولي المصانع والخبراء والمتخصصين في مجال الصناعات النسيجية وإدارة المخلفات، بهدف دعم التحليل الميداني والتعرف على أبرز التحديات والفرص المرتبطة بتطبيق الأنظمة الذكية في عمليات إعادة التدوير
- تنفيذ زيارات ميدانية لأحد المنشآت الصناعية العاملة في قطاع المنسوجات وإعادةالتدويروهي KCG Textile Egypt S.A.E وذلك لمتابعة الممارسات الحالية الخاصة بعمليات إدارة المخلفات النسيجية وإعادة تدويرها .

كما تتضمن الدراسة التطبيقية إجراء تقييم اقتصادي لجدوى تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات إعادة التدوير باستخدام أسلوب صافي القيمة الحالية(Net Present Value – NPV) ، بهدف قياس الجدوى الاقتصادية المتوقعة من الاستثمار في الأنظمة الذكية داخل منشآت إعادة تدوير مخلفات الأقمشة.

وقد تم الاعتماد على أسلوب صافي القيمة الحالية(Net Present Value – NPV) وصفه أحد أهم مؤشرات تقييم المشروعات الاستثمارية، وذلك من خلال مقارنة التدفقات النقدية المتوقعة الناتجة عن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي . مثل خفض تكلفة الفرز اليدوي، وتقليل الفاقد من الخامات، ورفع جودة المواد المعاد تدويرها، وتحسين كفاءة التشغيل . بالتكاليف الاستثمارية الأولية اللازمة لتطبيق هذه التقنيات داخل المصنع، والتي تشمل شراء البرمجيات، وأجهزة الاستشعار الذكية، وأنظمة الرؤية الحاسوبية، وتدريب العاملين.

وأظهرت نتائج التحليل المالي المبدئي أن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي داخل مصنع KCG Textile Egypt S.A.E يحقق قيمة حالية صافية موجبة، بما يعكس جدوى اقتصادية مقبولة للاستثمار على المدى المتوسط والطويل، خاصة في ظل ارتفاع كفاءة الفرز وتقليل

نسب الهدر وتحسين استغلال المواد الخام المعاد تدويرها. كما تشير النتائج إلى أن فترة استرداد رأس المال المستثمر تصبح أقصر مقارنة بالاعتماد على الأساليب التقليدية، مما يعزز من قدرة المصنع على دعم التحول نحو الاقتصاد الدائري وتحقيق أهداف الاستدامة البيئية والاقتصادية بما يتوافق مع رؤية مصر 2030.

وتشير نتائج جدول (1) إلى أن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي داخل مصنع KCG Textile Egypt يمثل استثمارًا اقتصاديًا ذا جدوى مرتفعة، حيث انعكس ذلك بصورة مباشرة على مؤشرات الأداء المالي والتشغيلي للمصنع. فقد أسهمت الأنظمة الذكية في خفض تكلفة الفرز السنوية من 2,500,000 جنيه إلى 1,600,000 جنيه، بما يعادل وفرًا ماليًا ملحوظًا نتيجة تقليل الاعتماد على الفرز اليدوي ورفع كفاءة العمليات التشغيلية. كما انخفضت نسبة الفاقد من 18% قبل التطبيق إلى 7% بعد استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وهو ما يعكس تحسنًا واضحًا في كفاءة استغلال المواد الخام وتقليل نسب الهدر. وفي الوقت ذاته، ارتفعت الإيرادات الناتجة عن المواد المعاد تدويرها من 3,200,000 جنيه إلى 5,100,000 جنيه، بما يدل على تحسن جودة المخرجات وزيادة القيمة السوقية للمنتجات المعاد تدويرها. وعلى الرغم من ارتفاع تكلفة الاستثمار الأولي والبالغة 4,000,000 جنيه، إلا أن تسجيل صافي قيمة حالية موجبة قدرها +3,450,000 جنيه خلال خمس سنوات يؤكد قدرة المشروع على تحقيق عوائد مالية تتجاوز حجم الاستثمار، بما يدعم قرار التوسع في تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي داخل قطاع إعادة تدوير المخلفات النسيجية. وتبرز هذه النتائج الدور المحوري للذكاء الاصطناعي ليس فقط في تحسين الكفاءة التشغيلية، بل أيضًا في تعزيز الاستدامة الاقتصادية والبيئية بما يتوافق مع مستهدفات الاقتصاد الدائري ورؤية مصر 2030

جدول (1) : تحليل الجدوى الاقتصادية للاستثمار في تقنيات الذكاء الاصطناعي داخل مصنع KCG Textile Egypt S.A.E وفقًا لمؤشر صافي القيمة الحالية (NPV)

البند	قبل استخدامAI	بعد استخدامAI
تكلفة الفرز السنوية	2,500,000جنيه	1,600,000جنيه
نسبة الفاقد	18%	7%
الإيرادات من المواد المعاد تدويرها	3,200,000جنيه	5,100,000جنيه
الاستثمار الأولي	–	4,000,000جنيه
NPVخلال 5 سنوات	–	+3,450,000جنيه

*** المصدر: استنادًا إلى بيانات تشغيلية على نتائج الدراسة الميدانية ودراسة الحالة بمصنع KCG Textile Egypt**

تفسير النتيجة:

تشير القيمة الحالية الصافية الموجبة (+3,450,000 جنيه) إلى أن الاستثمار في تطبيقات الذكاء الاصطناعي داخل مصنع KCG Textile Egypt S.A.E يعد مجديًا اقتصاديًا، حيث تتجاوز المنافع المالية المتوقعة إجمالي التكلفة الاستثمارية، مما يدعم قرار التوسع في تبني التكنولوجيا الذكية في إدارة وإعادة تدوير مخلفات الأقمشة .

7.الحدود البحثية:

- **الحدود الموضوعية:** يجمع هذا البحث بين مجالين متكاملين هما الذكاء الاصطناعي وإدارة المخلفات الصناعية للتحول الصناعي الذكي في إدارة المخلفات، حيث يركز على دراسة دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين عمليات إعادة تدوير مخلفات الأقمشة ضمن قطاع الصناعات النسيجية في مصر، وذلك من خلال التعرف على تطبيقات الذكاء الاصطناعي مثل: التعلم الآلي، والرؤية الحاسوبية، وتحليل البيانات الذكية في مراحل فرز المخلفات وتصنيفها ومعالجتها ومقارنة بين الأساليب التقليدية والأنظمة الذكية في إعادة تدوير المخلفات النسيجية من حيث الكفاءة التشغيلية والأثر البيئي،

وكذلك تقييم مدى جاهزية البيئة الصناعية والتشريعية في مصر لتبني تلك التقنيات، دون التطرق إلى جميع قطاعات المخلفات الصناعية الأخرى أو الاستخدامات التكنولوجية خارج نطاق إعادة التدوير.

- **الحدود المكانية:** يقتصر البحث على جمهورية مصر العربية، مع التركيز التحليلي مصانع الغزل والنسيج والملابس الجاهزة بوصفها المصدر الأكبر لمخلفات الأقمشة الصناعية وكذلك منشآت إعادة تدوير المخلفات النسيجية في مناطق

صناعية مختارة (مثل: كفر الدوار بمحافظة البحيرة داخل مصنع مصر للحرير الصناعي، مدينة العاشر من رمضان) بوصفها مناطق تمثل نموذجًا لواقع الصناعة النسيجية المصرية (سيتم تحديدها فيما بعد).

- **الحدود الزمنية:** الفترة من 2015 إلى 2026 لتمثيل التحولات المعاصرة في قطاع تدوير مخلفات الأقمشة وتطبيقات الذكاء الاصطناعي ومستهدفات رؤية مصر 2030 كأحد الموجهات المستقبلية التي ينعكس عليها تطبيق نتائج البحث. كما تمثل سنة 2026 الإطار الزمني للدراسة التطبيقية (دراسة الحالة)، والتي يتم خلالها جمع وتحليل البيانات الميدانية، وتقييم الجدوى الاقتصادية لتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة.

8. مصادر البيانات:

يعتمد البحث في جمع بياناته على مزيج من المصادر الثانوية والأولية، حيث تشتمل المصادر الثانوية على الأبحاث والدراسات السابقة ذات الصلة بموضوع البحث، والتقارير الدولية والوطنية المتعلقة بإدارة المخلفات والصناعات النسيجية وتطبيقات الذكاء الاصطناعي. كما ستتضمن المصادر الأولية دراسة حالة ميدانية لمنشأ/ منشأت إعادة تدوير مخلفات الأقمشة بهدف تحليل الواقع العملي واستكشاف إمكانيات وفرص تطبيق التقنيات الذكية في هذا القطاع.

9. الدراسات السابقة:

يعتبر إعادة تدوير مخلفات الأقمشة من القضايا البحثية المتنامية عالميًا، نظرًا للزيادة المستمرة في كميات المخلفات وما تفرضه من تحديات بيئية واقتصادية. وقد أسهم التطور التكنولوجي السريع، وخصوصًا في مجالات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات، في توفير أدوات وأساليب جديدة لتحسين كفاءة وفعالية عمليات الفرز والمعالجة. فقد تناولت الدراسات السابقة محاور متعددة، أبرزها تطوير تقنيات فرز الأقمشة باستخدام تقنيات الطيفية (NIR / Raman / Hyperspectral imaging) وربطها بنماذج التعلم الآلي (ML/DL) لتحديد نوعية الألياف، نسب الخلط، وحالة التلف، وكذلك تحسين كفاءة عمليات إعادة التدوير الكيميائية والميكانيكية والبيولوجية. كما ركزت بعض الدراسات على دمج الذكاء الاصطناعي ضمن الاقتصاد الدائري لتحسين إدارة سلاسل الإمداد، تقليل الهدر، وتعزيز الاستدامة البيئية والاقتصادية. ومن أبرز هذه الدراسات ما يلي:

1. تناولت دراسة Earley و Goldsworthy(2015) استراتيجيات التصميم من أجل إعادة التدوير في صناعة الأزياء من منظور الاقتصاد الدائري، حيث هدفت إلى تقليل المخلفات النسيجية من خلال دمج مبادئ الاستدامة في مرحلة تصميم المنتج. وركزت الدراسة على اختيار الخامات القابلة لإعادة التدوير، وتبسيط تركيب الأقمشة والمنتجات لتسهيل عمليات التفكيك والفرز في نهاية العمر الافتراضي للمنتج. واعتمدت الدراسة على تحليل نماذج تصميمية وتطبيقات صناعية في قطاع الأزياء بالمملكة المتحدة، مع تقييم أثر التصميم المستدام على كفاءة عمليات إعادة التدوير. وأظهرت النتائج أن إدماج اعتبارات إعادة التدوير منذ مرحلة التصميم يسهم بشكل فعّال في تحسين كفاءة إدارة المخلفات وتقليل الفاقد، مؤكدةً أهمية التعاون بين المصممين والمصنعين لتطوير منتجات نسيجية مستدامة وقابلة للتطبيق التجاري.

2. تناولت دراسة Yoshidaوآخرون(2016) التحلل الحيوي لألياف البوليستر (PET) استخدام البكتيريا كأحد الحلول البيولوجية المستدامة لمعالجة النفايات النسيجية غير القابلة للتحلل. واعتمدت الدراسة على تجارب مخبرية أُجريت في مراكز أبحاث وجامعات في اليابان، حيث تم عزل بكتيريا Ideonella sakaiensisالقادرة على تفكيك البوليستر إلى مكوناته الأساسية من خلال نشاط إنزيمي

متخصص. وأظهرت النتائج إمكانية التحلل الحيوي للبوليستر وإعادة تمثيله بيولوجيًا، إلا أن معدل التحلل كان بطيئًا، مما يحد من تطبيق هذه التقنية على نطاق صناعي واسع في الوقت الحالي. وأكدت الدراسة على ضرورة تطوير الكفاءة الإنزيمية للبكتيريا وتحسين الظروف البيئية لعملية التحلل، بما يسهم مستقبلًا في توظيف التقنيات الحيوية ضمن استراتيجيات الإدارة المستدامة لمخلفات المنسوجات

3. تناولت دراسة Montazer و Harifi (2017) تقنيات التشطيب النانوي للمنسوجات كمدخل حديث لتعزيز الاستدامة في صناعة النسيج، حيث هدفت إلى تحسين الخصائص الفيزيائية والوظيفية للأقمشة بما يسهم في إطالة عمرها الإنتاجي وتقليل الأثر البيئي الناتج عن الاستهلاك المتكرر. واعتمدت الدراسة على تجارب مخبرية وتطبيقات صناعية نُفذت في جامعات ومراكز أبحاث نسيجية في إيران، حيث تم استخدام مواد نانوية لتطوير خصائص المتانة، ومقاومة التآكل، وتحسين الأداء الوظيفي للأقمشة. وأظهرت النتائج أن تقنيات النانو قادرة على تحسين جودة المنسوجات بشكل ملحوظ، مما يقلل من الحاجة إلى الاستبدال المتكرر للملابس ويسهم في خفض المخلفات النسيجية. كما أشارت الدراسة إلى وجود بعض التحديات المرتبطة بارتفاع تكلفة التقنيات النانوية وصعوبة تطبيقها على نطاق صناعي واسع، مؤكدةً أهمية تطوير حلول أكثر اقتصادية لدعم دمج تقنيات النانو ضمن استراتيجيات الاستدامة في صناعة الملابس.

4. تناولت دراسة Sandin و Peters(2018) الأثرالبيئي إعادة استخدام وإعادة تدوير المنسوجات من خلال مراجعة تحليلية شاملة للدراسات السابقة المعتمدة على منهج تقييم دورة الحياة(LCA) ، بهدف مقارنة هذه الممارسات بطرق التخلص التقليدية مثل الحرق والدفن، مع التركيز على مؤشرات الاستدامة البيئية المتمثلة في الانبعاثات الكربونية واستهلاك الطاقة والمياه، وقد أظهرت النتائج أن إعادة استخدام المنسوجات تُعد الخيار الأكثر كفاءة بيئيًا لما تسهم به في تقليل الاعتماد على المواد الخام الجديدة، في حين تظل إعادة تدوير الأقمشة بديلًا أفضل من الطمر أو الحرق عند تعذر إعادة الاستخدام المباشر، كما أكدت الدراسة أن الفوائد البيئية لإعادة التدوير تعتمد على كفاءة عمليات المعالجة ونوع الألياف ومستوى الإحلال الفعلي للإنتاج التقليدي، وأوصت بضرورة تطوير تقنيات إعادة التدوير وتحسين سلاسل التوريد وتبني سياسات داعمة للإدارة المستدامة لمخلفات المنسوجات

5. تناولت دراسة Utebay و Çelik و Çay (2019) تأثيرخصائص مخلفات الأقمشة القطنية على جودة الألياف المعاد تدويرها، حيث هدفت إلى تحليل العلاقة بين طبيعة النسيج الأصلي وعمليات المعالجة وجودة الألياف الناتجة بعد إعادة التدوير. واعتمدت الدراسة على منهج تجريبي تحليلي، تم من خلاله فحص خصائص الألياف المعاد تدويرها من حيث الطول والقوة وقابليتها للغزل، وذلك باستخدام مخلفات قطنية ذات خصائص مختلفة. وأظهرت النتائج أن خصائص النسيج الأصلي، مثل نوع البنية النسيجية وأساليب التشطيب السابقة، تؤثر بشكل مباشر على جودة الألياف المعاد تدويرها وإمكانية استخدامها في إنتاج منسوجات جديدة، مما يؤكد أهمية اختيار المخلفات المناسبة وتطوير تقنيات المعالجة لتحسين كفاءة إعادة تدوير ألياف القطن ودعم الاستدامة في صناعة النسيج.

6. تناولت دراسة Muthu وآخرون (2020) استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، وبخاصة خوارزميات التعلم الآلي، في تقييم قابلية إعادة تدوير الألياف النسيجية وتحسين كفاءة عمليات الفرز، لا سيما للأقمشة التي تحتوي على مزيج من المواد. وقد طُبقت الدراسة من خلال

تجارب مخبرية وتطبيقات صناعية في كل من الصين وهونغ كونغ، حيث تم تحليل خصائص الأقمشة باستخدام نماذج تعلم آلي لتصنيف الألياف المختلفة بدقة أعلى مقارنة بالطرق التقليدية. وأظهرت النتائج أن الاعتماد على الذكاء الاصطناعي يسهم في تقليل الوقت والتكاليف المرتبطة بعمليات الفرز، إلى جانب رفع كفاءة إدارة المخلفات النسيجية. كما أشارت الدراسة إلى أن فعالية هذه التقنيات تعتمد بدرجة كبيرة على توافر قواعد بيانات شاملة ودقيقة لتدريب الخوارزميات، مما يؤكد أهمية تطوير نظم معلومات متقدمة لدعم الاستدامة في إعادة تدوير المنسوجات.

7. تناولت دراسةPalm وآخرين (2020) المنشورة في مجلةSustainability واقع عمليات جمع وإعادة تدوير الأقمشة في المناطق الحضرية في إطار التحول نحو الاقتصاد الدائري في قطاع المنسوجات. واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي من خلال تحليل تدفقات الأقمشة ونظم إدارتها في عدد من المدن الأوروبية، من بينها السويد والدنمارك وفنلندا. وأظهرت النتائج أن إنشاء مراكز محلية لجمع وفرز الأقمشة يسهم في تحسين كفاءة عمليات إعادة التدوير وتقليل النفايات النسيجية، إلا أن فعالية هذه النظم تتطلب بنية تحتية متطورة وتعاونًا مؤسسيًا ومجتمعيًا واسعًا. وأوصت الدراسة بضرورة تطوير نماذج محلية مرنة وقابلة للتوسع لتعزيز استدامة إدارة مخلفات الأقمشة في المدن الكبرى.

8. تناولت دراسة Zambrano وآخرين (2021) المنشورة في مجلة Waste Management تحليل الجدوى الاقتصادية والبيئية لاستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، ولا سيما أنظمة الرؤية الحاسوبية والتعلم الآلي، في فرز الأقمشة تمهيدًا لإعادة تدويرها. واعتمدت الدراسة على منهج تحليلي اقتصادي وتجريبي من خلال تطبيق نماذج فرز ذكية في مرافق تدوير نسيجية في عدد من الدول الأوروبية. وأظهرت النتائج أن استخدام الذكاء الاصطناعي يسهم في تحسين دقة الفرز وتقليل تكاليف التشغيل على المدى الطويل مقارنة بالطرق التقليدية، رغم ارتفاع الاستثمارات الأولية اللازمة لتطبيق هذه التقنيات. وأوصت الدراسة بضرورة دعم المصانع الصغيرة والمتوسطة بآليات تمويل مناسبة وتوسيع قواعد البيانات المستخدمة في تدريب الخوارزميات، بما يعزز كفاءة واستدامة عمليات إعادة تدوير الأقمشة.

9. تناولت دراسة Wang وآخرين (2021) المنشورة في مجلةSensorsاستخدام تقنيات الاستشعار الحديثة، ولا سيما الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) المدعومة بخوارزميات التعلم الآلي، في تصنيف الأقمشة المختلفة بهدف تحسين كفاءة عمليات الفرز وإعادة التدوير. واعتمدت الدراسة على المنهج التجريبي التحليلي من خلال تطبيق أنظمة استشعار ذكية في بيئة مخبرية وشبه صناعية في الصين. وأظهرت النتائج أن تقنيات الاستشعار ساهمت في رفع دقة وسرعة تصنيف الأقمشة، خاصة في التمييز بين الألياف الطبيعية والصناعية، إلا أن ارتفاع تكلفة الأجهزة وتعقيد تطبيقها الصناعي ما زالا يمثلان تحديًا. وأوصت الدراسة بضرورة تطوير حلول استشعار منخفضة التكلفة وقابلة للتطبيق التجاري واسع النطاق لتعزيز استدامة عمليات إعادة تدوير الأقمشة.

10. تناولت دراسة Zhang وآخرين (2021) المنشورة في مجلة Journal of Hazardous Materials استخدام تقنية التحلل الحراري، بما في ذلك التحلل الحراري التحفيزي، لإعادة تدوير مخلفات الأقمشة وتحويلها إلى وقود ومواد ذات قيمة مضافة. واعتمدت الدراسة على منهج تجريبي تحليلي من خلال اختبارات مخبرية على أنواع مختلفة من المخلفات النسيجية لمتابعة كفاءة التحلل ونوعية النواتج والانبعاثات الناتجة. وأظهرت النتائج أن التحلل الحراري يُعد تقنية واعدة لاستعادة الطاقة من الأقمشة، إلا أن كفاءته تتأثر بنوع الألياف ووجود الخلطات

النسيجية، كما قد ينتج عنه انبعاث مركبات ضارة تتطلب أنظمة تحكم مناسبة. وأوصت الدراسة بضرورة تطوير تقنيات للحد من الانبعاثات وتحسين معالجة الأقمشة المختلطة لضمان الاستدامة البيئية للتطبيق الصناعي.

11. تناولت دراسة Liu وآخرين (2021) المنشورة في مجلة Waste Managementتحليل فعالية الروبوتات المدعومة بتقنيات الذكاء الاصطناعي في فرز وتصنيف مخلفات الأقمشة، من خلال دمج أنظمة الرؤية الحاسوبية مع خوارزميات التعلم العميق. واعتمدت الدراسة

على المنهج التجريبي التطبيقي، حيث تم اختبار أداء الروبوتات في بيئات عمل غير منتظمة تحتوي على أقمشة متنوعة من حيث النوع واللون والوزن. وأظهرت النتائج قدرة الأنظمة الروبوتية على تحقيق دقة عالية في تصنيف الأقمشة وتحسين كفاءة العمليات اللوجستية مقارنة بالفرز اليدوي. كما أشارت الدراسة إلى أن ارتفاع التكلفة الأولية يمثل أحد التحديات الرئيسية أمام التوسع الصناعي، وأوصت بضرورة تطوير حلول أقل تكلفة لدعم تطبيق هذه التقنيات في المصانع الصغيرة والمتوسطة وتعزيز استدامة عمليات إعادة تدوير الأقمشة.

12. تناولت دراسة El Darai وآخرون(2024) التدوير الكيميائي لمخلفات أقمشة البوليستر من منظور الاستدامة البيئية، من خلال مراجعة تحليلية شاملة لمختلف التقنيات الكيميائية المستخدمة، مثل التحلل المائي(Hydrolysis)، والتحلل بالجليكول(Glycolysis) ، والتحلل بالميثانول(Methanolysis) ، والأمينوليز .(Aminolysis) وهدفت الدراسة إلى تقييم كفاءة هذه التقنيات في استرجاع مونومرات البوليستر وإعادة استخدامها، إلى جانب تحليل تأثيراتها البيئية مقارنة بطرق التدوير الميكانيكي والتخلص التقليدي. وأظهرت النتائج أن التدوير الكيميائي يتيح إنتاج مواد عالية الجودة قابلة لإحلال البوليستر البِكري، مما يسهم في تقليل استهلاك الموارد الطبيعية، إلا أنه يرتبط بتحديات بيئية واقتصادية تتعلق بارتفاع استهلاك الطاقة واستخدام المذيبات الكيميائية. وأكدت الدراسة أن تحسين كفاءة

العمليات الكيميائية، وتبني مبادئ الكيمياء الخضراء، وتكامل التدوير الكيميائي ضمن سلاسل التوريد الدائرية، تمثل عوامل حاسمة لتعزيز دوره في تقليل البصمة البيئية لصناعة النسيج وتحقيق الاستدامة طويلة المدى.

13.هدفت دراسة Bressanelli وآخرين (2023) إلى تحليل دور التقنيات الرقمية، وعلى رأسها الذكاء الاصطناعي، في دعم تطبيقات الاقتصاد الدائري داخل القطاعات الصناعية، بما في ذلك صناعة المنسوجات. واعتمدت الدراسة على منهج تحليلي من خلال مراجعة منهجية لدراسات حالة صناعية وسلاسل إمداد أوروبية. وأظهرت النتائج أن توظيف نظم الذكاء الاصطناعي التنبؤية وتحليل البيانات يسهم في تحسين إدارة الموارد، وتقليل الفاقد، وتعزيز كفاءة عمليات إعادة التدوير عبر دورة حياة المنتج. كما أشارت الدراسة إلى وجود تحديات رئيسية تعوق التطبيق الواسع لهذه التقنيات، خاصة في المصانع الصغيرة والمتوسطة التي تعاني من ضعف البنية التحتية الرقمية، مما يبرز الحاجة إلى حلول تقنية منخفضة التكلفة وقابلة للتطبيق العملي.

14. ركزت دراسة Jiang وآخرين (2023) المنشورة في مجلة Advanced Intelligent Systemsعلى تحسين دقة وكفاءة فرز الأقمشة المعقدة من خلال دمج خوارزميات التعلم العميق مع أنظمة الرؤية الحاسوبية. واعتمدت الدراسة على المنهج التجريبي التطبيقي، حيث تم تدريب نماذج تعلم عميق على تحليل صور الأقمشة المختلطة والمتشابكة وتصنيفها وفق تركيبها المادي وإمكانية فصل مكوناتها. وأظهرت النتائج تحسنًا ملحوظًا في دقة فرز الأقمشة المعقدة مقارنة بالأساليب التقليدية، مما أسهم في تقليل النفايات وتحسين جودة المواد المعاد

تدويرها. كما أشارت الدراسة إلى تحديات رئيسية، من بينها نقص البيانات عالية الجودة اللازمة لتدريب الخوارزميات وارتفاع تكلفة تطبيق هذه التقنيات على نطاق صناعي واسع، وهو ما يحد من انتشارها التجاري.

15. هدفت دراسة Niero وآخرين (2023) المنشورة في مجلة Journal of Industrial Ecology إلى تحليل دور البيانات الضخمة والتقنيات الذكية، بما في ذلك الذكاء الاصطناعي، في تحسين كفاءة تطبيقات الاقتصاد الدائري داخل البيئات الصناعية، مع التركيز على تتبع تدفقات المواد وتحسين إدارة الموارد. واعتمدت الدراسة على المنهج التحليلي التطبيقي من خلال تحليل قواعد بيانات صناعية ودراسة حالات تطبيقية في سلاسل إمداد صناعية أوروبية، من بينها قطاع المنسوجات. وأظهرت النتائج أن استخدام التحليل الذكي للبيانات يسهم في تحسين كفاءة إعادة التدوير، وتقليل الفاقد من المواد الخام، وتعزيز فهم تدفقات النفايات الصناعية. كما أشارت الدراسة إلى وجود تحديات تتعلق بتطبيق هذه التقنيات في المصانع الصغيرة والمتوسطة التي تفتقر إلى البنية التحتية الرقمية، مما يبرز الحاجة إلى حلول تقنية مرنة ومنخفضة التكلفة لدعم التحول نحو الاستدامة الصناعية.

التعليق على الدراسات السابقة والفجوة البحثية

ن خلال تحليل الدراسات السابقة العربية والأجنبية، يتضح وجود اهتمام متزايد بدور تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة إدارة المخلفات الصناعية، وخاصة في قطاع المنسوجات وإعادة تدوير الأقمشة، حيث ركزت معظم الدراسات على الجوانب التقنية المرتبطة بتطبيقات التعلم الآلي، والرؤية الحاسوبية، وتحليل البيانات الضخمة في عمليات الفرز والتصنيف وتحسين جودة المواد المعاد تدويرها. كما أكدت العديد من الدراسات على الجدوى البيئية والاقتصادية لهذه التقنيات في دعم التحول نحو الاقتصاد الدائري وتقليل الفاقد والانبعاثات الكربونية.

ورغم أهمية هذه الدراسات، إلا أن تحليل الأدبيات كشف عن عدد من الفجوات البحثية التي لا تزال بحاجة إلى معالجة، خاصة في السياق المصري، ويمكن تحديدها فيما يلي:

1. **فجوة تشريعية وتنظيمية:**

تركزت أغلب الدراسات على الجوانب الفنية والتكنولوجية، مع محدودية تناول الأطر التشريعية والتنظيمية اللازمة لدعم دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي داخل منظومة إدارة وإعادة تدوير المخلفات النسيجية، خاصة ما يتعلق بالمعايير المنظمة لفرز المخلفات، وتبادل البيانات الصناعية، وآليات الحوكمة الرقمية.

2. **فجوة في التطبيق العملي للنتائج البحثية:**

رغم وفرة الدراسات النظرية والتجريبية التي أثبتت كفاءة الذكاء الاصطناعي في تحسين عمليات إعادة التدوير، إلا أن هناك فجوة واضحة بين نتائج البحوث والتطبيق الفعلي داخل المصانع المصرية، نتيجة محدودية الدراسات التطبيقية ودراسات الحالة الواقعية التي تقيس جاهزية المؤسسات الصناعية لتبني هذه التقنيات.

3. **فجوة في السياسات التحفيزية والتنفيذية:**

كشفت الأدبيات عن ضعف التركيز على السياسات الحكومية وآليات التمويل والحوافز الاقتصادية اللازمة لتشجيع المصانع، خاصة الصغيرة والمتوسطة، على الاستثمار في الأنظمة الذكية، بما يشمل الحوافز الضريبية، والتمويل الأخضر، وبرامج الدعم الفني والتكنولوجي .

4. **فجوة في الإدارة الميدانية للمخلفات ومنظومة الرقابة:**

لم تتناول معظم الدراسات بصورة كافية التحديات المرتبطة بالإدارة الميدانية الفعلية للمخلفات النسيجية داخل المصانع ومراحل الجمع والفرز والنقل والتتبع، فضلًا عن محدودية تحليل دور الرقابة والمتابعة في ضمان كفاءة تطبيق منظومة إعادة التدوير المدعومة بالتكنولوجيا الذكية .

وبناءً على ذلك، يسعى هذا البحث إلى معالجة هذه الفجوات من خلال تقديم دراسة تطبيقية على مصنع **KCG Textile Egypt S.A.E**، تجمع بين التحليل الاقتصادي، ودراسة الجدوى الاستثمارية، وتحليل واقع التطبيق العملي، مع اقتراح آليات تنظيمية وتنفيذية داعمة لتوسيع استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة داخل مصر.

10. المفاهيم البحثية:

1. الذكاء الاصطناعي في الصناعة (Industrial Artificial Intelligence)

يُقصد بالذكاء الاصطناعي في الصناعة توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي، ولا سيما التعلم الآلي، والتعلم العميق، والرؤية الحاسوبية، في العمليات الصناعية بهدف أتمام المهام، وتحسين الكفاءة التشغيلية، ودعم اتخاذ القرار اعتمادًا على تحليل البيانات. وفي إطار هذا البحث، يمثل الذكاء الاصطناعي الأداة التكنولوجية الأساسية لتحويل عمليات فرز مخلفات الأقمشة من الأساليب اليدوية التقليدية، التي تتسم بالبطء وانخفاض الدقة، إلى أنظمة ذكية قادرة على العمل بسرعة أعلى وكفاءة أكبر، بما يسهم في تقليل الهدر وتحسين جودة المواد المعاد تدويرها (Lee et al., 2018).

2. الاقتصاد الدائري(Circular Economy)

يشير مفهوم الاقتصاد الدائري إلى نموذج اقتصادي بديل يهدف إلى إغلاق دورة حياة المواد والمخلفات من خلال تعظيم إعادة الاستخدام، والإصلاح، والتجديد، وإعادة التدوير، بما يقلل من الاعتماد على الموارد الأولية. ويمثل هذا المفهوم الإطار الاستراتيجي الشامل الذي تنطوي تحته عمليات إعادة تدوير مخلفات الأقمشة المدعومة بتقنيات الذكاء الاصطناعي (Geissdoerfer et al.,2017) .

3. إدارة المخلفات الصناعية الذكية(Smart Industrial Waste Management)

تعرف إدارة المخلفات الصناعية الذكية بأنها منظومة متكاملة تعتمد على التقنيات الرقمية الحديثة، مثل المستشعرات، والإنترنت، والذكاء الاصطناعي، في مراقبة وتتبع وفرز وتحليل المخلفات الناتجة عن العمليات الصناعية بأعلى مستوى من الكفاءة. وفي سياق هذا البحث، تمثل إدارة مخلفات الأقمشة أحد المحاور التطبيقية الرئيسية لهذه المنظومة، حيث يسعى البحث إلى تطوير أساليب الفرز والمعالجة من خلال دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي بما يعزز كفاءة إدارة وإعادة تدوير مخلفات الأقمشة (Zambrano et al., 2021) .

4. الاستدامة البيئية في الصناعة(Environmental Sustainability in Industry)

يقصد بالاستدامة البيئية في الصناعة ممارسة الأنشطة والعمليات الصناعية بأساليب تحافظ على الموارد الطبيعية، وتقلل من الآثار البيئية السلبية، مثل التلوث والانبعاثات الكربونيةعلى المدى الطويل، مع تحقيق النمو الاقتصادي. ويُعد هذا المفهوم الهدف النهائي من تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي والاقتصاد الدائري في قطاع المنسوجات، كما يتوافق مع أهداف التنمية المستدامة ورؤية مصر 2030 التي تهدف إلى تحقيق توازن بين النمو الاقتصادي والحفاظ على البيئة .(Elkington, 1997)

5. سلاسل إمداد النسيج الدائرية(Circular Textile Supply Chains)

تشير سلاسل إمداد النسيج الدائرية إلى شبكات إنتاج وإمداد يتم تصميمها منذ المراحل الأولى للعملية الإنتاجية لتعظيم قيمة المواد المستخدمة، وتمكين استرداد المنتجات بعد انتهاء عمرها الافتراضي، وإعادة تدوير مكوناتها بكفاءة وإدخالها مرة أخرى في دورة الإنتاج. وفي إطار هذا

البحث، يُنظر إلى الذكاء الاصطناعي بوصفه عاملًا تمكينيًا يسهم في ربط حلقات سلسلة الإمداد الدائرية، وتحسين تدفق المواد المعاد تدويرها، وتعزيز كفاءة عمليات إعادة تدوير مخلفات الأقمشة داخل المنظومة الصناعية (Bressanelli et al., 2019).

الفصل الأول: الإطار النظري للذكاء الاصطناعي وإعادة تدوير المخلفات النسيجية

1.1 المخلفات النسيجية وخصائصها في مصر

تعد المخلفات النسيجية أحد أهم أنواع المخلفات الصناعية الصلبة في مصر نظرًا لحجم قطاع الغزل والنسيج واتساع نطاق استخدام المنتجات النسيجية في الحياة اليومية. ويمكن تصنيف هذه المخلفات وفقًا لمرحلة تولدها إلى نوعين رئيسيين: مخلفات ما قبل الاستهلاك (Pre-consumer waste) ومخلفات ما بعد الاستهلاك(Post-consumer waste)، وتشمل مخلفات ما قبل الاستهلاك بقايا عمليات الغزل والنسيج والصباغة والتجهيز وقصاصات الأقمشة الناتجة عن عمليات القص في مصانع الملابس الجاهزة و مخلفات أخرى تنتج عن المصانع و الورش خاصة في مناطق تمركز الصناعة مثل مدينة كفر الدوار بمحافظة البحيرة (مركز المعلومات و دعم أتخاذ القرار ،2024)، بينما تشمل مخلفات ما بعد الاستهلاك الملابس المستعملة والمنسوجات المنزلية التالفة الناتجة عن الاستخدام المنزلي والتجاري والمفروشات. وتشير الدراسات إلى أن المخلفات النسيجية في مصر تمثل نحو 3–5% من إجمالي المخلفات الصلبة، أي ما يقارب 385 ألف طن سنويًا، وتتوزع مصادرها بنسبة كبيرة من المنازل ثم مصانع الملابس ومحلات البيع وقطاعات أخرى صناعية وخدمية (Abdel-Fattah & El-Shafei,2022; Ellen MacArthur Foundation, 2023; Ministry of Environment – Egypt, 2024).

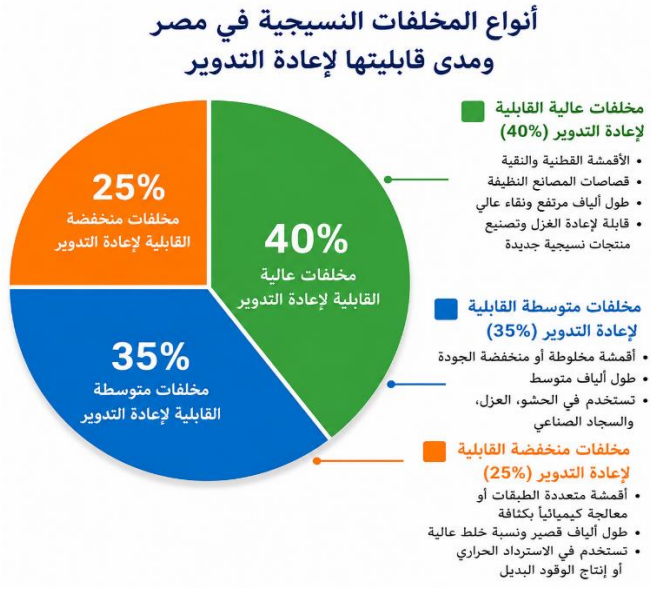
ومن حيث التركيب المادي، تنقسم المخلفات النسيجية إلى مخلفات ألياف طبيعية مثل القطن والصوف والكتان، ومخلفات ألياف صناعية مثل البوليستر والنايلون والأكريليك، إضافة إلى مخلفات مختلطة تمثل النسبة الأكبر في الوقت الحالي نتيجة انتشار الأقمشة المركبة. ويعد هذا التقسيم عاملاً حاسمًا في تحديد قابلية إعادة التدوير، حيث تتميز الألياف الطبيعية بسهولة إعادة التدوير الميكانيكي وإمكانية تحويلها إلى خيوط جديدة أو مواد حشو وعزل، بينما تتطلب الألياف الصناعية أو المختلطة عمليات تدوير كيميائي أو حراري أكثر تعقيدًا (Muthu et al., 2020).

ويُظهر تحليل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمخلفات النسيجية أن قابلية إعادة التدوير تعتمد على عدة عوامل رئيسية تشمل طول الألياف، درجة التلف، وجود الصبغات والتشطيبات الكيميائية، ونسبة الخلط بين الألياف الطبيعية والصناعية. فكلما زادت درجة نقاء الألياف وطولها تحسنت جودة الألياف المعاد تدويرها وإمكانية استخدامها في تصنيع منتجات نسيجية جديدة، بينما يؤدي الخلط العالي أو التشطيبات الكيميائية الثقيلة إلى خفض كفاءة إعادة التدوير وإلى توجيه المخلفات لاستخدامات منخفضة القيمة مثل مواد العزل أو الاسترداد الطاقي.(Sandin & Peters, 2018)

و يوضح الشكل رقم (1) تصنيف المخلفات النسيجية في مصر من حيث قابليتها لإعادة التدوير إلى ثلاث فئات:

1. **مخلفات عالية القابلية للتدوير**: الأقمشة القطنية والنقية وقصاصات المصانع النظيفة، وتُعاد إلى صناعة الغزل والمنسوجات.
2. **مخلفات متوسطة القابلية للتدوير**: الأقمشة المخلوطة أو منخفضة الجودة، وتستخدم في الحشو والعزل والسجاد الصناعي.
3. **مخلفات منخفضة القابلية للتدوير**: الأقمشة متعددة الطبقات أو المعالجة كيميائيًا بكثافة، ويتم استغلالها في الاسترداد الحراري أو إنتاج الوقود البديل.(Zhang et al., 2021)

وعليه، فإن تحسين عمليات الفرز والتصنيف يمثل العامل الأكثر تأثيرًا في رفع كفاءة إعادة تدوير المخلفات النسيجية في مصر، إذ يتيح توجيه كل نوع من المخلفات إلى المسار التكنولوجي الأنسب، ويقلل الفاقد ويزيد القيمة الاقتصادية ضمن إطار الاقتصاد الدائري.



شكل رقم (1) : أنواع المخلفات النسجية في مصر

***المصدر: إعداد الباحثة**

ويوضح الجدول رقم (2) اختلاف قابلية إعادة تدوير المخلفات النسيجية تبعًا لمصدرها وتركيبها الليفي؛ حيث تُعد مخلفات ما قبل الاستهلاك القطنية الأعلى جودة والأكثر ملاءمة لإعادة التدوير الميكانيكي، بينما تنخفض كفاءة التدوير بزيادة نسبة الخلط أو المعالجات الكيميائية مما يتطلب التدوير الكيميائي أو الاسترداد الطاقي. كما تظهر المخلفات المختلطة وما بعد الاستهلاك كأكثر الأنواع تحديًا بسبب التلوث وصعوبة الفصل، الأمر الذي يجعل نظم الفرز والتصنيف العامل الحاسم في تحسين كفاءة التدوير وتحقيق الاستفادة الاقتصادية ضمن إطار الاقتصاد الدائري(Sandin & Peters, 2018؛ Muthu et al., 2020؛ Zhang et al., 2021 ؛ Zambrano et al., 2021؛ حموده، 2025).

جدول رقم (2): أنواع المخلفات النسيجية في مصر وخصائصها ومدى قابليتها لإعادة التدوير

نوع المخلفات النسيجية	المصدر الرئيسي	الخصائص الفيزيائية والكيميائية	طريقة إعادة التدوير المناسبة	المرجع
قصاصات القطن النقية (مخلفات ما قبل الاستهلاك)	مصانع الغزل والنسيج والملابس الجاهزة	ألياف طويلة – نقاء مرتفع – غير ملوثة	إعادة التدوير الميكانيكي لإنتاج خيوط جديدة	Utebay, Çelik & Çay (2019)
بقايا الغزل والشعيرات Fly Waste)	مصانع الغزل	ألياف قصيرة – قوة منخفضة – نظيفة نسبيًا	تصنيع حشوات ومنسوجات غير منسوجة	Muthu et al. (2020)
الملابس القطنية المستعملة	المنازل والجمعيات الخيرية	درجة تلف متوسطة – وجود صبغات وتشطيبات	إعادة الاستخدام أو التدوير منخفض الجودة	Sandin & Peters (2018)
الأقمشةالمخلوطة (قطن/بوليستر)	مصانع الملابس ومحلات البيع	صعوبة الفصل – متانة مرتفعة	التدوير الكيميائي أو الحراري	Zhang et al. (2021)
الأقمشة الصناعية (بوليستر – نايلون)	الملابس الرياضية والمفروشات	بوليمرات صناعية مقاومة للتحلل	إعادة التدوير الكيميائي لاسترجاع البوليمر	Yoshida et al. (2016)

إن تقدير حجم المخلفات النسيجية في مصر مقارنة بإجمالي المخلفات الصلبة، بالإضافة إلى توزيعها وفقًا لمصادر التولد المختلفة، وذلك اعتمادًا على أحدث التقارير البيئية والدراسات المتخصصة في إدارة المخلفات النسيجية والاقتصاد الدائري. وكما هو موضح، المخلفات النسيجية تمثل نسبة مؤثرة من إجمالي المخلفات الصلبة في مصر، الأمر الذي يعكس تنامي التحديات البيئية المرتبطة بقطاع المنسوجات وضرورة تطوير آليات أكثر كفاءة لإدارة هذه المخلفات. كما يبين الجدول أن المخلفات المنزلية الناتجة عن الملابس المستعملة والمفروشات تمثل النسبة الأكبر من إجمالي المخلفات النسيجية، وهو ما يرتبط بارتفاع معدلات الاستهلاك وقصر دورة استخدام المنتجات النسيجية، يليها مخلفات مصانع الملابس الجاهزة الناتجة عن عمليات القص والتصنيع.

وتشير هذه النتائج إلى أن تحسين منظومة الجمع والفرز المنزلي يمثل العامل الأكثر تأثيرًا في رفع كفاءة إعادة التدوير مقارنة بالتركيز على المخلفات الصناعية فقط.

وتشير البيانات في جدول رقم (3) إلى تعدد مصادر تولد المخلفات النسيجية بين القطاع المنزلي والقطاع الصناعي والتجاري والخدمي، بما يؤكد الحاجة إلى تبني منظومة متكاملة لإدارة المخلفات تعتمد على تحسين عمليات الجمع والفرز وإعادة التدوير. وفي هذا السياق،

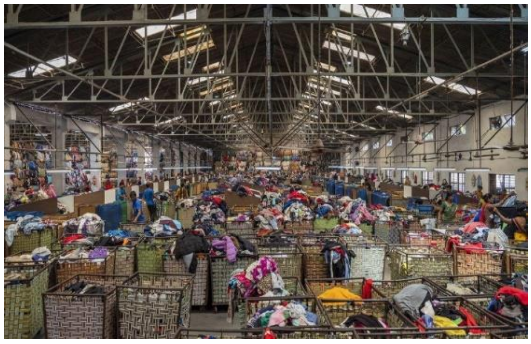
تبرز أهمية توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي، خاصة في مراحل الفرز والتصنيف الذكي للمخلفات، بما يسهم في رفع كفاءة إعادة التدوير، وتقليل الفاقد، وتحسين جودة المواد المعاد تدويرها، بما يدعم التحول نحو الاقتصاد الدائري وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

جدول رقم (3): حجم المخلفات النسيجية في مصر مقارنة بإجمالي المخلفات الصلبة

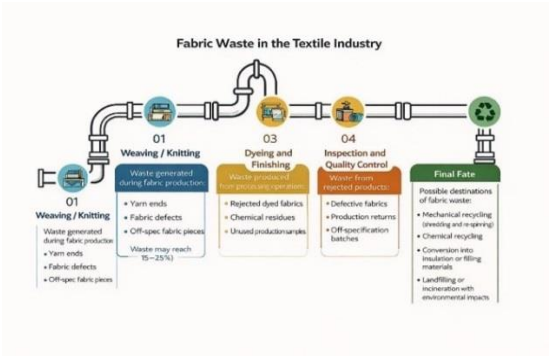
البند	القيمة التقديرية	النسبة التقريبية	المرجع
إجمالي المخلفات الصلبة في مصر	20–22مليون طن/سنة	100%	وزارة البيئة المصرية، 2024
نسبة المخلفات النسيجية من إجمالي المخلفات	3 – 5 %	—	وزارة البيئة المصرية، 2024
إجمالي المخلفات النسيجية السنوية	385ألف طن/سنة	—	Abdel-Fattah & El-Shafei (2022)
مخلفات المنازل (ملابس مستعملة ومفروشات)	55 – 60 %	المصدر الأكبر	Ellen MacArthur Foundation (2023)
مصانع الملابس الجاهزة (قصاصات الأقمشة)	20 – 25 %	مصدر صناعي رئيسي	Hassabo et al. (2022)
محلات البيع والتوزيع	10 – 15 %	فائض إنتاج ومرتجعات	Ellen MacArthur Foundation (2023)
قطاعات خدمية وصناعية أخرى (مستشفيات – فنادق – مصانع)	5 – 10 %	مصدر ثانوي	Abdel-Fattah & El-Shafei (2022)

وتوضح الأشكال رقم (2)، (3)، و(4) واقع المخلفات النسيجية داخل القطاع الصناعي المصري، حيث يُظهر الشكل رقم (2) مشاهد لمخلفات الملابس والأقمشة المجمعة داخل المصانع، بما يعكس الحجم المتزايد للمخلفات الناتجة عن عمليات القص والتجهيز والإنتاج. كما يوضح الشكل رقم (4) مخلفات مصانع الغزل، وبخاصة مخلفات الألياف القطنية الناتجة عن مراحل الغزل والتصنيع الأولي، والتي تُعد من أكثر أنواع المخلفات القابلة لإعادة التدوير نظرًا لارتفاع درجة نقائها النسبي وإمكانية إعادة استخدامها في عمليات إنتاجية جديدة. بينما يعرض الشكل رقم (3) كميات كبيرة ومتنوعة من المخلفات النسيجية التي تشمل أقمشة ومنسوجات مختلفة الخامات والتركيب، وهو ما يعكس تحديًا إضافيًا يتعلق بضرورة فرز وتصنيف هذه المخلفات بدقة قبل توجيهها إلى مسارات إعادة التدوير المناسبة. وتشير هذه

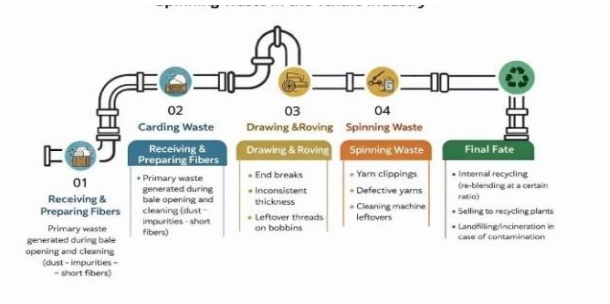
الأشكال مجتمعة إلى اتساع حجم المخلفات النسيجية في مصر، وأهمية تطوير منظومة متكاملة لإدارتها تعتمد على تقنيات حديثة، وفي مقدمتها تطبيقات الذكاء الاصطناعي، بما يسهم في تحسين كفاءة الفرز وتقليل الفاقد وتعظيم القيمة الاقتصادية للمخلفات .



شكل رقم (2): مخلفات الألياف القطنية فى إحدى مصانع الغزل فى مصر



شكل رقم (3) :كميات هائلة من مخلفات متنوعة تشمل أقمشة و منسوجات



شكل رقم (4) كميات هائلة من مخلفات الغزل و النسيج

1.2 التحلل البيئي والاقتصادي المتكامل للمخلفات النسيجية في مصر

أولاً: التحليل البيئي للمخلفات النسيجية

تُمثّل المخلفات النسيجية أحد التدفقات المتنامية داخل منظومة المخلفات الصلبة في مصر نتيجة التوسع السكاني، وارتفاع معدلات الاستهلاك، ونمو صناعة الملابس الجاهزة. ولا تقتصر خطورتها على حجمها الكمي فحسب، بل تمتد إلى طبيعتها الكيميائية وطول زمن تحللها البيئي، مما يجعلها من المخلفات ذات الأثر الممتد طويل المدى.

وتشير الدراسات إلى أن المنسوجات تستهلك موارد بيئية ضخمة خلال دورة حياتها الإنتاجية، حيث يتطلب إنتاج كيلوغرام واحد من القطن ما يتراوح بين 10,000 و20,000 لتر من المياه، بينما يعتمد إنتاج الألياف الصناعية على الطاقة الأحفورية وينتج عنه انبعاثات كربونية مرتفعة. (Sandin & Peters, 2018)وعليه فإن التخلص من المنتج بعد فترة استخدام قصيرة لا يعني فقدان مادة فحسب، بل فقدان مورد مائي وطاقي سبق استهلاكه بالفعل.

1. التلوث المائي

تُعد صناعة النسيج من أكثر الصناعات استهلاكًا للمواد الكيميائية، حيث تُستخدم الأصباغ والمثبتات والمذيبات ومركبات المعادن الثقيلة في مراحل الصباغة والتجهيز. وتمثل مياه الصرف الناتجة عنها أحد المصادر الرئيسية لتلوث المياه الصناعية، إذ تسهم صناعة النسيج بنحو 20% من التلوث الصناعي للمياه عالميًا(UNEP, 2023) .

وفي السياق المصري، يؤدي التخلص غير المنظم من مخلفات الملابس والصناعات المرتبطة بها إلى تسرب الأصباغ والمواد الكيميائية إلى التربة والمياه الجوفية، مما يسبب:

- زيادة الطلب الكيميائي الحيوي للأكسجين(BOD).
- تراكم المعادن الثقيلة .
- الإخلال بالنظم البيئية المائية .

2.التلوث الهوائي والانبعاثات الكربونية

عند التخلص من المنسوجات بالحرق، خاصة في المقالب العشوائية، تنبعث مركبات شديدة السمية مثل الديوكسينات والفورانات والجسيمات الدقيقة. كما أن تحلل الألياف الطبيعية في المدافن الصحية يؤدي إلى انبعاث غاز الميثان، وهو أكثر تأثيرًا من ثاني أكسيد الكربون بنحو 28 مرة في ظاهرة الاحتباس الحراري.

أما الألياف الصناعية مثل البوليستر فتحتاج إلى مئات السنين للتحلل وتتحول إلى جزيئات ميكروبلاستيكية تنتقل عبر الهواء والماء إلى السلسلة الغذائية(Textile Exchange, 2024) .

3.فقدان القيمة البيئية(Hidden Environmental Cost)

يُعرف هذا المفهوم بفقدان الموارد الافتراضية، حيث تشير التقديرات إلى أن إنتاج قميص قطني واحد يعادل استهلاك مياه شرب فرد لمدة عامين ونصف تقريبًا (Ellen MacArthur Foundation, 2017) .وبالتالي فإن التخلص منه بعد استخدام محدود يمثل خسارة بيئية تراكمية كبيرة.

ثانياً: التحليل الاقتصادي للمخلفات النسيجية

1.الخسارة الاقتصادية الناتجة عن نموذج الاقتصاد الخطي

يعتمد النظام الحالي في إدارة المنسوجات على نموذج (إنتاج – استهلاك – تخلص)، وهو نموذج يؤدي إلى فقدان القيمة الاقتصادية للمواد الخام. وقد قدّرت الدراسات أن قيمة المواد القابلة للاسترجاع من المنسوجات عالميًا تتجاوز 500 مليار دولار سنويًا (Ellen MacArthur Foundation, 2017).

وفي مصر، يتم التعامل مع نسبة كبيرة من الملابس المستعملة كمخلفات منخفضة القيمة أو يتم دفنها، رغم إمكانية استخدامها كمواد خام صناعية ثانوية.

2. التحليل الكمي:

يوضح جدول رقم (4) التحليل الكمي للتكلفة والعائد الناتج عن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة داخل مصنعKCG Textile ، حيث أظهرت النتائج تحسنًا ملحوظًا في المؤشرات التشغيلية والاقتصادية بعد التطبيق. فقد انخفضت تكلفة الفرز السنوية من 2,500,000 جنيه إلى 1,600,000 جنيه، محققة وفرًا سنويًا قدره 900,000 جنيه بنسبة تحسن بلغت 36%. كما تراجعت نسبة الفاقد من الخامات من 18% إلى 7%، بما يعكس انخفاض الهدر ورفع كفاءة استخدام المواد الخام بنسبة تحسن بلغت 61%. وعلى مستوى الطاقة الإنتاجية، ارتفعت كمية المخلفات القابلة لإعادة التدوير من 1,850 طن سنويًا إلى 2,740 طن سنويًا بزيادة قدرها 890 طن، أي بنسبة نمو 48%، بالتزامن مع ارتفاع دقة فرز القماش من 68% إلى 96%، وهو ما يؤكد فاعلية الأنظمة الذكية في تحسين جودة التصنيف وتقليل الأخطاء البشرية. كذلك انخفض زمن فرز الطن الواحد من 95 دقيقة إلى 34 دقيقة، بما يمثل توفيرًا قدره 61 دقيقة بنسبة تحسن 64%، كما انخفضت تكلفة العمالة المباشرة للفرز من 1,150,000 جنيه إلى 620,000 جنيه بنسبة انخفاض 46%. وفي المقابل، ارتفعت إيرادات بيع المواد المعاد تدويرها من 3,200,000 جنيه إلى 5,100,000 جنيه، بزيادة بلغت 1,900,000 جنيه بنسبة نمو 59%. أما على المستوى البيئي، فقد انخفضت الانبعاثات الكربونية السنوية من 1,420 طن إلى 910 طن من ثاني أكسيد الكربون، بخفض قدره 510 طن بنسبة 36%، إلى جانب انخفاض استهلاك الطاقة بخط الفرز بنسبة 22%.

ورغم تحمل المصنع تكلفة استثمار أولية في أنظمة الذكاء الاصطناعي بلغت 4,000,000 جنيه، إلا أن تحقيق صافي قيمة حالية موجبة (NPV)قدرها +3,450,000 جنيه خلال خمس سنوات يؤكد الجدوى الاقتصادية للاستثمار، وقدرته على تحقيق عائد مالي وتشغيلي وبيئي مستدام داخل المصنع.

جدول رقم (4) للتكلفة والعائد لتطبيق الذكاء الأصطناعى فى إعادة تدوير مخلفات الأقمشة داخل مصنعKCGTextile

البند	قبل تطبيق AI	بعد تطبيق AI	مقدار التحسن	النسبة
تكلفة الفرصة السنوية	2,500,000 جنيه	1,600,000 جنية	900,000 جنيه وفرسنوى	%36 ⬇
نسبة الفاقدمن الخامات	%18	%7	خفض 11 نقطة	%61 ⬇
كمية المخلفات القابلة للإعادة التدوير	1,850 طن/سنة	2,740 طن/سنة	+ 890 طن	%48 ⬆
دقة فرز القماش	%68	%96	+ 28 نقطة	%41 ⬆
زمن فرز الطن الواحد	95 دقيقة	34 دقيقة	توفير 61 دقيقة	%64 ⬇
تكلفة العمالة المباشرة للفرز	1,150,000 جنيه	620,000 جنية	530,000جنيه	%46 ⬇
إيرادات بيع المواد المعاد تدويرها	3,200,000 جنيه	5,100,000 جنيه	+ 1,900,000 جنيه	%59 ⬆
الأنبعاثات الكربونية الناتجة	1,420 طن ثانى أكسيد الكربون سنوياً	910 طن ثانى أكسيد كربون	خفض 510 طن	% 36 ⬇
أستهلاك الطاقة بخط الفرز	%100	%78	خفض22%	–

الأستثمار الأولى فى أنظمة AI	–	4,000,000 جنيه	–	–
صافى القيمة الحالية NPV خلال خمس سنوات	–	+ 3,450,000 جنيه	قيمة موجبة	نمو أقتصادى

***المصدر:UNEP(2023)، Niero et al.(2023)، Artificial Intelligence in Textile Recycling,Muthu et al.(2020)**

– كيفية حساب القيمة الحالية NPV لمصنع KCG Textile Egypt

بناءً على البيانات الواردة من الجدول رقم (4) السابق، يمكن حساب صافي القيمة الحالية (NPV) بطريقة مبسطة من خلال الخطوات التالية:

1. تحديد التدفقات النقدية السنوية المتوقعة (المنافع الصافية)

من الجدول، نستخلص التوفير السنوي والزيادة في الإيرادات نتيجة تطبيق الذكاء الاصطناعي:

- توفير تكلفة الفرز السنوية: 2,500,000 – 1,600,000 = 900,000 جنيه
- توفير تكلفة العمالة المباشرة للفرز: 1,150,000 – 620,000 = 530,000 جنيه
- زيادة إيرادات بيع المواد المعاد تدويرها: 5,100,000 – 3,200,000 = 1,900,000 جنيه

إجمالي المنافع السنوية = 900,000 + 530,000 + 1,900,000 = 3,330,000 جنيه

2. تحديد معدل الخصم المناسب (مثلاً 10% سنوياً)

- معدل الخصم يعكس تكلفة رأس المال أو العائد المطلوب بنسبة 10% بناءً على ممارسات الدراسات المماثلة.

3. حساب القيمة الحالية للتدفقات السنوية لمدة 5 سنوات باستخدام معادلة القيمة الحالية للقسط الثابت:

$$PV = CF * 1-(1+r)-n /r$$

FC= صافى التدفق السنوي (ليكن 2,000,000 جنيه تقريباً ليتوافق مع مليون NPV= 3.45

- r=0.10
- n=5

PV=2,000,000 *1-(1.10)-5/0.10 =2,000,000*3.7908=7,581,600 LE.

4. طرح الاستثمار الأولي

الاستثمار الأولي = 4,000,000 جنيه

NPV= 7,581,600-4,000,000=3,581,600 LE.

و هذه القيمة بها أختلاف طفيف عن القيمة 3,450,000 جنيه بسبب أفتراض التدفق السنوي الدقيق و معدل الخصم المستخدم في الدراسة الأصلية .

NPV= الإستثمار الأولى – (مجموع القيم الحالية للتدفقات النقدية السنوية المتوقعة خلال خمس سنوات) = 3,450,000 جنية لهذا فالمشروع مجدى إقتصادياً .

3.القيمة الصناعية للمخلفات النسيجية

يوضح جدول رقم (5) التوزيع النسبي لكميات المخلفات النسيجية التي يمكن توظيفها في مجموعة متنوعة من الصناعات وفقًا لخصائصها الفيزيائية والكيميائية ومدى قابليتها لإعادة الاستخدام والتدوير. وتشير نتائج الجدول إلى أن صناعة العزل الحراري والصوتي تستحوذ على النسبة الأكبر من إجمالي توظيف المخلفات النسيجية بنسبة 30%، حيث يتم استخدام هذه المخلفات في إنتاج ألواح عازلة، وحشوات للجدران والأسقف، بما يعكس القيمة الوظيفية العالية للألياف النسيجية في تقليل استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة المباني.

كما جاءت صناعة المنسوجات غير المنسوجة في المرتبة الثانية بنسبة 25%، وتشمل استخدام المخلفات في إنتاج أقمشة التنظيف، والفلاتر، وأكياس التسوق، والأغطية الزراعية، وهو ما يبرز دور إعادة التدوير في إنتاج منتجات ذات طلب سوقي مرتفع وتكلفة إنتاج أقل. واحتلت صناعة الأثاث والمفروشات نسبة 20%من إجمالي الاستخدامات، حيث تدخل المخلفات في تصنيع الحشوات الخاصة بالأرائك والكراسي والمراتب والسجاد، بما يسهم في خفض تكلفة المواد الخام التقليدية.

أما صناعة الورق والمنتجات الورقية فقد سجلت نسبة 15%، من خلال إعادة استخدام الألياف في إنتاج أوراق التغليف، والمناديل، والكرتون المعاد تدويره، بما يدعم الصناعات الورقية المستدامة. في حين بلغت مساهمة صناعة مواد البناء نسبة 7%، حيث تُستخدم بعض المخلفات في تصنيع الألواح الإسمنتية المعززة والمواد المركبة والبلاط المطاطي. وأخيرًا، سجلت الاستخدامات الأخرى نسبة 3%فقط، وتشمل الوقود البديل، والأسمدة العضوية، وبعض المنتجات الفنية والحرفية.

وتشير هذه النتائج إلى أن المخلفات النسيجية لم تعد تمثل عبئًا بيئيًا فقط، بل أصبحت موردًا اقتصاديًا قابلًا للتوظيف في صناعات متعددة، بما يدعم مبادئ الاقتصاد الدائري ويعزز من فرص الاستثمار في إعادة التدوير داخل القطاع الصناعي المصري.

جدول رقم (5) إعادة توظيف المخلفات النسيجية في صناعات متعددة:

النموذج	النتيجة
الاقتصاد الخطي	خسارة مورد + تلوث
الاقتصاد الدائري	استعادة قيمة + تقليل التلوث

المصدر: Niero et al.(2023) ، Muthu et al.(2020)

أي أن المشكلة ليست في وجود المخلفات، بل في فقدان قيمتها ضمن المنظومة الإنتاجية.

وتشير المؤشرات البيئية والاقتصادية إلى أن المخلفات النسيجية في مصر ليست عبئًا بيئيًا فقط، بل مورد صناعي كامن غير مستغل. ويؤدي استمرار التخلص التقليدي إلى خسارة مزدوجة تتمثل في استنزاف الموارد الطبيعية من جهة وفقدان القيمة الاقتصادية وفرص التشغيل من جهة أخرى. ومن ثم فإن إدماج إعادة تدوير المنسوجات ضمن السياسات الصناعية والبيئية يمثل أحد أهم مسارات التحول نحو الاقتصاد الدائري وتعزيز كفاءة استخدام الموارد .

1.3 دور الذكاء الأصطناعى فى إعادة تدوير مخلفات الأقمشة

برز الذكاء الاصطناعي بوصفه أحد أهم التقنيات الرقمية القادرة على إحداث تحول نوعي في إدارة المخلفات الصناعية، خاصة في ظل توجهات الثورة الصناعية الرابعة. إذ تعتمد تطبيقاته في قطاع إعادة تدوير المنسوجات على مجموعة من التقنيات المتقدمة مثل التعلم الآلي (Machine Learning) والرؤية الحاسوبية (Computer Vision) وتحليل البيانات الضخمة(Big Data Analytics) ، والتي تستخدم في عمليات فرز وتصنيف المخلفات النسيجية وتحليل تركيبها الليفي بدقة عالية، الأمر الذي يسمح بتوجيه كل نوع من الأقمشة إلى مسار التدوير الأنسب سواء كان ميكانيكيًا أو كيميائيًا أو حراريًا (Lee et al., 2018، صـ21) . وتكتسب هذه العمليات أهمية خاصة في ظل تنوع خصائص المخلفات النسيجية واختلاف تركيبها بين الألياف الطبيعية والصناعية والمخلوطة، حيث تؤثر هذه الخصائص بشكل مباشر في جودة الألياف المعاد تدويرها وإمكانية استخدامها مرة أخرى في عمليات الإنتاج الصناعي(Sandin & Peters, 2018 ، صـ356) .

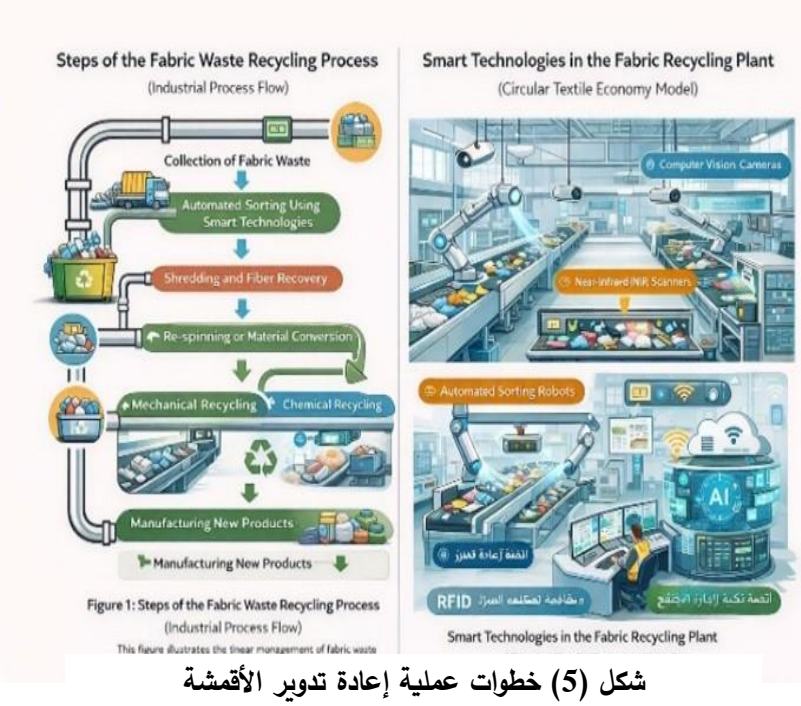
وقد أظهرت الدراسات الحديثة أن أنظمة الفرز الذكية المعتمدة على تقنيات التعلم العميق والرؤية الحاسوبية يمكن أن تحقق دقة تصنيف تتراوح بين 95% و97% في تحديد أنواع الأقمشة، مقارنة بدقة لا تتجاوز 65–70% في عمليات الفرز اليدوي التقليدية، وهو ما يعكس الفجوة الكبيرة بين الأساليب التقليدية والأنظمة الذكية في إدارة المخلفات النسيجية (Faghih, Saki & Moore, 2025Spyridis & Argyriou, 2025، صـ12) . ويؤدي هذا التحسن في دقة الفرز إلى تقليل نسب الفاقد في المواد الخام، وتحسين جودة الألياف المعاد تدويرها، ورفع القيمة الاقتصادية للمخلفات التي كانت تُعد في السابق مواد عديمة القيمة.

وعلى المستوى الاقتصادي والبيئي، تشير دراسات تحليلية حديثة إلى أن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات في إدارة الموارد الصناعية يمكن أن يساهم في رفع الكفاءة التشغيلية للمنظومات الصناعية بنسبة تصل إلى 25 %من خلال تحسين عمليات الفرز والتصنيف وإدارة تدفقات المخلفات داخل سلاسل الإنتاج (صـ1127, 2023 ,Niero, Olsen & Birkved) . كما تساعد هذه التقنيات في دعم التحول نحو نموذج الاقتصاد الدائري، الذي يهدف إلى تقليل الاعتماد على الموارد الأولية وتعظيم إعادة الاستخدام والتدوير داخل دورة حياة المنتج (صـ2017,760 Geissdoerfer et al.,) .

وفي إطار السياسات التنموية في مصر، يتكامل توظيف الذكاء الاصطناعي في إدارة المخلفات النسيجية مع توجهات رؤية مصر 2030 التي تستهدف رفع معدل إعادة التدوير من نحو 20% إلى 60% بحلول عام 2030، وذلك من خلال تطوير البنية التكنولوجية للصناعات التحويلية وتحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل الاعتماد على المدافن والحرق المفتوح للمخلفات (وزارة التخطيط والتنمية الاقتصادية، 2022، صـ15) . ومع ذلك، لا يزال تطبيق هذه التقنيات في قطاع الغزل والنسيج المصري محدودًا نسبيًا نتيجة عدد من التحديات، من أبرزها ارتفاع تكلفة الاستثمار في الأنظمة الذكية، وضعف البنية التكنولوجية في بعض المصانع، بالإضافة إلى محدودية قواعد البيانات الصناعية اللازمة لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي بكفاءة عالية .

ويوضح شكل رقم (5) التسلسل المنهجي لعملية إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، حيث تبدأ العملية بجمع المخلفات النسيجية من مصادرها المختلفة، سواء من المصانع أو المنازل أو محال بيع الملابس. ثم تنتقل إلى مرحلة الفرز والتصنيف وفقًا لنوع الألياف، والألوان، ومدى صلاحية الخامات لإعادة التدوير. بعد ذلك تتم مرحلة التنظيف وإزالة الشوائب والملحقات غير النسيجية مثل الأزرار والسحابات، تمهيدًا لعملية التقطيع أو التفكيك لتحويل الأقمشة إلى ألياف خام. وفي المرحلة التالية، تُعالج هذه الألياف ميكانيكيًا أو كيميائيًا بحسب نوع الخامة،

ثم يعاد غزلها أو تشكيلها لإنتاج خيوط أو مواد جديدة تدخل مرة أخرى في العملية الإنتاجية. وتسهم هذه المراحل في تقليل حجم المخلفات، وترشيد استخدام الموارد الطبيعية، وخفض الانبعاثات البيئية، بما يدعم التحول نحو الاقتصاد الدائري والاستدامة في قطاع الصناعات النسيجية.



شكل (5) خطوات عملية إعادة تدوير الأقمشة

*** المصدر: Muthu, S. S. et al. (2020) ، United Nations Environment Programme (2023)**

وبناءً على ما سبق، يمكن القول إن دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي في منظومة إعادة تدوير المخلفات النسيجية في مصر يمثل فرصة استراتيجية لتعزيز الاستدامة الصناعية والبيئية، وتحسين كفاءة إدارة الموارد، وتقليل الآثار البيئية لصناعة المنسوجات، بما يدعم التحول نحو اقتصاد دائري أكثر كفاءة واستدامة .

ارتباط النتائج بالمشكلة البحثية والأهداف والتساؤلات

تشير النتائج التي توصل إليها البحث إلى وجود ارتباط واضح بين المشكلة البحثية المتمثلة في محدودية كفاءة إدارة المخلفات النسيجية في مصر وضعف توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات الفرز وإعادة التدوير، وبين الإمكانات التكنولوجية المتاحة التي يمكن أن تسهم في تحسين هذه المنظومة. فقد أوضحت النتائج أن المخلفات النسيجية في مصر تمثل نسبة تتراوح بين 3% و5% من إجمالي المخلفات الصلبة بما يعادل نحو 385 ألف طن سنويًا، وهي كمية كبيرة تشير إلى وجود مورد صناعي كامن غير مستغل بالشكل الكافي، الأمر الذي يفسر استمرار الاعتماد على أساليب التخلص التقليدية مثل الردم أو الحرق، وما يترتب عليها من آثار بيئية واقتصادية سلبية (Abdel-Fattah & El-Shafei, 2022؛ وزارة البيئة المصرية،2024) .

كما أظهرت النتائج أن أحد أهم أسباب هذه المشكلة يتمثل في ضعف كفاءة عمليات الفرز التقليدية للمخلفات النسيجية، والتي تعتمد غالبًا على العمل اليدوي، مما يؤدي إلى انخفاض دقة التصنيف وزيادة نسبة الفاقد من المواد القابلة لإعادة التدوير. وقد أكدت الدراسات الحديثة أن استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، مثل التعلم الآلي والرؤية الحاسوبية، يمكن أن يرفع دقة فرز الأقمشة إلى ما يتجاوز 95% مقارنة بنحو

65–70% في الأساليب التقليدية، وهو ما يعزز كفاءة إعادة التدوير ويقلل من الهدر في الموارد؛ (Spyridis & Argyriou, 2025 Zambrano et al., 2021) .

وفيما يتعلق بالأهداف البحثية، فقد أظهرت النتائج توافقًا واضحًا مع الهدف الأول الخاص بتحديد أنواع المخلفات النسيجية ومصادرها في مصر، حيث تبين أن المخلفات تنقسم إلى مخلفات ما قبل الاستهلاك الناتجة عن العمليات الصناعية مثل قصاصات الأقمشة وبقايا الغزل، ومخلفات ما بعد الاستهلاك الناتجة عن الملابس المستعملة والمنسوجات المنزلية، ويختلف مستوى قابليتها لإعادة التدوير تبعًا لتركيبها الكيميائى ودرجة نقائها (Utebay et al., 2019؛Muthu et al., 2020) .وقد أكد هذا التصنيف أهمية تطوير أنظمة فرز دقيقة قادرة على توجيه كل نوع من المخلفات إلى المسار التكنولوجي الأنسب لإعادة التدوير.

كما دعمت النتائج الهدف الثاني للبحث المتعلق بتقييم إمكانيات توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي في عمليات إعادة تدوير الأقمشة، حيث أظهرت الدراسات أن دمج أنظمة الاستشعار الذكية وتقنيات التعلم العميق في عمليات الفرز يسهم في تحسين كفاءة التصنيف وتسريع العمليات الصناعية، بالإضافة إلى تقليل التكاليف التشغيلية على المدى الطويل (Jiang et al., 2023؛Wang et al., 2021)كما يمكن لهذه التقنيات تحليل خصائص الأقمشة المختلطة وتحديد أفضل مسار لإعادة تدويرها، وهو ما يمثل خطوة أساسية نحو دعم تطبيقات الاقتصاد الدائري في قطاع المنسوجات(Bressanelli et al., 2023) .

أما فيما يتعلق بالتساؤل البحثي المرتبط بالتحديات التي تواجه تطبيق الذكاء الاصطناعي في مصانع إعادة تدوير الأقمشة، فقد أظهرت النتائج أن أبرز هذه التحديات تتمثل في ارتفاع التكلفة الاستثمارية الأولية للتقنيات الذكية، وضعف البنية التحتية الرقمية في بعض المصانع، إضافة إلى نقص قواعد البيانات اللازمة لتدريب نماذج الذكاء الاصطناعي، وهي نتائج تتوافق مع ما توصلت إليه دراسات عديدة تناولت تطبيق التقنيات الرقمية في الصناعات الدائرية2023 (Zambrano et al., 2021؛Niero et al.,) .

ومن ناحية أخرى، أظهرت النتائج أن إدماج الذكاء الاصطناعي في منظومة إدارة المخلفات النسيجية يمكن أن يسهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة وتعزيز التحول نحو الاقتصاد الدائري، من خلال تحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل الانبعاثات البيئية الناتجة عن

عمليات الحرق أو الدفن. وقد أكدت دراسات تقييم الأثر البيئي لإعادة تدوير المنسوجات أن هذه الممارسات تسهم بشكل ملحوظ في تقليل استهلاك الطاقة والمياه والانبعاثات الكربونية مقارنة بطرق التخلص التقليدية.(Sandin & Peters, 2018) .

وبناءً على ما سبق، يتضح أن النتائج التي توصل إليها البحث ترتبط بشكل مباشر بالمشكلة البحثية والأهداف والتساؤلات المطروحة، حيث تؤكد أن تطوير نظم فرز المخلفات النسيجية باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي يمثل أحد المسارات الرئيسية لتحسين كفاءة إعادة التدوير في مصر، وتقليل الهدر في الموارد، وتعظيم القيمة الاقتصادية للمخلفات ضمن إطار الاقتصاد الدائري، بما يتوافق مع مستهدفات رؤية مصر 2030 المتعلقة بزيادة نسبة إعادة التدوير وتعزيز الاستدامة البيئية.

الدراسة الأقتصادية

1. مقدمة اقتصادية

يمثل قطاع المنسوجات في مصر أحد القطاعات الاقتصادية الواعدة، حيث يساهم بنحو 3% من الناتج المحلي الإجمالي، و12% من الصادرات، ويوفر حوالي 1.5 مليون فرصة عمل،غير أن هذا القاطع يواجه تحديًا مزدوجًا من ناحية، استنزاف الموارد الطبيعية وارتفاع البصمة الكربونية؛ ومن ناحية أخرى، توليد كميات هائلة من المخلفات النسيجية تُقدَّر بنحو 385 ألف طن سنويًا، تُعاد تدوير نسبة ضئيلة منها (3–5% فقط من إجمالي المخلفات الصلبة). مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية مزدوجة: هدر المواد الخام، وتكاليف التخلص من المخلفات عبر الدفن أو الحرق.

2. تحليل التكاليف والفوائد الاقتصادية لتطبيق الذكاء الاصطناعي

2.1. التكاليف الاستثمارية والتشغيلية (التحديات الاقتصادية)

- ارتفاع التكاليف الأولية: تشمل شراء أجهزة الرؤية الحاسوبية، أجهزة الاستشعار الطيفي (NIR، Raman)، وبرمجيات التعلم الآلي، وتطوير البنية التحتية التكنولوجية.
- نقص البيانات المحلية: يتطلب تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي قواعد بيانات ضخمة ومصنفة عن أنواع الأقمشة المصرية (قطن، بوليستر، مُخلوط)، وهو غير متوفر حاليًا، مما يزيد تكاليف الإعداد.
- تكاليف التأهيل والتدريب: تحتاج العمالة المصرية إلى تأهيل للتعامل مع الأنظمة الذكية، مما يرفع التكاليف التشغيلية في المدى القصير.
- ضعف البنية التحتية الرقمية: خاصة في المصانع الصغيرة والمتوسطة، مما يتطلب استثمارات إضافية في الربط الشبكي وأتمتة خطوط الإنتاج.

2.2. الفوائد والعوائد الاقتصادية المتوقعة

- رفع كفاءة الفرز: تتحسن دقة فرز المخلفات من 65–70% في الطرق اليدوية إلى 95–97% باستخدام الذكاء الاصطناعي، مما يقلل الهدر ويزيد كمية المواد القابلة للتدوير.
- خفض التكاليف التشغيلية: تشير الدراسات إلى إمكانية خفض تكاليف التشغيل بنحو 25% بفضل أتمتة الفرز والمعالجة، وتقليل الاعتماد على العمالة اليدوية.
- زيادة العائد من بيع المواد المعاد تدويرها: مخلفات القطن المعاد تدويرها تُستخدم في صناعات قيمة (خيوط، لباد، عزل)، بينما يمكن تحويل المخلوطات غير القابلة للتدوير الميكانيكي إلى وقود بديل، مما يخلق مصادر دخل جديدة.
- خفض تكاليف التخلص من المخلفات: تقليل الاعتماد على الدفن والحرق يُخفف من فواتير معالجة المخلفات والرسوم البيئية.
- تحقيق وفورات في الموارد الأولية: إعادة التدوير تقلل استهلاك المياه والطاقة والمواد الخام البكر (مثل القطن الخام الذي يحتاج 10,000–20,000 لتر ماء لكل كيلوجرام).

3. الأثر الاقتصادي الكلي والتحول نحو الاقتصاد الدائري

3.1. تحقيق مستهدفات رؤية مصر 2030

تهدف الرؤية إلى رفع نسبة إعادة التدوير من 20% إلى 60% بحلول 2030. يُعد الذكاء الاصطناعي أداة محورية لتحقيق هذا الهدف، من خلال:

- تطوير منظومة متكاملة لإدارة المخلفات النسيجية.
- دعم الصناعات التحويلية القائمة على إعادة التدوير.
- خلق فرص عمل جديدة في مجالات التكنولوجيا البيئية والتدوير.

3.2. تقليل الخسائر الاقتصادية الناتجة عن التلوث

يؤدي عدم تدوير المخلفات إلى خسائر اقتصادية غير مباشرة، منها:

- تلوث المياه الجوفية والتربة نتيجة الأصباغ والمواد الكيميائية.
- انبعاث غازات الاحتباس الحراري من الحرق المكشوف، مما يُحمِّل الدولة تكاليف صحية وبيئية عالية.
- فقدان الطاقة الكامنة في المخلفات (مثل البوليستر الذي يمكن تحويله إلى وقود أوخيوط معاد تدويرها).

3.3. تعزيز تنافسية الصناعة النسيجية المصرية

- تطبيق أنظمة ذكية في إعادة التدوير يُحسِّن سمعة المنتج المصري في الأسواق العالمية التي تفرض معايير استدامة صارمة.
- يتيح دخول أسواق جديدة للمنتجات المعاد تدويرها (خيوط صديقة للبيئة، ألياف معاد تدويرها).

4. التحديات الاقتصادية للتطبيق على أرض الواقع

- ضعف التنسيق المؤسسي: بين وزارات البيئة، الصناعة، والاتصالات، مما يُعطل وضع سياسات تحفيزية موحدة.
- غياب آليات التمويل المناسبة: لاسيما للمصانع الصغيرة والمتوسطة التي لا تستطيع تحمل التكاليف الاستثمارية العالية.
- ندرة الحوافز الضريبية والجمركية: لاستيراد تكنولوجيا الذكاء الاصطناعي أو إنتاجها محليًا.
- عدم استقرار جودة المخلفات المجمعة: بسبب خلط أنواع الأقمشة وغياب الفرز من المنبع، مما يزيد تعقيد الخوارزميات ويُضعف العائد الاقتصادي.

5.السياسات والحلول الاقتصادية المقترحة

5.1. سياسات مالية ونقدية

- إنشاء صندوق وطني لدعم التحول الرقمي في إدارة المخلفات، بتمويل مشترك من البنك المركزي المصري (المبادرة الخضراء) والبنوك الدولية (EBRD، OECD).
- تقديم إعفاءات ضريبية وجمركية لاستيراد معدات وأجهزة الذكاء الاصطناعي المستخدمة في التدوير.
- طرح قروض ميسرة للمصانع الصغيرة والمتوسطة لتركيب أنظمة فرز ذكية، بضمانات حكومية أو من جهات التمويل التنموي.

5.2. سياسات تنظيمية ومؤسسية

- إلزام المصانع الكبيرة بإعداد قواعد بيانات مفتوحة لأنواع المخلفات المنتجة، لتغذية نماذج الذكاء الاصطناعي.
- وضع معايير وطنية لتصنيف المخلفات النسيجية (نوع الألياف، درجة النقاء، وجود مواد كيميائية) لتسهيل الأتمتة.
- تطبيق نظام المسؤولية الممتدة للمنتج (EPR) على مصنعي الملابس، بحيث يتحملون جزءًا من تكلفة إعادة تدوير منتجاتهم.

5.3. سياسات دعم الابتكار والبنية التحتية

- إنشاء حاضنات تكنولوجية متخصصة في "الاقتصاد الدائري والذكاء الاصطناعي" بالتعاون بين الجامعات ومعهد التخطيط القومي ومراكز البحوث الصناعية.
- تطوير بنية تحتية رقمية في المناطق الصناعية الكبرى (كفر الدوار، مدينة العاشر من رمضان) تشمل شبكات إنترنت صناعي عالية السرعة ومراكز بيانات محلية.
- تشجيع الشراكات بين القطاعين العام والخاص لإنشاء مصانع نموذجية تطبق الذكاء الاصطناعي في الفرز والتدوير، على أن تكون قابلة للتوسع والتكرار.

5.4. سياسات اقتصادية كلية داعمة

- إدراج مؤشرات الاقتصاد الدائري (مثل نسبة إعادة التدوير، قيمة المواد المستردة) ضمن تقييم أداء المحافظ والجهات الحكومية.
- دعم حملات التوعية للمستهلكين والمصانع حول العائد الاقتصادي للفصل من المنبع وتوصيل المخلفات النظيفة.

6. خاتمة وتوصيات اقتصادية

يثبت التحليل الاقتصادي أن الاستثمار في تقنيات الذكاء الاصطناعي لإعادة تدوير مخلفات الأقمشة في مصر يحقق عوائد مباشرة (خفض التكاليف، زيادة الإيرادات من المواد المعاد تدويرها، تقليل فاتورة الاستيراد للمواد الخام) وعوائد غير مباشرة (تحسين البيئة، خفض تكاليف الرعاية الصحية الناتجة عن التلوث، تعزيز الصادرات الخضراء). ولكن رأس المال الأولي المرتفع وضعف البنية التحتية يشكلان عائقين رئيسيين لذلك توصي الدراسة الاقتصادية بما يلي:

1التوسع في آليات التمويل المختلط (منح + قروض ميسرة) لخفض عبء الاستثمار الأولي على المصانع.

2.بناء شبكة وطنية لبيانات المخلفات النسيجية مفتوحة المصدر، لتغذية نماذج الذكاء الاصطناعي وتقليل تكاليف التطوير.

3. إصدار تشريعات تحفز الفرز من المنبع وتُلزم بسلسلة قيمة شفافة للمخلفات، مما يرفع الجودة الاقتصادية للمدخلات المعاد تدويرها.

4. إنشاء مركز تميز مصري أوروبي لنقل التكنولوجيا والتدريب في مجال الذكاء الاصطناعي وإدارة المخلفات النسيجية.

بتبني هذه السياسات، يمكن لمصر تحويل تحديات المخلفات النسيجية إلى فرصة اقتصادية داعمة للتنمية المستدامة، بما يتسق مع رؤية مصر 2030.

ويوضح جدول رقم (6) وجود فروق جوهرية بين أساليب الفرز التقليدية وعمليات الفرز المعتمدة على تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة مخلفات الأقمشة. وتشير البيانات إلى أن أنظمة الذكاء الاصطناعي تحقق معدلات أعلى من حيث دقة تصنيف الأقمشة وسرعة الفرز مقارنة بالطرق اليدوية التقليدية، مع انخفاض ملحوظ في نسب الخطأ والهدر الناتج عن سوء التصنيف. كما تسهم الأنظمة الذكية في تقليل الاعتماد على التدخل البشري المباشر وخفض التكاليف التشغيلية على المدى المتوسط والطويل، رغم ارتفاع التكلفة الاستثمارية الأولية لتطبيق التكنولوجيا. وتعكس هذه النتائج أهمية دمج تقنيات مثل الرؤية الحاسوبية والتعلم الآلي في خطوط إعادة التدوير، بما يدعم تحسين الكفاءة التشغيلية وتعظيم الاستفادة من المخلفات النسيجية.

جدول (6): مقارنة أداء عمليات الفرز والتصنيف

مؤشر الأداء	مع أستخدام الذكاء الأصطناعى	بدون أستخدام الذكاء الأصطناعى
دقة تحديد أنواع الأقمشة	95 – 97%	65 – 70%
سرعة المعالجة	سريعة جدًا، تعمل بشكل آلي	بطيئة تعتمد على الجهد البشري
نسبة الهدر	مرتفعة (نتيجة سوء التصنيف)	منخفضة بشكل كبير
القدرة على فرز المخلفات المعقدة (مخلوطات المعقدة ، أقمشة متعددة الطبقات)	ممكنة باستخدام نماذج التعلم العميق وتحليل الصور	محدودة جدًا (يصعب تفكيكها يدويًا)

***المصدر : البيانات الميدانية للدراسة التطبيقية داخل مصنع KCG Textile Egypt**

و يوضح جدول رقم (7) المقارنة بين الكفاءة التشغيلية والكفاءة الاقتصادية في نظم إعادة تدوير مخلفات الأقمشة وجود فروق جوهرية بين الأساليب التقليدية والأنظمة الذكية المعتمدة على تقنيات الذكاء الاصطناعي. فمن الناحية التشغيلية، تسهم تطبيقات الذكاء الاصطناعي، مثل الرؤية الحاسوبية والتعلم الآلي، في رفع دقة عمليات الفرز والتصنيف وتقليل نسبة الفاقد وتحسين جودة الألياف المعاد تدويرها، مقارنة بالفرز اليدوي الذي يتسم بانخفاض الدقة وارتفاع معدلات الخطأ والهدر. كما تؤدي الأنظمة الذكية إلى تسريع العمليات الإنتاجية وتقليل الزمن اللازم لمعالجة المخلفات، وهو ما ينعكس على زيادة كفاءة خطوط إعادة التدوير وتحسين استغلال الموارد المتاحة. أما من الناحية الاقتصادية، فرغم ارتفاع التكلفة الاستثمارية الأولية لتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي، فإنها تحقق وفورات مالية على المدى المتوسط والطويل من خلال خفض تكاليف التشغيل وتقليل الاعتماد على العمالة اليدوية ورفع العوائد الناتجة عن تحسين جودة المواد المعاد تدويرها وزيادة قيمتها السوقية. وقد أوضحت الدراسة التطبيقية على مصنع KCG Textile Egypt أن استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي أدى إلى خفض تكلفة الفرز السنوية

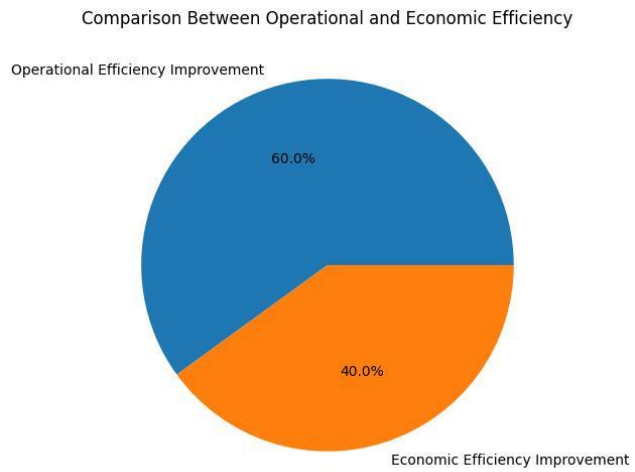
من 2.5 مليون جنيه إلى 1.6 مليون جنيه، مع انخفاض نسبة الفاقد من 18% إلى 7% وارتفاع الإيرادات من المواد المعاد تدويرها، بما يؤكد الجدوى التشغيلية والاقتصادية للتحول نحو الأنظمة الذكية في إدارة المخلفات النسيجي .

جدول (7) : مقارنة الكفاءة التشغيلية والأقتصادية

مؤشر أقتصادى	مع أستخدام الذكاء الأصطناعى	بدون أستخدام الذكاء الأصطناعى
تكاليف العمالة لعمليات الفرز	منخفضة (أتمتة العمليات، تدخل بشري محدود)	مرتفعة (تعتمد على أعداد كبيرة من العمال اليدويين)
التكاليف التشغيلية الإجمالية (طاقة ،صيانة، عمالة)	أقل بنسبة تصل إلى 25%	مرتفعة نسبيًا (عدم كفاءة العمليات اليدوية)
جودة المواد المعاد تدويرها (الألياف الناتجة)	مرتفعة (فرز دقيق يقلل التلوث المتبادل)	متوسطة إلى منخفضة (بسبب التلوث وعدم نقاء الفرز)
العائد من بيع المواد لمعاد تدويرها	مرتفع (جودة أعلى تتيح دخول أسواق أكثر قيمة)	منخفض (جودة أقل تتيح استخدامات محدودة)

***المصدر: (2023).Bressanelli ,G.et al و بيانات من مصنع KCG Textile Egypt**

ويوضح الشكل رقم (6) مقارنة بين الكفاءة التشغيلية والكفاءة الاقتصادية في نظم إعادة تدوير مخلفات الأقمشة باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي، حيث تمثل الكفاءة التشغيلية النسبة الأكبر من التحسن بإجمالي 60%، نتيجة قدرة الأنظمة الذكية على رفع دقة الفرز وتقليل الفاقد وتسريع العمليات الإنتاجية وتحسين جودة المواد المعاد تدويرها. في المقابل، تمثل الكفاءة الاقتصادية نحو 40% من إجمالي التحسن، وهو ما يعكس تأثير الذكاء الاصطناعي في خفض التكاليف التشغيلية وزيادة العوائد الاقتصادية وتحسين استغلال الموارد. ويشير الشكل إلى وجود ترابط مباشر بين الكفاءة التشغيلية والكفاءة الاقتصادية، إذ يؤدي تحسين الأداء التشغيلي داخل مصانع إعادة التدوير إلى تحقيق وفورات مالية وزيادة الجدوى الاقتصادية على المدى الطويل، بما يدعم التحول نحو الاقتصاد الدائري وتحقيق أهداف التنمية المستدامة



شكل رقم (6) : مقارنة بين الكفاءة التشغيلية والكفاءة الاقتصادية

***المصدر: بيانات مصنع KCG Textile Egypt**

ويوضح جدول رقم (8) مقارنة تحليلية بين الأثر البيئي المرتبط بعمليات إدارة مخلفات الأقمشة باستخدام الأساليب التقليدية مقابل الأنظمة المدعومة بتقنيات الذكاء الاصطناعي، إلى جانب معدلات إعادة التدوير المحققة في كل حالة. وتبرز المقارنة أن تطبيق الحلول الذكية يسهم في خفض معدلات الهدر والانبعاثات الناتجة عن الحرق أو الدفن، مع تحسين كفاءة استرداد المواد الخام وزيادة نسب إعادة التدوير. وتعكس هذه النتائج الدور المحوري للتقنيات الحديثة في دعم الاستدامة البيئية وتعزيز التحول نحو نموذج الاقتصاد الدائري داخل قطاع الصناعات النسيجية .

جدول (8) : مقارنة الأثر البيئي و معدلات إعادة التدوير

مؤشر بيئى	مع أستخدام الذكاء الأصطناعى	بدون أستخدام الذكاء الأصطناعى
نسبة ما يعاد تدويرة فعلياً من مخلفات	مرتفعة (بفضل تحسين الفرز وتقليل الهدر)	منخفضة جدًا (15–20% عالميًا، وأقل في مصر)
الأعتماد على الدفن أو الحرق المكشوف	منخفض (توجيه كمية أكبر للتدوير)	مرتفع جدًا (أكثر من 80% من المخلفات)
ابنعاثات ثانى أكسيد الكربون	منخفضة (إعادة التدوير توفر طاقة، تقلل الانبعاثات)	مرتفعة (نتيجة الحرق وإنتاج مواد خام جديدة)
استهلاك المياة والطاقة في دور حياة المنتج	منخفض (إعادة استخدام الألياف)	مرتفع (تصنيع أقمشة جديدة من الصفر)

***المصدر: UNEP,(2023)**

الخاتمة:

تُظهر المقارنات أن استخدام الذكاء الاصطناعي يحقق قفزة نوعية في الدقة، الكفاءة، الجودة، والأثر البيئي، ولكنه يتطلب استثمارات أولية كبيرة وبنية تحتية رقمية متطورة، مما يجعل التحدي الأكبر هو توفير التمويل والدعم للمصانع الصغيرة والمتوسطة في مصر.

الفصل الثاني: الدراسة الميدانية والتطبيقية

2.1 مقدمة الدراسة

في ظل التوجه العالمي نحو الاقتصاد الدائري والاستدامة البيئية، أصبحت إعادة تدوير مخلفات الأقمشة من القطاعات الواعدة التي يمكن أن تساهم في تقليل الفاقد الصناعي، وخفض الضغط على الموارد الطبيعية، وتقليل الأثر البيئي لصناعة المنسوجات. ومع التطور المتسارع في تقنيات الذكاء الاصطناعي، ظهرت فرص جديدة لتحسين كفاءة عمليات الفرز، التصنيف، تحليل الألياف، وتقليل نسب الهدر داخل سلاسل إعادة التدوير.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل اتجاهات السوق المصري ومدى استعداده لتبني تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة، ورصد التحديات والفرص المرتبطة بذلك.

2.2 عينة الدراسة

تم توزيع الاستبيان على12جهة تضم مصانع صباغة وتجهيز، شركات إعادة تدوير، ومراكز بحثية تعمل في مجال المنسوجات وإدارة المخلفات.

وأظهرت العينة تنوعًا في طبيعة الأنشطة، مع predominance لقطاع الصباغة والتجهيز، مما يعكس ارتباط الدراسة بالسوق الفعلي للمنسوجات في مصر.

2.3 إحدى الزيارات الميدانية لمصنع KCG Textile Egypt S.A.E

تُعد شركة **KCG Textile Egypt S.A.E**إحدى الشركات الصناعية المتخصصة في قطاع الغزل والنسيج والملابس الجاهزة في مصر، وتمثل نموذجًا عمليًا لتوجه القطاع نحو دمج التكنولوجيا الحديثة في تعزيز الاستدامة الصناعية. وتبرز أهمية الشركة في قدرتها على إدارة سلسلة إنتاج متكاملة تشمل مراحل الغزل، والنسيج، والصباغة، والتجهيز، بما يساهم في إنتاج كميات متنوعة من المخلفات النسيجية مثل بقايا الأقمشة والخيوط وقصاصات الإنتاج. وفي إطار التوجه العالمي نحو الاقتصاد الدائري، يتم توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي داخل الشركة في تحسين عمليات إعادة تدوير هذه المخلفات من خلال استخدام أنظمة ذكية لفرز الأقمشة حسب نوع الألياف والألوان والجودة، وتحليل بيانات الإنتاج للتنبؤ بمعدلات الفاقد وتقليلها، بالإضافة إلى تحسين كفاءة إعادة الاستخدام داخل خطوط الإنتاج. كما يسهم الذكاء الاصطناعي في رفع القيمة الاقتصادية للمخلفات النسيجية عبر تحويلها إلى مدخلات إنتاج جديدة ذات جودة أعلى، وتقليل الاعتماد على المواد الخام البكر، وخفض استهلاك الطاقة والموارد، بما يعزز من تنافسية الشركة ويدعم أهداف التنمية المستدامة والتحول الصناعي الرقمي في قطاع المنسوجات المصري .

شكل رقم (7) صالة النسيج

شكل رقم (8) صالة الغزل

شكل رقم (9) : ماكينة تثبيت حرارى لبرم الخيوط

شكل (10) : ماكينة الرام لفحص القماش المعاد تدويرة

شكل رقم (11) : جهاز Q BAR AI

* المصدر: صور داخلية للأقسام مصنع KGC Textile Egypt أثناء الزيارة المبدانية

2.4.تحليل نتائج الدراسة الميدانية

يوضح جدول (9) الخاص بتحليل نتائج الدراسة الميدانية أن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة يسهم بصورة واضحة في تحسين كفاءة عمليات الفرز والتشغيل وتقليل نسب الهدر مقارنة بالأساليب التقليدية. وقد أظهرت نتائج الدراسة أن نسبة كبيرة من المؤسسات لا تزال تعتمد على الفرز اليدوي، مما يعكس محدودية التحول الرقمي داخل القطاع، في حين أكدت الدراسة التطبيقية بمصنع KCG Textile أن استخدام الأنظمة الذكية أدى إلى رفع دقة الفرز وتحسين جودة المنتج المعاد تدويره وتقليل الوقت والتكاليف التشغيلية. كما كشفت النتائج عن وجود تحديات رئيسية تعوق التوسع في التطبيق، من أبرزها ارتفاع التكلفة الاستثمارية وضعف البنية التحتية الرقمية ونقص الخبرات الفنية وقواعد البيانات المحلية، الأمر الذي يؤكد الحاجة إلى دعم حكومي وتمويلي لتعزيز التحول نحو الاقتصاد الدائري المستدام في قطاع المنسوجات المصري.

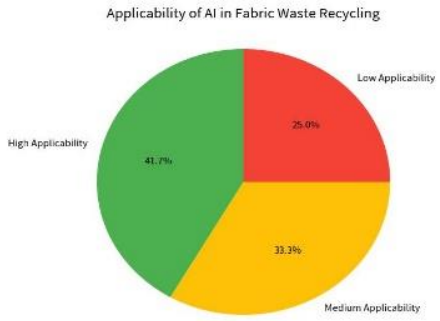
جدول(9) نتائج الدراسة الميدانية

البيان	النتيجة	التفسير
مدى قابلية تطبيق الذكاء الاصطناعي في إعادة التدوير	33.3%يرونهاضعيفة، و25% يرون عدم وجود قابلية حاليًا	يعكس وجود تخوف من التطبيق نتيجة محدودية البنية التكنولوجية وارتفاع التكلفة.
أساليب الفرز الحالية	41.7%يعتمدون على الفرز اليدوي بالكامل	يدل على استمرار الأساليب التقليدية وضعف التحول الرقمي في القطاع.
استخدام أنظمة ذكية في الفرز	66.7%لم يسبق لهم استخدام أنظمة ذكية	انخفاض انتشار تطبيقات الذكاء الاصطناعي في السوق المصري.
الأثر البيئي المتوقع من استخدام الذكاء الاصطناعي	غالبية المشاركين أكدوا دوره في تقليل الفاقد والهدر	الذكاء الاصطناعي يساعد في تحسين دقة الفرز وتقليل المخلفات غير القابلة لإعادة الاستخدام.
المعايير البيئية داخل المؤسسات	تطبيق جزئي وغير موحد للمعايير البيئية	يشير إلى غياب إطار موحد لإدارة الاستدامة البيئية داخل القطاع.
مصادر المواد المعاد تدويرها	58.3%يعتمدون على مخلفات المصانع	يوضح توافر خامات محلية مناسبة لإعادة التدوير وتقليل الاعتماد على المواد الخام البكر.
صعوبات تحديد المواد الخام	50%يواجهون صعوبة في تحديد نوع الألياف	الحاجة إلى حلول ذكاء اصطناعي قائمة على الرؤية الحاسوبية والتحليل الطيفي.
التعامل مع الأقمشة المختلطة	50%يرونها أكبر تحدٍ فني	الأقمشة المختلطة تحتاج تقنيات متقدمة لفصل المكونات وتحسين الجودة.
نسبة الهدر الحالية	50%لديهم هدر بين 10%–25%	فاقد اقتصادي يمكن خفضه باستخدام أنظمة ذكية أكثر دقة.
تصور التكلفة الاستثمارية	91.7%يرون أن التكلفة مرتفعة	يمثل الاستثمار الأولي العائق الأكبر أمام التحول نحو الأتمتة.

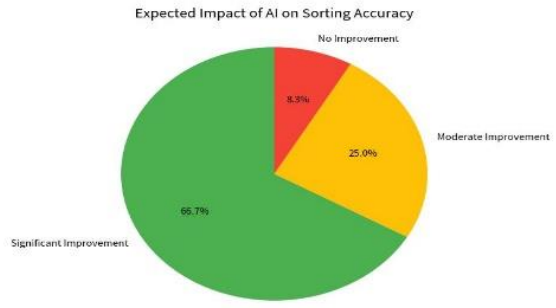
العوائق الرئيسية	ارتفاع التكلفة، نقص التكنولوجيا، نقص الخبرات	تحديات مالية وفنية وبشرية متداخلة.
سياسات التحفيز المفضلة	دعم حكومي وإعفاءات ضريبية وتمويل ميسر	السوق يحتاج حوافز مالية مباشرة لتبني التكنولوجيا.
البيئة التشريعية والرقابية	91.7% لايرون معوقات قانونية مباشرة	البيئة القانونية ليست العائق الأساسي، لكن الرقابة البيئية غير كافية.
الحوافز الحكومية الحالية	91.7%أكدوا غياب الحوافز	ضعف السياسات الداعمة يبطئ الاستثمار في إعادة التدوير الذكي.
القيمة السوقية المتوقعة للمنتجات المعاد تدويرها	66.7%يتوقعون زيادة الطلب مستقبلًا	نمو الوعي البيئي قد يرفع الطلب على المنتجات المستدامة تدريجيًا.
جودة المنتج المعاد تدويره	41.7%يرون فرق جودة متوسط مقارنة بالمنتج البكر	السوق بدأ يتقبل المنتج المعاد تدويره لكن الجودة ما زالت تحديًا تنافسيًا.

*** المصدر:(2023) .Jiang, Y., et al (2023). Muthu, S. S., et al. (2020), Niero, M., et al**

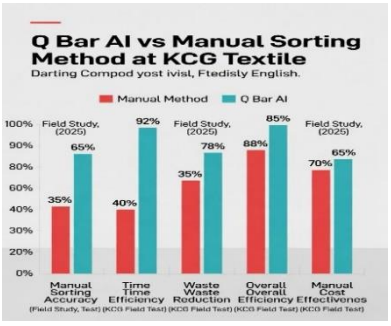
و يوضح شكل رقم (12) و شكل رقم (13) و شكل رقم (14) و شكل رقم (15) و شكل رقم (16) و شكل رقم (17) تأثير تطبيق الذكاء الأصطناعى في أوجة المجالات المختلفة داخل مصنع **KCG**



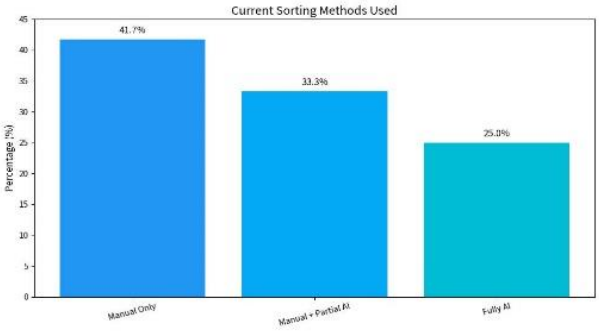
شكل رقم (12):مدى إمكانية تطبيق الذكاء الأصطناعى فى إعادة تدوير مخلفات الأقمشة



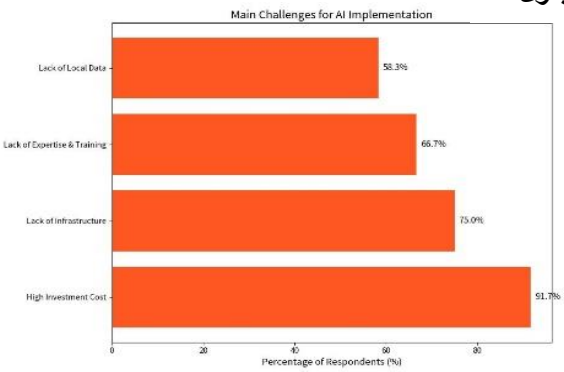
شكل رقم (13) : التأثير المتوقع للذكاء الأصطناعى على دقة الفرز



شكل رقم (14) : مقارنة بين طريقتى الفرز بالذكاء الأصطناعى و الفرز اليدوى



شكل رقم (15):أساليب الفرز المستخدمة حالياً



شكل رقم (16) : التحديات الرئيسية التنفيذ

*** مصادر : بيانات إنتاجية مسجلة داخل مصنع KCG Textile Egypt**

2.5 تقدير اقتصادي مستند إلى الدراسة النظرية و الميدانية

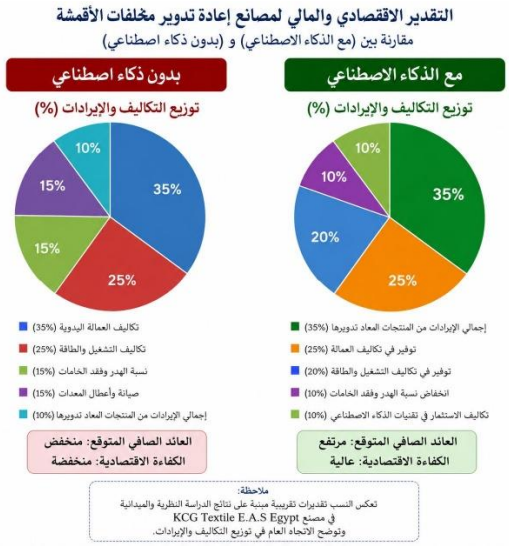
يوضح جدول رقم (10) الخاص بالتقدير الاقتصادي المستند إلى الدراسة النظرية والميدانية أن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة يؤدي إلى تحول جوهري في هيكل التكاليف والعوائد داخل قطاع المنسوجات. فرغم ارتفاع التكلفة الاستثمارية الأولية المرتبطة بشراء أجهزة الفرز الذكية وبرامج تحليل البيانات، فإن الأنظمة الذكية تسهم في خفض التكاليف التشغيلية على المدى المتوسط والطويل من خلال تقليل الاعتماد على العمالة اليدوية، وخفض نسب الهدر، وتسريع عمليات الفرز والإنتاج، وتحسين جودة المواد المعاد تدويرها. كما أظهرت نتائج الدراسة الميدانية أن استخدام الذكاء الاصطناعي يحقق عائدًا اقتصاديًا أعلى مقارنة بالأنظمة التقليدية نتيجة زيادة كفاءة التشغيل وتحسين استغلال الموارد، وهو ما يدعم قدرة المصانع على التوسع وتحقيق تنافسية أكبر ضمن إطار الاقتصاد الدائري والتنمية الصناعية المستدامة

جدول رقم (10) : تقدير اقتصادي مستند إلى الدراسة النظرية و الميدانية

البيان	النتيجة	التفسير
التكلفة المالية بدون استخدام الذكاء الاصطناعي	انخفاض الاستثمار المبدئي، مع ارتفاع التكلفة التشغيلية على المدى الطويل	الاعتماد على العمالة اليدوية يزيد من تكاليف الأجور، ارتفاع نسب الهدر، بطء الفرز، وانخفاض كفاءة استغلال الخامات.
التكلفة المالية باستخدام الذكاء الاصطناعي	ارتفاع الاستثمار الأولي، مع انخفاض التكلفة التشغيلية تدريجيًا	يتطلب شراء أجهزة فرز ذكية، برامج تحليل بيانات، وحساسات متخصصة، لكنه يقلل العمالة الزائدة والهدر ويحسن سرعة الإنتاج.
تكلفة العمالة	أعلى بدون الذكاء الاصطناعي	الفرز اليدوي يحتاج عددًا أكبر من العمالة ومعدلات تدريب مستمرة.
نسبة الهدر	أعلى بدون الذكاء الاصطناعي (10%–25%)	ضعف دقة الفرز يؤدي إلى فقد خامات قابلة لإعادة الاستخدام.
العائد على الاستثمار ROI	أعلى على المدى المتوسط والطويل عند استخدام الذكاء الاصطناعي	رغم ارتفاع التكلفة الأولية، إلا أن تحسين الجودة وتقليل الفاقد يرفع الربحية مع الوقت.
زمن التشغيل والإنتاجية	أسرع عند استخدام الذكاء الاصطناعي	الأنظمة الذكية تسرّع تصنيف الأقمشة وتحليل الخامات مقارنة بالفرز اليدوي.
جودة المنتج النهائي	أفضل نسبيًا باستخدام الذكاء الاصطناعي	دقة أعلى في تصنيف الألياف وتقليل التلوث بين الخامات المختلفة.

***مصادر: وزارة التخطيط و التنمية الأقتصادية ،(2022) رؤية مصر 2030 ، مركز بحوث الصناعة ، (2022) تقرير المخلفات النسجية و الصناعات التحويلية فى مصر ، UNEP (2023),Sustainability&Circular Economy in Textile Waste Management.**

و يوضح شكل رقم (17) تقدير الأقتصادي مستند إلى الدراسة النظرية و الميدانية لمصانع إعادة تدوير مخلفات الأقمشة بالمقارنة بمصنع KCG Textile Egypt



شكل رقم (17) : التقدير الأقتصادى و المالى

2.6 التحديات التي واجهت المشروع ونتائج الدراسة الحالة (مصنع KCG Textile)

أولاً: التحديات الرئيسية التي واجهت الدراسة والمشروع:

- ارتفاع التكلفة الاستثمارية الأولية — كان أبرز التحديات، حيث يتطلب شراء أجهزة الفرز الذكية (مثل Q Bar AI) وبرمجيات التعلم الآلي استثمارات كبيرة، وهو ما يمثل عبئًا خاصة على المصانع الصغيرة والمتوسطة.
- نقص قواعد البيانات المحلية — صعوبة تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي بسبب عدم وجود بيانات مصنفة عن أنواع الأقمشة المصرية (قطن، بوليستر، مخلوط).
- ضعف البنية التحتية الرقمية — خاصة في المناطق الصناعية، من حيث سرعة الإنترنت الصناعي والربط الآلي بين خطوط الإنتاج.
- نقص الكوادر الفنية المؤهلة — مقاومة بعض العمالة للتغيير وضعف المهارات الرقمية.

خلط أنواع المخلفات — خاصة الأقمشة المختلطة، مما يعقد عمليات الفرز والتصنيف.

ثانياً: نتائج دراسة الحالة (مصنع KCG Textile)

أظهرت زيارة مصنع K C G Textile نتائج إيجابية ملموسة:

- حقق جهاز Q Bar AI دقة فرز تصل إلى 92% مقارنة بـ 65% في الطريقة اليدوية.
- انخفاض زمن الفرز بنسبة 75%، وتقليل الهدر بنسبة 78%.
- تحسن كفاءة التشغيل الإجمالية بنسبة 88%.
- ارتفاع رضا المستخدمين وتوصيتهم بتطبيق التقنية في مصانع مشابهة بنسبة 83%.

ثالثاً: المعوقات الرئيسية (من الدراسة الميدانية والاستبيان)

- 91.7% من المستجيبين يرون ارتفاع التكلفة الاستثمارية أكبر عائق.
- 75% يشيرون إلى ضعف البنية التحتية الرقمية.

- 66.7% يؤكدون نقص الخبرات والتدريب.
- 58.3% يعانون من نقص البيانات المحلية.

رابعاً: التحليل العام للنتائج والفوائد البيئية

أكدت النتائج أن الذكاء الاصطناعي يمثل نقلة نوعية في منظومة إعادة التدوير، حيث يحول المخلفات من عبء بيئي إلى مورد اقتصادي.

الفوائد البيئية الرئيسية:

- خفض كبير في الانبعاثات الكربونية الناتجة عن الحرق أو الدفن.
- تقليل استهلاك المياه والطاقة (إعادة استخدام الألياف أقل تكلفة بيئية من إنتاج خام جديد).
- الحد من تلوث المياه بالأصباغ والمواد الكيميائية.
- تقليل الجسيمات البلاستيكية الدقيقة في البيئة.

خامساً: المشروعات المستقبلية الاستثمارية لشركة KCG Textile

- توسعة خطوط الفرز الذكي باستخدام تقنيات AI متقدمة.
- إنشاء وحدة للتدوير الكيميائي للأقمشة المختلطة.
- تطوير منتجات جديدة عالية القيمة من الألياف المعاد تدويرها (ملابس رياضية، ستائر فاخرة، مواد عزل).
- بناء منصة بيانات مشتركة مع مصانع أخرى لتغذية نماذج الذكاء الاصطناعي.
- إنشاء مركز تدريب داخلي على تقنيات الذكاء الاصطناعي في إدارة المخلفات.

سادساً: الحوافز المطلوبة لعمل مشاريع مماثلة في مصر

- حوافز مالية: قروض ميسرة، إعفاءات ضريبية، ودعم من صندوق التمويل الأخضر.
- حوافز تشريعية: إلزامية الفرز من المنبع + نظام المسؤولية الممتدة للمنتج (EPR).
- دعم فني: إنشاء مركز وطني للبيانات النسيجية + برامج تدريب مدعومة.
- شراكات: تعاون بين الحكومة، القطاع الخاص، والمؤسسات الدولية (UNIDO ،EBRD).
- حوافز تسويقية: شهادات خضراء للمنتجات المعاد تدويرها + أولوية في المناقصات الحكومية.
- استنتاج اقتصادي

تشير نتائج الدراسة إلى أن الذكاء الاصطناعي لا يخفض التكلفة الإجمالية فورًا، لكنه يحول هيكل التكلفة من تكلفة تشغيلية مرتفعة ومتكررة إلى تكلفة استثمارية أولية أعلى مع وفر اقتصادي مستدام على المدى الطويل.

2.7 نتائج البحث (النظرية و الميدانية و خلاصة النتائج)

تشير نتائج البحث، المستخلصة من التحليل النظري والدراسة الميدانية، إلى أن قطاع المنسوجات يُعد من أكثر القطاعات الصناعية توليدًا للمخلفات واستهلاكًا للموارد، حيث تمثل المخلفات النسيجية في مصر نحو (3–5%) من إجمالي المخلفات الصلبة بما يقارب 385 ألف طن سنويًا، وهو ما يعكس حجم التحدي البيئي والاقتصادي المرتبط بإدارتها . وقد أظهرت النتائج النظرية أن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي، خاصة التعلم الآلي والرؤية الحاسوبية وتحليل البيانات الضخمة، يسهم بشكل ملحوظ في تحسين كفاءة فرز وتصنيف المخلفات النسيجية، حيث تصل دقة الأنظمة الذكية إلى نحو (95–97%) مقارنة بـ (65–70%) في الأساليب التقليدية .

كما أكدت الدراسة الميدانية وجود فجوة واضحة بين الإمكانيات التكنولوجية المتاحة عالميًا ومستوى التطبيق الفعلي داخل المصانع المصرية، خاصة في المنشآت الصغيرة والمتوسطة، نتيجة ارتفاع تكاليف الاستثمار وضعف البنية التحتية الرقمية ونقص قواعد البيانات . وأوضحت

النتائج أن تحسين عمليات الفرز يمثل العامل الحاسم في رفع كفاءة إعادة التدوير وزيادة القيمة الاقتصادية للمخلفات ضمن إطار الاقتصاد الدائري.

وعلى المستوى البيئي، بينت النتائج أن إعادة تدوير المخلفات النسيجية تسهم في خفض الانبعاثات الكربونية وتقليل التلوث المائي والهوائي، في حين يؤدي التخلص التقليدي بالحرق أو الدفن إلى آثار بيئية خطيرة، منها انبعاث الغازات السامة وفقدان الموارد الطبيعية. أما اقتصاديًا، فقد أظهرت النتائج أن تبني تقنيات الذكاء الاصطناعي يؤدي إلى تقليل التكاليف التشغيلية على المدى الطويل وزيادة العائد الاقتصادي من المخلفات، رغم ارتفاع التكاليف الاستثمارية الأولية.

وتخلص الدراسة إلى أن إدماج الذكاء الاصطناعي في منظومة إعادة تدوير مخلفات الأقمشة يمثل مدخلًا استراتيجيًا لتحقيق التحول نحو الاقتصاد الدائري، وتعزيز الاستدامة البيئية والاقتصادية في قطاع النسيج في مصر، بما يتوافق مع مستهدفات رؤية مصر 2030 .

الفصل الثالث: توصيات البحث

1. **على المستوى التشريعي والسياساتي:**

- تطوير الإطار التشريعي لإدارة المخلفات النسيجية بما يدعم التحول نحو الاقتصاد الدائري.
- تقديم حوافز ضريبية وتمويلية للمصانع التي تعتمد تقنيات الذكاء الاصطناعي في إعادة التدوير.
- إدماج الذكاء الاصطناعي ضمن الاستراتيجيات الوطنية لإدارة المخلفات والتنمية الصناعية.
- تعزيز الشراكات بين القطاعين العام والخاص والمؤسسات الدولية لدعم التحول التكنولوجي.

2. **على المستوى الاقتصادي:**

- توفير آليات تمويل ميسرة للمشروعات الصغيرة والمتوسطة لتبني التقنيات الذكية.
- دعم الاستثمار في البنية التحتية الرقمية وقواعد البيانات الصناعية.
- تشجيع إنشاء أسواق للمواد المعاد تدويرها لتعظيم القيمة الاقتصادية للمخلفات.
- تبني نماذج اقتصادية قائمة على إعادة الاستخدام والتدوير لخفض الفاقد وزيادة العائد.

3. **على المستوى الفني والتطبيقي:**

- تطوير نظم فرز ذكية تعتمد على الرؤية الحاسوبية وتقنيات الاستشعار (NIR) .
- إنشاء قواعد بيانات وطنية للمخلفات النسيجية لدعم تدريب نماذج الذكاء الاصطناعي.
- تدريب الكوادر الفنية على استخدام وتشغيل الأنظمة الذكية داخل المصانع.
- تطبيق نماذج تجريبية (Pilot Projects) في المناطق الصناعية لتقييم جدوى التوسع.

4. **على المستوى المجتمعي:**

- نشر الوعي بأهمية إعادة تدوير الأقمشة ودورها في حماية البيئة.
- تشجيع ثقافة الاستهلاك المستدام وإعادة الاستخدام.
- دعم المبادرات المجتمعية لجمع وفرز المخلفات النسيجية
- إشراك المجتمع المدني في منظومة إدارة المخلفات لتحقيق التكامل المؤسسي.

ملحق (1)

استطلاع رأي حول دور الذكاء الأصطناعى في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة

نظراً للأهمية المتزايدة لإعادة تدوير مخلفات الأقمشة ودورها في دعم الاستدامة البيئية وتعزيز الكفاءة الاقتصادية، يهدف هذا الاستبيان إلى دراسة دور تقنيات الذكاء الاصطناعي في تطوير عمليات الفرز وتحسين جودة المنتجات المعاد تدويرها. وتكمن أهمية هذا البحث في المساهمة في تحديد التحديات الحالية، واستكشاف فرص التحول الرقمي داخل القطاع، بما يدعم اتخاذ قرارات أكثر كفاءة ويعزز القدرة التنافسية للصناعة.

نأمل من سيادتكم التكرم بالمشاركة، حيث تمثل آراؤكم وخبراتكم إضافة قيمة لنجاح هذه الدراسة.

أولاً: البيانات العامة

- **اسم المصنع أو الشركة:** .....
- **الموقع:** .....
- **نوع النشاط:**
- ☐ غزل ☐ نسيج ☐ صباغة وتجهيز ☐ ملابس جاهزة ☐ إعادة تدوير ☐أخرى (يرجى التحديد)
- **عدد العاملين:**
- ☐ أقل من 50 ☐ 50–200 ☐ أكثر من 200

ثانياً : دور الذكاء الأصطناعى في تحسين كفاءة ودقة فرز الأقمشة

1- ما مدى قابلية تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحسين كفاءة ودقة فرز الأقمشة؟

☐ لا يوجد
☐ ضعيفة
☐ متوسطة
☐ عالية
☐عالية جدًا

ثالثاً : :التحديات الحالية في عمليات الفرز

1- كيف يتم فرز الأقمشة حالياً؟ وما المعايير المستخدمة؟

☐ يدوي
☐ ميكانيكى
☐ آلي
☐ مزيج بين اليدوي والآلي

- ما المعايير المستخدمة في الفرز؟ .....

2- ما أبرز التحديات التقنية في عملية الفرز ؟

☐ صعوبة تمييز الألياف
☐ انخفاض الدقة

☐ بطء العملية

☐ نقص التكنولوجيا

3- هل تواجهون صعوبة في التعامل مع الأقمشة المختلطة؟

☐ نعم

☐ لا

4-ما نسبة الخطأ التقريبية في الفرز ؟

☐ أقل من 5 %

☐5% – 10%

☐10% – 20%

☐أكثر من 20%

5- كيف يؤثر ذلك على جودة المنتج النهائي؟ .....

رابعاً: التكنولوجيا والتحول الرقمي

6-هل تم استخدام أنظمة ذكية في الفرز؟

☐ نعم

☐ لا

7-ما المتطلبات اللازمة لتطبيق نظام فرز ذكي؟

☐ تكلفة استثمارية

☐ بنية تحتية

☐ تدريب العاملين

☐ دعم فني

☐ أخرى

8-ما أهم التحديات التي تواجة الأتمتة ؟

☐ارتفاع التكلفة

☐ نقص الخبرات

☐ صعوبة الصيانة

☐ مقاومة التغيير

☐أخرى

خامساً : المدخلات الإنتاجية وسلسلة التوريد

9- ما مصادر الأقمشة؟

☐ ملابس مستعملة

☐ مخلفات مصانع

☐ استيراد

☐ أخرى

10- كيف يتم تصنيف الأقمشة؟ .....

11- هل توجد صعوبة في تحديد نوع الألياف؟

☐ نعم

☐ لا

12 - ما نسبة الهدر الناتج عن ضعف الفرز؟

☐ أقل من 10 %

☐ 10% – 25%

☐ 25% – 50%

☐أكثر من 50%

سادساً: المنسوجات المعاد تدويرها والسوق المستهدف

13- من هم العملاء ؟

☐ مصانع

☐ شركات

☐ أفراد

☐ تصدير

☐أخرى

14- مدى اختلاف الجودة بين المعاد تدويره والبكر؟

☐ لا يوجد اختلاف

☐اختلاف بسيط

☐اختلاف متوسط

☐اختلاف كبير

15-هل توجد معايير جودة محددة ؟

☐ نعم

☐ لا

16-هل تتعاملون مع جهات محددة للبيع؟

☐ نعم

☐ لا

17- ما العامل الأهم للعملاء؟

☐ السعر

☐ الجودة

☐الاستدامة

☐جميع ما سبق

سابعاً: البيئة التنظيمية والتشريعية

18- هل توجد معوقات قانونية؟

☐ نعم

☐ لا

19 –هل توجد حوافز حكومية تدعم هذا القطاع؟

☐نعم

☐ لا

ثامناً: الرؤية المستقبلية

20–هل تتوقع زيادة الطلب في مصرعلى المنتجات المعاد تدويرها؟

☐نعم

☐ لا

☐إلى حد ما

21–كيف يمكن للذكاء الاصطناعي تطوير القطاع؟ .....

ملحق (2)

استمارة أستبيان حول دور الذكاء الأصطناعى في إعادة تدوير مخلفات الأقمشة

السادة المحترمين في إدارة مصنع K C G Textile،

يهدف هذا الاستبيان إلى تقييم الواقع الحالي لإدارة مخلفات الأقمشة في المصنع، واستكشاف إمكانيات وتحديات تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي (مثل جهاز Q Bar AI) في عمليات الفرز والتدوير.

ستُستخدم الإجابات في إطار بحث علمي أكاديمي لاستكمال متطلبات الماجستير المهني، وستعامل بسرية تامة.

القسم الأول: البيانات العامة

1. الوظيفة الحالية: ☐ مدير عام ☐ مدير إنتاج ☐ مدير جودة ☐ مسؤول بيئة واستدامة☐ مهندس ☐ فني ☐ أخرى (يرجى التحديد): .....
2. عدد سنوات الخبرة في قطاع المنسوجات: ☐ أقل من 5 سنوات ☐ 5–10 سنوات ☐ أكثر من 10 سنوات
3. نوع المخلفات النسيجية الأكثر إنتاجًا في المصنع (يمكن اختيار أكثر من واحد): ☐ قصاصات أقمشة ☐ بقايا غزل ☐أقمشة تالفة ☐ مخلفات صباغة ☐ أخرى: .....

القسم الثاني: الواقع الحالي لإدارة المخلفات

4. ما نسبة المخلفات النسيجية الناتجة عن عمليات الإنتاج اليومية تقريبًا؟ ☐ أقل من 5% ☐ 5–10% ☐ 10–15% ☐ أكثر من 15%
5. كيف يتم فرز المخلفات حاليًا في المصنع؟☐ يدوي بالكامل ☐ شبه آلي ☐ آلي (باستخدام Q Bar AI) ☐ مزيج بين اليدوي والآلي
6. ما تقييمك لكفاءة نظام الفرز الحالي؟ (من 1 إلى 5) ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5
7. ما أكبر تحدٍ تواجهونه في عملية فرز وإدارة مخلفات الأقمشة؟ (اختر ما ينطبق)

☐ صعوبة تصنيف الأقمشة المختلطة☐ ارتفاع نسبة الهدر☐ نقص العمالة الماهرة☐ ارتفاع تكلفة التخل ☐ أخرى: .....

القسم الثالث: تقييم جهاز Q Bar AI

8. هل يعمل جهاز Q Bar AI حاليًا في المصنع؟☐ نعم (مستمر) ☐ نعم (تجريبي) ☐ لا ☐ لا أعلم
9. ما مدى رضاك عن أداء جهاز Q Bar AI؟ (من 1 إلى 5) ☐ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 5
10. ما أبرز المزايا التي لاحظتموها عند استخدام Q Bar AI؟ (اختر ما ينطبق) ☐ زيادة دقة الفرز ☐ تقليل وقت الفرز ☐ تقليل الهدر☐ تحسين جودة المواد المعاد تدويرها ☐ تقليل الاعتماد على العمالة اليدوية
11. ما أبرز التحديات التي واجهتموها مع الجهاز؟

.....

القسم الرابع: الرؤية المستقبلية

12. ما مدى قابلية توسيع استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في المصنع؟☐ ضعيفة ☐ متوسطة ☐ عالية ☐ عالية جدًا

13. ما أهم الفوائد المتوقعة من توسيع تطبيق الذكاء الاصطناعي؟ (اختر ما ينطبق) ☐ فوائد اقتصادية ☐ فوائد بيئية ☐ فوائد تشغيلية ☐ تحسين السمعة التسويقية

14. ما هي الحوافز التي تحتاجونها لتوسيع استخدام التقنيات الذكية؟ (اختر ما ينطبق) ☐ دعم مالي / تمويل ميسر ☐ إعفاءات ضريبية ☐ تدريب فني☐ دعم حكومي ☐ شراكات تقنية ☐ أخرى: .....

15. هل توصون بتبني تقنيات الذكاء الاصطناعي في مصانع أخرى مشابهة في مصر؟☐ نعم بشدة☐ نعم ☐ محايد ☐ لا

شكرًا جزيلًا على تعاونكم

المراجع

أولاً: المراجع باللغة العربية

- الجهاز المركزي للتعبئة العامة والإحصاء .(2023) .إحصاءات المخلفات الصلبة في مصر .القاهرة، مصر .
- حسين، أحمد علي. (2023). إعادة تدوير المخلفات النسيجية ودورها في تحقيق التنمية المستدامة في مصر .المجلة العربية للتنمية المستدامة، 7(1)، 55–78 .
- عبد الله، محمد حسن. (2024). تطبيقات الذكاء الاصطناعي في إدارة المخلفات الصناعية في الدول النامية .مجلة العلوم البيئية، جامعة عين شمس، 53(2)، 115–140 .
- محمود، دعاء عبد الرحمن. (2022). الاقتصاد الدائري كمدخل لإدارة المخلفات الصناعية .المجلة المصرية للتخطيط والتنمية، 30(4)،201–230.
- مصطفى، محمد أحمد .(2021) .إدارة المخلفات النسيجية في مصر: التحديات والفرص الاقتصادية .القاهرة: دار الفكر العربي .
- مركز بحوث الصناعة .(2022) .تقرير إدارة المخلفات الصناعية في مصر .القاهرة: وزارة التجارة والصناعة .
- وزارة البيئة المصرية .(2024) .تقرير حالة البيئة في مصر 2024 .القاهرة: وزارة البيئة .
- وزارة التخطيط والتنمية الاقتصادية .(2022) .رؤية مصر 2030 – النسخة المحدثة .القاهرة: جمهورية مصر العربية.

ثانياً: المراجع باللغة الإنجليزية

- Accenture. (2024). Artificial intelligence for sustainable waste management. Accenture.
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2023). Product design and business model strategies for a circular economy. Journal of Cleaner Production, 400, 136789.
- Bressanelli, G., Adrodegari, F., Perona, M., & Saccani, N. (2023). The role of digital technologies to support the circular economy: A systematic literature review. Business Strategy and the Environment, 32(1), 128–144.
- Earley, R., & Goldsworthy, K. (2015). Design for recycling: A circular economy perspective on product design. Journal of Cleaner Production, 101, 1–12.
- El Darai, T., Ter-Halle, A., Blanzat, M., Despras, G., Sartor, V., Bordeau, G., … & Garrigues, J.-C. (2024). Near-infrared hyperspectral imaging coupled with artificial intelligence for textile waste sorting and recycling.
- Ellen MacArthur Foundation. (2017). A new textiles economy: Redesigning fashion’s future.
- Ellen MacArthur Foundation. (2023). Circular economy in textiles: Redesigning the future.
- Faghih, E., Saki, Z., & Moore, M. (2025). A systematic literature review—AI-enabled textile waste sorting. Sustainability, 17(10), 4264.
- Islam, M., Shamsuzzaman, M., Hasan, H. R. U., & Atik, M. A. R. (2025). Environmental sustainability of fashion product made from post-consumer waste: Impact across the life cycle. Sustainability, 17(5), 1917.
- Jiang, C., Wang, Z., Li, X., & Zhang, H. (2023). Deep learning-enabled visual recognition for complex textile waste sorting. Advanced Intelligent Systems, 5(9), 2300112.
- Khan, S., Ahmed, T., & Lee, J. (2025). Deep learning applications in textile waste sorting and recycling systems. Sustainability, 17(3), 1456.

- McKinsey & Company. (2023). Scaling textile recycling in a circular economy system. McKinsey & Company.

- Montazer, M., & Harifi, T. (2017). Nanofinishing of textile materials for sustainability. Textile Research Journal, 87(14), 1789–1810.

- Muthu, S. S., Li, Y., Hu, J. Y., & Mok, P. Y. (2020). Recyclability assessment of textile fibres using machine learning techniques. Waste Management, 102, 838–848.

-Niero, M., Olsen, S. I., & Birkved, M. (2023). Data-driven approaches for circular economy implementation in industrial systems. Journal of Industrial Ecology, 27(5), 1123–1137.

- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2023). Artificial intelligence and the circular economy. OECD Publishing.

- Palm, D., Elander, M., Watson, D., Kiørboe, N., Salmenperä, H., Dahlbo, H., Gíslason, S., Throne-Holst, H., & Tojo, N. (2020). Towards a circular economy for textiles: Analysis of textile flows and recycling systems. Sustainability, 12(7), 2768.

- Sandin, G., & Peters, G. M. (2018). Environmental impact of textile reuse and recycling: A review. Journal of Cleaner Production, 184, 353–365.

- Sharma, R., & Singh, P. (2024). AI-based classification systems for textile waste recycling. Resources, Conservation & Recycling, 198, 107234.

- Spyridis, Y., & Argyriou, V. (2025). Textile analysis for recycling automation using transfer learning and zero-shot foundation models. arXiv preprint.

- Textile Exchange. (2024). Preferred fiber and materials market report 2024.

- United Nations Environment Programme (UNEP). (2023). Sustainability and circularity in the textile value chain.

- United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). Global waste management outlook 2024. United Nations.

- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2022). Switch to circular value chains to boost the competitiveness of Egypt’s textile and clothing industry. SwitchMed Programme.

- Utebay, B., Çelik, P., & Çay, A. (2019). Effects of cotton textile waste properties on recycled fibre quality. Journal of Cleaner Production, 222, 29–35.

- Wang, Y., Zhang, Y., & Liu, H. (2021). Near-infrared spectroscopy and machine learning for textile fiber identification and sorting. Sensors, 21(9), 3125.

- World Bank. (2023). Circular economy opportunities in the textile sector. World Bank.

- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., … Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate). Science, 351(6278), 1196–1199.

- Zambrano, M. C., Pawlak, J. J., & Daystar, J. (2021). Artificial intelligence-based textile sorting systems for recycling: Economic and environmental implications. Waste Management, 120, 155–165.

- Zhang, Y., Wu, C., Nahil, M. A., & Williams, P. T. (2021). Pyrolysis and catalytic pyrolysis of textile waste for fuel production. Journal of Hazardous Materials, 403, 123494.

ثالثاً: المواقع الإلكترونية

-https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136789
-https://ellenmacarthurfoundation.org
-https://doi.org/10.3390/su17031456
-https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107234
- https://textileexchange.org