الإدارة المستدامة للمنتجات الصناعية: التصميم من أجل خلق قيمة مستدامة لتعزيز دورة حياة المنتج
Sustainable Industrial Product Management: Designing for Sustainable Value Creation to enhance Product Lifecycle

محمود أحمد جودة الجزار
أستاذ مساعد بقسم التصميم الصناعى، كلية الفنون التطبيقية، جامعة بنها
mahmoud.algazar@fapa.bu.edu.eg

ملخص البحث Abstract

إدارة المنتجات الصناعية المستدامة مفهومٌ يُركز على تصميم المنتجات لخلق قيمة مستدامة طوال دورة حياتها، يشمل هذا النهج جوانبَ مُختلفة، مثل مصادر المواد، وعمليات التصنيع، ومرحلة استخدام المنتج، والتخلص منه فى نهاية عمره الافتراضى، من خلال تطبيق ممارسات مستدامة فى كل مرحلة، يُمكن للشركات تقليل الآثار البيئية السلبية، والحفاظ على الموارد، وتعزيز المسؤولية الاجتماعية، تهدف هذه الورقة البحثية إلى استكشاف أهمية تصميم المنتجات لخلق قيمة مستدامة، وكيف يُمكن أن يُعزز ذلك دورة حياة المنتج الإجمالية، كما تُناقش الدراسة الأبحاث الحالية، وتُسلّط الضوء على الحاجة إلى مزيد من البحث فى حدود الاستدامة فى المنتجات المُصممة لبيئات متعددة دورات الحياة، ستستكشف الدراسة الاستراتيجيات والممارسات المُستخدمة فى إدارة المنتجات الصناعية المستدامة، بما فى ذلك التصميم المُستدام، وعمليات التصنيع الصديقة للبيئة، واستعادة المنتج، بالإضافة إلى ذلك، ستُناقش الورقة الفوائد والتحديات المُرتبطة بتطبيق هذه الممارسات، وتُحدد مجالات التحسين المُحتملة، من خلال تبنى نهج إدارة المنتجات الصناعية المستدامة، يُمكن للشركات تحقيق فوائد مُتعددة، تشمل تقليل الأثر البيئى، وتعزيز سمعة العلامة التجارية، وتحسين رضا العملاء، وتوفير التكاليف على المدى الطويل، علاوة على ذلك، يُمكن لتصميم المنتجات لخلق قيمة مستدامة أن يُسهم فى الاقتصاد الدائرى من خلال تعزيز إعادة استخدام المواد وإصلاحها وإعادة تدويرها.

لا يُساعد هذا النهج فى الحفاظ على الموارد الطبيعية فحسب، بل يُقلل أيضاً من النفايات ويُعزز الاستخدام الفعال للمواد فى كل مرحلة من مراحل دورة حياة المنتج، ومن خلال تبنى ممارسات التصنيع المستدامة، يُمكن للشركات تقليل تأثيرها البيئى مع تعظيم خلق القيمة الاقتصادية، تشمل هذه الممارسات جميع الجوانب، بدءاً من استخراج المواد وحتى التخلص منها، مما يضمن تصميم المنتجات مع التركيز على الاستدامة فى كل خطوة، يُركز أحد مجالات البحث على مناهج عملية إدارة دورة حياة المنتج المتكاملة لمنتجات الاتصالات فى بيئة متعددة دورات الحياة، يسمح هذا المفهوم المُبتكر بتطوير وإدارة المنتجات بطريقة تُراعى عمرها الافتراضى بالكامل، وبالمثل، تم تنفيذ تصميمات لتطبيقات متعددة دورات الحياة بنجاح فى مشاريع زراعية صناعية، بهدف تعزيز فلسفة البيئة الصناعية من خلال إطالة دورة حياة هذه المنتجات، بالإضافة إلى ذلك، بُذلت جهود نحو تنفيذ عمليات استرداد مُصممة خصيصاً للمنتجات الإلكترونية لمواجهة تحديات نهاية العمر الافتراضى، مع ذلك، تجدر الإشارة إلى أنه على الرغم من التقدم المحرز فى مفاهيم التصميم المستدام المطبقة على دورات حياة متعددة، إلا أنه لم يُجرَ بعدُ استكشافٌ لتحديد الحدود عند تحقيق كامل إمكانات الاستدامة خلال دورة حياة المنتج، لقياس أداء الاستدامة بشكل صحيح ضمن عمليات التصنيع المذكورة أعلاه، تُستخدم مقاييس ثلاثية الأبعاد - تقييم

النتائج بناءً على الآثار البيئية، بالإضافة إلى العوامل الاقتصادية واعتبارات المسؤولية الاجتماعية المذكورة سابقاً؛ وبالتالى مراعاة الأبعاد الثلاثة للاستدامة - البيئة، والاقتصاد، والآثار الاجتماعية.

كلمات دالة Keywords:

التصنيع المستدام Sustainable Manufacturing
إدارة دورة حياة المنتج Product Lifecycle Management (PLM)
تصميم دورات حياة متعددة Multi-Lifecycle Design
مبادئ إعادة التكوين Reconfiguration Principles
التصميم البيئى EcoDesign
خلق قيمة مستدامة Sustainable Value Creation

مقدمة Introduction:

فى عالمنا المتغير بسرعة، لا شك أن التنبؤات الدقيقة والمناسبة لقابلية استخدام المنتجات أمر بالغ الأهمية، ولا تقتصر أهمية ممارسة التصنيع المستدام على المساهمة فى الاقتصاد الدائرى فحسب، بل تلعب أيضاً دوراً حاسماً فى تعزيز الإدارة البيئية من خلال الدعوة إلى استخدام مواد فعالة طوال دورة حياة المنتج، ومن خلال تبنى ممارسات التصنيع المستدامة، يمكن للشركات تقليل بصمتها الكربونية بشكل كبير مع تعظيم القيمة الاقتصادية فى الوقت نفسه، وتتجاوز هذه الممارسات أساليب التصنيع التقليدية، إذ تشمل جميع الجوانب، بدءاً من الاستخراج المسؤول للمواد الخام ووصولاً إلى التخلص من المنتجات بطريقة صديقة للبيئة، ويضمن هذا النهج الشامل تصميم المنتجات بدقة متناهية مع التزام راسخ بالاستدامة فى كل مرحلة من مراحل دورة حياتها.

ولتحقيق أهداف الاستدامة، من الضرورى التوسع فى مفهوم نهج دورات الحياة المتعددة فى تطوير وإدارة المنتجات، ولا يركز هذا النهج فقط على تصميم منتجات ذات عمر افتراضى أطول، بل يؤكد أيضاً على أهمية مراعاة دورة حياتها بأكملها، بدءاً من استخراج المواد وحتى التخلص منها، باعتماد هذا المنظور الشامل، يُمكننا ضمان تصميم المنتجات ليس فقط لإطالة عمرها الافتراضى، بل أيضاً لسهولة إصلاحها وإعادة تدويرها وإعادة استخدامها فى نهاية عمرها الإنتاجى الأولى، ومن أبرز الأبحاث فى هذا المجال نهجٌ متكاملٌ لإدارة دورة حياة المنتج (PLM) لمنتجات الاتصالات فى بيئة متعددة دورات الحياة، ومفاهيم تصميمية مُطبقة على مشاريع التنمية الزراعية الصناعية التى تُعزز التصاميم المستدامة من خلال مراعاة دورات حياة متعددة (Bocken et al., 2014)، تُسلط هذه الدراسات الضوء على كيفية توافق التصميم لدورات حياة متعددة مع فلسفة علم البيئة الصناعية، وتعزيز الممارسات الصديقة للبيئة من خلال استعادة النفايات الإلكترونية، مع ذلك، تجدر الإشارة إلى محدودية البحث فى حدود الاستدامة عند تصميم المنتجات المُخصصة لدورات حياة متعددة، ولتعزيز فهمنا وتطبيقنا لممارسات التصنيع المستدامة طوال دورة حياة المنتج، يجب تطبيق أدوات ومنهجيات ومعارف مُتنوعة وفقاً لذلك، يُحدد النموذج المُقترح العمليات التى تُنفذ طوال دورة حياة المنتج، مع دمج مبادئ التصميم البيئى إلى جانب مناهج التصنيع المُستدامة، يُسهّل هذا التكامل زيادة الكفاءة فى تطوير المنتجات وإدارة دورة الحياة المُستدامة.

فى هذه الدراسة، يقترح الباحث منهجيةً لتصميم خطوط التصنيع باستخدام مبادئ إعادة التكوين لتحسين الأثر البيئى لعمليات التصنيع، من خلال تقليل الآثار البيئية السلبية، يهدف التصنيع المستدام إلى إنشاء دورة منتج شاملة وتعزيز دورة حياة أنظمة التصنيع والمنتجات والخدمات، هناك فرصةٌ لإجراء أبحاثٍ إضافية فى هذا المجال لدراسة حدود الاستدامة عند تطوير منتجاتٍ لسيناريوهات دورات الحياة المتعددة، أحد مجالات الاستكشاف المحتملة هو دراسة كيفية استخدام مناهج عملية إدارة دورة حياة المنتج المتكاملة فى تطوير منتجات الاتصالات ضمن بيئات دورات الحياة المتعددة (Braungart et al., 2007)، بالإضافة إلى ذلك، فإن تبنى مفاهيم تصميمية مثل "التصميم لدورات الحياة المتعددة" أو تعزيز فلسفات البيئة الصناعية يمكن أن يُسهم فى تحقيق نتائج أكثر استدامة، سيكون من المفيد أيضاً دراسة استراتيجيات الاستخدام الفعال للموارد من خلال منهجيات إدارة دورة حياة المنتج ذات الحلقة المغلقة والمنتجات الذكية التى تُحسّن استهلاكها للطاقة وتأثيرها البيئى.

منهج البحث Methodology:

فى هذه الورقة البحثية، استعرض الباحث الدراسات المتوفرة حول التصنيع المستدام وإدارة دورة حياة المنتج لتحديد الثغرات المعرفية المتعلقة بحدود الاستدامة فى تصميم المنتجات لسيناريوهات دورات الحياة المتعددة، كما تم دراسة النموذج المقترح الذى يحدد العمليات والأدوات والمنهجيات لتحقيق الاستدامة طوال دورة حياة المنتج، ثم إقترح منهجية لتصميم خطوط التصنيع باستخدام مبادئ إعادة التكوين لتحسين الأثر البيئى.

١- استكشاف الأفكار والممارسات الأساسية لإدارة المنتجات الصناعية المستدامة، مع عرض النظريات والنماذج الرئيسية، البحث فى خلق القيمة المستدامة، ودمج مبادئ التصميم البيئى وعمليات التصنيع المستدامة، وتأثير هذه الممارسات على دورة حياة المنتج.

٢- التعمق فى استراتيجيات التصميم للاستدامة، مع التركيز على مفاهيم دورات الحياة المتعددة، تسليط الضوء على التطبيقات الناجحة لهذه الممارسات، بما فى ذلك عمليات إدارة دورة حياة المنتج المتكاملة لمنتجات الاتصالات، تحليل دراسات الحالة ضمن مشاريع التنمية الزراعية والصناعية.

٣- تفصيل التحديات التى واجهت تطبيق ممارسات إدارة المنتجات الصناعية المستدامة، ومناقشة الحدود والقيود المحتملة لتحقيق الاستدامة الكاملة، مع مراعاة نقص استكشاف حدود الاستدامة فى تصميمات المنتجات متعددة دورات الحياة.

٤- يقدم القسم الأخير شرحاً لمنهجية تصنيع مقترحة، تهدف إلى تحسين الآثار البيئية، ومناقشة إمكانات مبادئ إعادة التكوين التصنيعى، وسلّط الضوء على الطرق التى يمكن أن تُحسّن بها هذه المنهجية الجديدة دورة الحياة، وتُتيح آفاقاً جديدة للأبحاث المستقبلية، وسيتم توضيح المزيد من المعلومات التفصيلية حول هذه الأهداف فى الأقسام التالية.

١- إدارة المنتجات الصناعية المستدامة: المبادئ والممارسات:

تُعدّ إدارة دورة حياة المنتج والتصنيع المستدام جانبين رئيسيين لإدارة المنتجات الصناعية المستدامة، تهدف هذه الممارسات إلى خلق قيمة مستدامة من خلال دمج مبادئ التصميم البيئى وعمليات التصنيع المستدامة طوال دورة حياة المنتج.

تُعدّ إدارة المنتجات الصناعية المستدامة نهجاً بالغ الأهمية يسعى إلى دمج مبادئ الاستدامة فى دورة حياة المنتج بأكملها، من مرحلة التصميم إلى مرحلة نهاية العمر الافتراضى، ويكتسب هذا النهج شعبية متزايدة مع إدراك الشركات لأهمية إنتاج منتجات مستدامة فى عالم اليوم الذى يولى اهتماماً بالغاً بالبيئة (Buchert et al., 2022)، تتضمن إدارة المنتجات الصناعية المستدامة استخدام مبادئ التصميم البيئى وعمليات التصنيع المستدامة وخلق قيمة مستدامة لإنتاج منتجات صديقة للبيئة ومسؤولة اجتماعياً، سيستكشف هذا البحث الأفكار والممارسات الأساسية لإدارة المنتجات الصناعية المستدامة، مع عرض النظريات والنماذج الرئيسية.

١-١- خلق القيمة المستدامة:

خلق القيمة المستدامة هو عملية خلق قيمة للشركة مع ضمان عدم تأثر البيئة والمجتمع سلباً، يتضمن خلق القيمة المستدامة دمج مبادئ الاستدامة فى نموذج أعمال الشركة ومنتجاتها وخدماتها، ويمكن تحقيق ذلك من خلال تطبيق نهج الاقتصاد الدائرى فى تصميم وإنتاج المنتجات (King & Lenox, 2001)، والذى يتضمن إعادة استخدام المواد والموارد وإعادة تدويرها طوال دورة حياة المنتج.

يتضمن خلق القيمة المستدامة دمج مبادئ الاستدامة فى نموذج أعمال الشركة ومنتجاتها وخدماتها، ويهدف هذا النهج إلى خلق قيمة للشركة مع ضمان عدم تأثر البيئة والمجتمع سلباً، ويمكن تحقيق خلق القيمة المستدامة من خلال تبنى نهج الاقتصاد الدائرى، والذى يتضمن تصميم منتجات تتميز بالمتانة وإعادة الاستخدام وإعادة التدوير، ومن خلال ذلك، يمكن للشركات تقليل النفايات والحفاظ على الموارد وتقليل الأثر البيئى لمنتجاتها.

يتضمن خلق القيمة المستدامة أيضاً مراعاة الأثر الاجتماعى للمنتجات والخدمات، ويمكن للشركات تحقيق ذلك من خلال الانخراط فى ممارسات عمل عادلة، وتعزيز التنوع والشمول، ورد الجميل للمجتمع، لا يقتصر هذا النهج على إفادة المجتمع فحسب، بل يعزز أيضاً سمعة الشركة وقيمة علامتها التجارية، مما يؤدى إلى زيادة ولاء العملاء وزيادة ربحيتها.

١-٢- مبادئ التصميم البيئى:

تتضمن مبادئ التصميم البيئى تصميم منتجات صديقة للبيئة ومسؤولة اجتماعياً، وتراعى هذه المبادئ دورة حياة المنتج بأكملها، بدءاً من المواد الخام المستخدمة وحتى التخلص منه فى نهاية عمره الافتراضى، ويمكن استخدام مبادئ التصميم البيئى لتقليل الأثر البيئى للمنتجات من خلال تحسين استخدام المواد، وتقليل استهلاك الطاقة أثناء الإنتاج، وتصميم منتجات قابلة لإعادة التدوير أو التحلل الحيوى بسهولة (Rusinko, 2007).

تتضمن مبادئ التصميم البيئى تصميم منتجات صديقة للبيئة ومسؤولة اجتماعياً، ويراعى هذا النهج دورة حياة المنتج بأكملها، بدءاً من استخراج المواد الخام وحتى التخلص منها فى نهاية عمره الافتراضى، وتهدف مبادئ التصميم البيئى إلى تقليل الأثر البيئى للمنتجات من خلال تحسين استخدام المواد، وتقليل استهلاك الطاقة أثناء الإنتاج، وتصميم منتجات قابلة لإعادة التدوير أو التحلل الحيوى بسهولة.

يمكن تطبيق مبادئ التصميم البيئى على فئات مختلفة من المنتجات، بما فى ذلك الإلكترونيات والتغليف والأثاث، على سبيل المثال، يمكن استخدام مبادئ التصميم البيئى لتصميم أجهزة إلكترونية موفرة للطاقة، وسهلة الاستبدال، ومصنوعة من مواد مستدامة، وبالمثل، يمكن استخدام مبادئ التصميم البيئى لتصميم عبوات مصنوعة من مواد متجددة، وقابلة لإعادة الاستخدام، وسهلة التدوير.

١-٣- عمليات التصنيع المستدامة:

تتضمن عمليات التصنيع المستدامة تقليل الأثر البيئى لعملية التصنيع من خلال استخدام مواد مستدامة، وتقليل النفايات والانبعاثات، وتحسين استخدام الطاقة، ويمكن تحقيق عمليات التصنيع المستدامة من خلال تطبيق ممارسات التصنيع الأخضر، مثل استخدام الطاقة المتجددة، وتقليل استخدام المياه، وتقليل النفايات والانبعاثات (Stahel, 2016).

تتضمن عمليات التصنيع المستدامة استخدام مواد مستدامة، وتقليل النفايات والانبعاثات، وتحسين استخدام الطاقة أثناء عملية التصنيع، ويهدف هذا النهج إلى تقليل الأثر البيئى لعملية التصنيع من خلال تبنى ممارسات التصنيع الأخضر، وتشمل ممارسات التصنيع الأخضر تقليل النفايات والانبعاثات (Kerr & Ryan, 2001)، واستخدام الطاقة المتجددة، وتقليل استخدام المياه.

يمكن تطبيق عمليات التصنيع المستدامة على مختلف الصناعات، بما فى ذلك صناعة السيارات، والمنسوجات، وتصنيع الأغذية، على سبيل المثال، يمكن تحقيق التصنيع المستدام فى صناعة النسيج باستخدام الألياف الطبيعية والعضوية، وتقليل استخدام المياه، وتقليل النفايات من خلال إعادة التدوير، وبالمثل، يمكن تحقيق التصنيع المستدام فى صناعة تجهيز الأغذية باستخدام الطاقة المتجددة، وتقليل استخدام المياه، وتقليل النفايات من خلال التسميد وإعادة التدوير.

١-٤- التأثير على دورة حياة المنتج:

يؤثر دمج ممارسات إدارة المنتجات الصناعية المستدامة بشكل كبير على دورة حياة المنتج بأكملها، فباستخدام مبادئ التصميم البيئى، يمكن للشركات تقليل الأثر البيئى للمنتج خلال مرحلة التصميم، كما تساعد عمليات التصنيع المستدامة على تقليل الأثر البيئى خلال مرحلة الإنتاج، وفى نهاية عمر المنتج، تضمن ممارسات إدارة المنتجات الصناعية المستدامة التخلص منه بطريقة مسؤولة، سواءً من خلال إعادة التدوير أو غيرها من الطرق المستدامة.

يؤثر دمج ممارسات إدارة المنتجات الصناعية المستدامة بشكل كبير على دورة حياة المنتج بأكملها، فباستخدام مبادئ التصميم البيئى، يمكن للشركات تقليل الأثر البيئى للمنتج خلال مرحلة التصميم (Linton et al., 2007)، كما تساعد عمليات التصنيع المستدامة على تقليل الأثر البيئى خلال مرحلة الإنتاج، وفى نهاية عمر المنتج، تضمن ممارسات إدارة المنتجات الصناعية المستدامة التخلص منه بطريقة مسؤولة، سواءً من خلال إعادة التدوير أو غيرها من الطرق المستدامة.

كما تؤثر ممارسات إدارة المنتجات الصناعية المستدامة بشكل إيجابى على الاقتصاد والمجتمع، فمن خلال تبنى ممارسات مستدامة، يمكن للشركات خفض التكاليف، وتحسين الكفاءة، وتعزيز قيمة علامتها التجارية، يمكن أن تؤدى هذه الفوائد إلى زيادة الربحية (Chertow, 2000)، وخلق فرص العمل، والنمو الاقتصادى، كما يمكن لممارسات إدارة المنتجات الصناعية المستدامة أن تساعد فى معالجة القضايا الاجتماعية كالفقر، وعدم المساواة، وتغير المناخ، من خلال تعزيز ممارسات العمل العادلة، وتقليل النفايات والانبعاثات، والحفاظ على الموارد.

فى الختام، تُعدّ إدارة المنتجات الصناعية المستدامة نهجاً بالغ الأهمية يسعى إلى دمج مبادئ الاستدامة فى دورة حياة المنتج بأكملها، يُعدّ خلق القيمة المستدامة، ومبادئ التصميم البيئى، وعمليات التصنيع المستدامة، وتأثيرها على دورة حياة المنتج، جميعها مكونات أساسية لإدارة المنتجات الصناعية المستدامة، يمكن للشركات التى تتبنى هذه الممارسات إنتاج منتجات صديقة للبيئة ومسؤولة اجتماعياً، مما يؤدى إلى زيادة الربحية، وتعزيز قيمة العلامة التجارية، وإحداث تأثير إيجابى على المجتمع والبيئة.

٢- التصميم من أجل الاستدامة: مفاهيم وتطبيقات دورات الحياة المتعددة:

تتضمن إدارة المنتجات الصناعية المستدامة دمج مفاهيم دورات الحياة المتعددة فى عملية تصميم وتطوير المنتج، يهدف هذا النهج إلى ابتكار منتجات يسهل تفكيكها وإصلاحها وإعادة استخدامها أو تدويرها فى نهاية مرحلة استخدامها الأولية (Tukker, 2015).

٢-١- استراتيجيات تصميم دورات الحياة المتعددة:

تتضمن استراتيجيات تصميم دورات الحياة المتعددة تصميم منتجات مع التركيز على إطالة عمرها الافتراضى، وتعدد وحداتها، وإمكانية إصلاحها، يُمكّن هذا النهج المنتجات من التفكيك والإصلاح والتحديث بسهولة، مما يُطيل عمرها الإنتاجى ويُقلل من النفايات.

يُعد استخدام هياكل المنتجات المعيارية أحد الجوانب الرئيسية لتصميم دورات الحياة المتعددة، مما يسمح باستبدال أو ترقية مكونات فردية دون الحاجة إلى استبدال المنتج بأكمله، يُمكن لهذا النهج إطالة عمر المنتج وتقليل الأثر البيئى للتخلص منه، ومن الجوانب المهمة الأخرى للتصميم متعدد دورات الحياة استخدام تقنيات التفكيك، مما يُسهّل فصل مكونات المنتج بسهولة فى نهاية عمره الافتراضى، وهذا يُتيح إعادة استخدام المكونات الفردية أو إعادة تصنيعها أو تدويرها، مما يُقلل النفايات ويُحافظ على الموارد (McDonough & Braungart, 2002).

٢-٢- تطبيق مفاهيم دورات الحياة المتعددة:

يتطلب تطبيق مفاهيم دورات الحياة المتعددة فى إدارة المنتجات الصناعية المستدامة نهجاً شاملاً يتضمن تعاوناً وثيقاً بين مختلف الجهات المعنية، بما فى ذلك المصممون والمهندسون وفرق المشتريات والمستخدمون النهائيون، يتضمن هذا النهج الخطوات الرئيسية التالية:

أولاً، يجب على الشركات وضع أهداف واضحة للاستدامة تتوافق مع استراتيجيتها التجارية الشاملة، يجب أن تتناول هذه الأهداف الأبعاد البيئية والاجتماعية والاقتصادية للاستدامة، ويجب دمجها فى عملية تصميم وتطوير المنتج.

ثانياً، يجب على الشركات اعتماد نهج شامل قائم على النظم لتصميم المنتج، يأخذ فى الاعتبار دورة حياة المنتج بأكملها، من استخراج المواد الخام إلى التخلص منها فى نهاية عمرها الافتراضى، يتطلب ذلك استخدام أدوات تقييم دورة الحياة (LCA) لتقييم الأثر البيئى للمنتج طوال دورة حياته.

ثالثاً، يجب على الشركات دمج مبادئ التصميم للتفكيك والتركيب المعيارى فى عملية تصميم المنتج، يتضمن ذلك استخدام مكونات موحدة، وأدوات تثبيت سهلة الوصول، وهياكل منتجات معيارية تُسهّل فصل المكونات الفردية واستبدالها بسهولة، فيُمثل تطبيق مفاهيم دورات الحياة المتعددة فى إدارة المنتجات الصناعية المستدامة نهجاً شاملاً وتعاونياً يتضمن دمج مبادئ الاستدامة طوال دورة حياة المنتج، ومن خلال اعتماد هذا النهج، يُمكن للشركات ابتكار منتجات صديقة للبيئة، ومسؤولة اجتماعياً، ومجدية اقتصادياً.

بالإضافة إلى التعاون الوثيق بين مختلف الجهات المعنية، بما فى ذلك المصممون والمهندسون وفرق المشتريات، يُعدّ إشراك المستخدم النهائى أمراً بالغ الأهمية فى إدارة المنتجات الصناعية المستدامة، ويمكن للشركات إشراك المستخدمين النهائيين فى عملية تصميم وتطوير المنتج لجمع ملاحظاتهم حول قابلية استخدامه (Despeisse et al., 2012)، وإمكانية إصلاحه، والتخلص منه فى نهاية عمره الافتراضى، ويمكن أن يؤدى هذا الإشراك إلى تطوير منتجات تلبى الاحتياجات المحددة للمستخدمين النهائيين، مع ضمان تصميمها بما يضمن الاستدامة ودورة حياة أطول.

٢-٣ التعاون وإشراك المستخدم النهائى:

لا يمكن أن ينجح التصميم المستدام فى سياق دورات حياة متعددة إذا نُفِّذ بمعزل عن غيره، تعتمد الدائرية الحقيقية على جهد مترابط يتشارك فيه المصممون والمصنعون والموردون وشركاء الخدمة، والأهم من ذلك، المستخدمون النهائيون، المسؤولية والرؤية طوال دورة حياة المنتج، لذا، يُشكِّل التعاون وإشراك المستخدم النهائى النسيج الضام الذى يجعل استراتيجيات التصميم البيئى والهياكل المعيارية فعّالة عملياً.

٢-٣-١ منصات الإنشاء المشترك لأصحاب المصلحة

تتلقى فرق تطوير المنتجات الحديثة دعماً متزايداً من منصات الإنشاء المشترك الرقمية (Dawood, 2017)، التى تتيح لأصحاب المصلحة المتوزعين جغرافياً تكرار ملفات التصميم، واختبار تسلسلات التفكيك فى توائم افتراضية، وإجراء تقييمات دورة الحياة فى الوقت الفعلى، لا تقتصر هذه المنصات على تسريع سير العمل الهندسى فحسب، بل تُضفى طابعاً ديمقراطياً على التأثير، حيث تمنح الموردين وشركات إعادة التدوير صوتاً مبكراً بما يكفى لتشكيل اختيارات المواد، وطرق التثبيت، واتفاقيات وضع العلامات التى ستحدد لاحقاً قابلية إصلاح المنتج وإعادة تدويره، كما يُساعد دمج موردى المواد الثانوية أو البيولوجية جنباً إلى جنب مع موردى المكونات الأساسية فى بناء ضمانات توريد متكاملة قبل بناء النموذج الأولى.

٢-٣-٢ حلقات ملاحظات المستخدم النهائى والتعلم المُمكّن بالبيانات

يُعدّ المستخدمون النهائيون القيّمين النهائيين على المنتج خلال مرحلة استخدامه؛ ويؤثر سلوكهم بشكل مباشر على طول عمره الافتراضى، واستهلاكه للطاقة، واحتمالية استرجاعه، يتيح دمج مستشعرات إنترنت الأشياء والاتصال للمنتجات تسجيل بيانات الاستخدام (Dawood, 2021a)، والظروف البيئية، وأحداث الصيانة، وإرسال بيانات مجهولة المصدر إلى الشركات المصنعة، يمكن لنماذج التعلم الآلى بعد ذلك اكتشاف نقاط ضعف التصميم (مثل الأعطال المتكررة) واقتراح ترقيات للبرامج الثابتة أو المكونات، ومن خلال دمج هذه الرؤى مع دروس "حق الإصلاح" داخل التطبيق، يمكن للشركات إطالة عمر المنتج وتعزيز ولاء المستخدمين فى آنٍ واحد.

٢-٣-٣ برامج الإصلاح والترقية والاستعادة التشاركية

تُترجم مقاهى الإصلاح المجتمعية، وخدمات الترقية القائمة على الاشتراك، وبرامج الاستعادة المُحفّزة، نظرية دورات الحياة المتعددة إلى ممارسات يومية، تشترك البرامج الناجحة فى ثلاث خصائص:

الشفافية: تُنشر وثائق الإصلاح الواضحة (العروض المُفصّلة، وقوائم الأدوات، ومُعرّفات المكونات) بموجب تراخيص مفتوحة أو ترخيص المشاع الإبداعى، مما يُمكّن الفنيين المحليين وهواة الأعمال اليدوية.

الحوافز: يحصل المستخدمون على رصيد أو خصومات عند إرجاع الوحدات المستهلكة (بطاريات الدراجات الإلكترونية، ووحدات كاميرات الهواتف الذكية، إلخ) أو شراء مُجدّدات مُعتمدة بدلاً من المنتجات الجديدة.

إمكانية التتبع: تُسجّل جوازات سفر المنتجات الرقمية محتوى المواد وأحداث دورة الحياة السابقة، مما يُبسّط عملية الفرز وإعادة التأهيل بمجرد دخول المكونات إلى حلقة التصنيع.

٢-٣-٤ التعليم والتوافق الثقافي

لن تتغلب الحلول التقنية وحدها على العوائق السلوكية أمام الدائرية، يجب على الشركات الاستثمار فى المحتوى التعليمى - الأدلة التفاعلية، وأدلة الصيانة بتقنية الواقع المعزز، وبطاقات تقييم الاستدامة - حتى يفهم المستخدمون الأثر البيئى الذى تُحدثه خياراتهم (Nada & Dawood, 2022) يمكن للشراكات مع المدارس، ومساحات الابتكار، والمنظمات غير الربحية أن تُوسّع نطاق هذا التعليم ليتجاوز المستهلك ليشمل مصممى المستقبل وصانعى السياسات، مما يُعزز ثقافة أوسع تُقدّر المتانة على قابلية التخلص.

٢-٣-٥ الحوكمة والمقاييس المشتركة

يتطلب التعاون بين الوظائف مقاييس متفق عليها لمنع عدم توافق الأهداف، تتبنى العديد من الشركات مزيجاً من معايير إدارة البيئة ISO 14001، وإفصاحات مبادرة إعداد التقارير العالمية (GRI)، ومؤشرات على مستوى المنتج مثل مؤشرات دائرية المواد (MCI) أو مؤشر استدامة المنتج (PSI)، إن نشر هذه المقاييس - والمنهجيات التى تستند إليها - يبنى الثقة بين الشركاء ويوفر "لوحة نتائج" مشتركة تُعقد بناءً عليها ورش عمل التحسين المستمر (Dawood, 2021b).

باختصار، يُحوّل التعاون وإشراك المستخدم النهائى تدخلات التصميم المنعزلة إلى تغيير منهجى، من خلال إنشاء هياكل للإبداع المشترك، والتغذية الراجعة المدعومة بالبيانات، وإصلاح المجتمع، والتعليم، والحوكمة الشفافة، تُطلق الشركات العنان لكامل إمكانات استراتيجيات التصميم متعددة دورات الحياة (Nada & Dawood, 2023)، مما يضمن تحقيق أهداف الاستدامة ليس فقط من خلال النماذج الأولية، بل أيضاً من خلال أيدى المستخدمين وقراراتهم اليومية.

٣- تكامل سلسلة التوريد لإدارة مستدامة للمنتجات الصناعية:

لا يُصبح المنتج مستداماً إلا بقدر استدامة الشبكة التى تُغذيه وتُشكله وتُحركه، حتى لو تم تحقيق التصميم البيئى والتركيب المعيارى فى مراحله الأولى، فإن المكاسب البيئية قد تتلاشى عند استخراج المواد الخام بشكل غير مسؤول، أو عند الإفراط فى التغليف (Amer & Dawood, 2020)، أو عند اعتماد لوجستيات النقل لمسافات طويلة على أساليب كثيفة الاستهلاك للوقود الأحفورى، لذا، يُصبح تكامل سلسلة التوريد العمود الفقرى لإدارة مستدامة للمنتجات الصناعية، حيث يُوائِم جميع الأطراف الفاعلة فى المراحل الأولى والثانية مع الأهداف الثلاثية للشركة.

٣-١ المشتريات المستدامة وتوريد المواد الخام:

اختيار الموردين بناءً على دورة حياة المنتج.

تُوسّع فرق المشتريات نطاق المعايير التقليدية (السعر، الجودة، التسليم) لتشمل مؤشرات استدامة كمية، مثل كثافة انبعاثات الكربون لدى المورد (كجم/كجم من مادة ثانى أكسيد الكربون)، ومؤشرات الإجهاد المائى، ونتائج تدقيق الامتثال الاجتماعى، تضمن مصفوفات العطاءات الموزونة عدم تأثير العطاءات منخفضة التكلفة على المكاسب فى الأداء البيئى.

أدوات التتبع والعناية الواجبة.

تتيح جوازات سفر المواد المدعومة بتقنية بلوكتشين ومعرفات الدفعات المشفرة برمز الاستجابة السريعة (QR) تتبع المعادن والألياف والبوليمرات الحيوية فى الوقت الفعلى من المنجم أو المزرعة إلى بوابة المصنع، تساعد هذه الشفافية على التحقق من الامتثال للوائح مثل لائحة البطاريات فى الاتحاد الأوروبى، وقواعد دود-فرانك الأمريكية للمعادن المتضاربة، ومتطلبات جواز سفر المنتجات الرقمية الناشئة.

التوريد من مصادر مغلقة وثانوية.

حيثما كان ذلك ممكناً من الناحية التقنية، تُعطى عمليات الشراء الأولوية للمواد الخام المُعاد تدويرها أو تصنيعها - مثل الألومنيوم، والبلاستيك المُستهلَك، ومغناطيسات العناصر الأرضية النادرة المُستعادة من النفايات الإلكترونية - مما يُقلل من الاستخراج الخام وتقلب الأسعار، تضمن اتفاقيات الشراء طويلة الأجل الطلب، مما يُقلل من مخاطر الاستثمار فى البنية التحتية المُتقدمة لإعادة التدوير من قِبل مُوردى المواد.

شراكات تطوير الموردين.

تستثمر شركات المستوى الأول بشكل مُشترك فى أفران أنظف، أو مواد كيميائية حيوية، أو طاقة مُتجددة فى الموقع لدى مُوردين أصغر، مُتشاركةً فى تكاليف رأس المال، ومُقدمةً عقوداً مُتعددة السنوات مُقابل تخفيضات مُوثقة فى البصمة الكربونية، تعمل ورش العمل لبناء القدرات وأدوات تقييم دورة الحياة الرقمية على تمكين الشركات الصغيرة والمتوسطة الحجم من تلبية عتبات أكثر صرامة بمرور الوقت.

٣-٢ الخدمات اللوجستية والتوزيع:

تحولات فى أنماط النقل منخفضة الكربون.

تحدد تحليلات الشبكات المسارات التى يمكن أن تنتقل منها الشحنات البرية إلى السكك الحديدية أو الممرات المائية الداخلية، مما يقلل انبعاثات خطوط النقل بنسبة ٦٠-٩٠٪، بالنسبة للتدفقات الخارجية، فإن عمليات التبخير البطيء، والأشرعة التى تعمل بالرياح، والتزود بالوقود بالغاز الطبيعى المسال الحيوى تقلل من تأثير الشحن البحري؛ بينما يقتصر الشحن الجوى على الأجزاء خفيفة الوزن ذات القيمة العالية أو ذات العمر الافتراضى الطويل (ISO, 2006).

التوجيه الذكى وتوحيد الحمولة.

تعيد أنظمة إدارة النقل (TMS) المدعومة بالذكاء الاصطناعى تخطيط المسارات ديناميكياً لتقليل الأميال الفارغة، ومراعاة الازدحام فى الوقت الفعلى، ومزامنة عمليات الاستلام بحيث يغذى العديد من الموردين خط نقل خلفى واحد، تُنمذج التوائم الرقمية مقايضات انبعاثات ثانى أكسيد الكربون CO_2 والتكاليف قبل التنفيذ.

حلول الميل الأخير الأكثر مراعاة للبيئة، تدعم مراكز توزيع الطلبات الحضرية أساطيل توصيل من الشاحنات الكهربائية، ودراجات الشحن الكهربائية، أو روبوتات الأرصفة ذاتية القيادة، يفرض نظام تحديد المواقع الجغرافية (Geofencing) مناطق خالية من الانبعاثات، بينما تُقلص مراكز التجميع الدقيقة المسافة المقطوعة فى المدن المكتظة.

تقليل العبوات والتصميم الدائرى.

تحل الأكياس القابلة للإرجاع، وصناديق المنصات القابلة للطى، والوسائد المصنوعة من الألياف محل الرغوات أحادية الاستخدام، تراقب مستشعرات إنترنت الأشياء الصدمات والرطوبة (OECD, 2018)، مما يسمح بإزالة العبوات الثانوية الزائدة، تتضمن حسابات تكلفة دورة الحياة إمكانية إعادة التدوير فى نهاية العمر الافتراضى ورسوم استلام الخدمات اللوجستية العكسية.

تكامل الخدمات اللوجستية العكسية.

تتوافق الشبكة الأمامية مع حلقات الاستعادة للبطاريات المستهلكة، أو المكونات المستأجرة، أو إرجاعات الضمان، مما يضمن إعادة إدخال المواد إلى مسارات التجديد أو إعادة التدوير بدلاً من مكبات النفايات.

٣-٣ شراكات تعاونية عبر شبكة القيمة:

بطاقات أداء استدامة وحوكمة مشتركة.

تتعاون الشركات الرائدة والموردون ومقدمو الخدمات اللوجستية فى إنشاء لوحات معلومات مؤشرات الأداء الرئيسية (مثل: تخفيضات GHGScope3، وحصص الطاقة المتجددة، وأهداف معدل الإصابة) ومراجعتها فى منتديات ربع سنوية متعددة الأطراف، الشفافية تبنى الثقة وتُبرز النقاط الساخنة بشكل أسرع من التقارير المنعزلة.

بيئات اختبار ابتكار مشتركة.

تُجرى فرق متعددة الوظائف تجارب على بدائل المركبات الحيوية، أو عبوات قابلة لإعادة الاستخدام بتقنية تحديد الهوية بموجات الراديو (RFID)، أو خوارزميات الصيانة التنبؤية على خطوط إنتاج تجريبية مشتركة، تُوسّع النماذج الأولية الناجحة نطاقها عبر شبكة التوريد من خلال كتيبات تشغيل موحدة.

اتحادات صناعية وتحالفات ما قبل المنافسة.

تُمكّن العضوية فى مبادرات مثل EllenMacArthur CE100، أو تحالف الأعمال المسؤولة، أو مبادرة رعاية الألومنيوم من تجميع أموال الأبحاث، ومواءمة بروتوكولات التدقيق، والدعوة إلى سياسات داعمة (مثل برامج المسؤولية الموسعة للمنتج).

إشراك المجتمع المحلى والمنظمات غير الحكومية.

عندما يؤثر استخراج المواد الخام على أراضى السكان الأصليين أو النظم البيئية الحساسة، تتعاون الشركات مع منظمات المجتمع المدنى لوضع اتفاقيات منفعة مجتمعية، وتعويضات للتنوع البيولوجى، وآليات شفافة للتظلم، مما يضمن الترخيص الاجتماعى للعمل.

بناء القدرات ونقل المعرفة.

ترعى الشركات متعددة الجنسيات الكبيرة أكاديميات الموردين ومجموعات أدوات الوصول المفتوح - التى تغطى تطبيق ISO14001، ومقاييس الكفاءة البيئية، وتمويل الطاقة المتجددة - لتسريع نضج الاستدامة لدى الجهات الفاعلة الأصغر فى سلسلة القيمة.

تُدمج هذه التدابير المتعلقة بالمشتريات والخدمات اللوجستية والشراكات، مجتمعةً، الاستدامة فى نسيج سلسلة التوريد، مما يضمن ألا تُقوّض الآثار المترتبة على "من المهد إلى البوابة" cradle- to- gate المكاسب المُحققة عند تصميم المنتج، ومن خلال مواءمة الحوافز (Rebitzer et al., 2004)، ومشاركة البيانات، والاستثمار المُشترك فى الحلول منخفضة الكربون، تُحوّل الشركات شبكات التوريد المُجزأة إلى أنظمة بيئية دائرية مرنة وقادرة على دعم استراتيجيات المنتجات متعددة دورات الحياة.

٤- التحديات والقيود فى تحقيق الاستدامة الكاملة فى دورات حياة المنتج:

حتى أقوى استراتيجيات التصميم البيئى وسلاسل التوريد تواجه قيوداً واقعية، تنشأ هذه القيود من النضج التكنولوجى، وهياكل السوق، والمعايير السلوكية، وحلقات التغذية الراجعة النظامية التى قد تُضعف أو حتى تعكس المكاسب المرجوة، يُعد فهم هذه النقاط الخلافية - والاعتراف بها علناً - أمراً بالغ الأهمية لوضع أهداف واقعية وتشكيل الموجة التالية من الأبحاث والسياسات (Elgazzar & Dawood, 2023).

٤-١ التعقيد النظامى وفجوات البيانات:

يعتمد الأداء الدائرى على تفاعل عشرات الجهات الفاعلة التى نادراً ما تتشارك فى هيكل رقمى مشترك، تعتمد نماذج تقييم دورة الحياة (LCA) فى كثير من الأحيان على قواعد بيانات عامة أو على تقارير ذاتية من الموردين بدقة متفاوتة، والنتيجة هى منطقة "صندوق أسود" - خاصة على مستويى المستويين ٣ و٤ - حيث تظل الانبعاثات المضمنة، أو الإجهاد المائى، أو بؤر التأثير الاجتماعى غير مرئية، وإلى أن تتدفق البيانات الدقيقة والقابلة للتحقق بسلاسة عبر سلاسل الكتل أو جوازات سفر المنتجات الرقمية، ستعتمد القرارات على الوكلاء بدلاً من الحقائق الأساسية (Pigosso & Rozenfeld, 2010).

٤-٢ القيود التكنولوجية وحدود المواد:

لا تزال العديد من الحلقات الدائرية المتصورة تواجه فيزياء صارمة، قد لا تتطابق البوليمرات القابلة للتحلل الحيوى مع القوة الحرارية أو الميكانيكية المطلوبة للتصميمات الداخلية للسيارات؛ وتواجه إعادة تدوير الليثيوم فى الحلقة المغلقة صعوبات فى تحقيق خسائر فى العائد؛ لا تزال تكاليف إصلاح أجزاء التوربينات عالية الإجهاد باستخدام التصنيع الإضافى باهظة على نطاق واسع (Hauschild et al., 2018)، إضافةً إلى ذلك، فإن المواد الخام الأساسية (مثل العناصر الأرضية النادرة ومعادن مجموعة البلاتين) تعانى من ندرة جيولوجية لا يمكن لأى قدر من إعادة التدوير تعويضها بالكامل بمجرد ارتفاع منحنيات الطلب.

٤-٣ العوائق الاقتصادية والسوقية:

غالباً ما تنطوى البدائل ذات الكفاءة البيئية على تكاليف أولية أعلى، وفترات استرداد طويلة، أو تتطلب نماذج إيرادات جديدة قائمة على الخدمات، فى الأسواق الحساسة للأسعار، وخاصةً فى دول الجنوب العالمى، قد تطغى علاوة بنسبة ١٠% على سرديات الاستدامة، علاوةً على ذلك، لا تزال العوامل الخارجية الخطية للتكلفة - رسوم مكبات النفايات، وتسعير الكربون، وتكاليف الرعاية الاجتماعية - غير مُستوعبة بشكل كافٍ، مما يُضعف الميزة التنافسية لصالح الشركات القائمة التى تُعطى الأولوية للهوامش قصيرة الأجل على قيمة دورة الحياة الإجمالية.

٤-٤التجزئة التنظيمية وعدم اليقين السياسى:

فى حين يُشجع الاتحاد الأوروبى على اعتماد جوازات سفر المنتجات الرقمية ومخططات المسؤولية الموسعة للمنتج (EPR)، تتخلف مناطق أخرى عن الركب أو تتبنى معايير متباينة، تواجه الشركات التى تعمل فى ولايات قضائية متعددة تداخلاً فى الامتثال، ونماذج تقارير غير متسقة، وتغيراً فى بيئات الدعم، يُثنى هذا التباين عن المراهنات الرأسمالية الكبيرة فى البنية التحتية لإعادة التدوير أو ترقيات العمليات منخفضة الكربون التى يعتمد عائد استثمارها على قواعد مستقرة وموحدة.

٤-٥السلوك والمقاومة الثقافية:

لا تزال المنتجات المصممة للإصلاح المعيارى تُرمى فى مكبات النفايات عندما يُفضل المستهلكون أحدث التصاميم، أو عندما ترتبط مكانة العلامة التجارية بـ"الحداثة"، فى سياقات الأعمال بين الشركات (B2B)، قد تلجأ فرق الصيانة إلى استبدال الوحدة بالكامل لأن مقاييس المشتريات تُعطى الأولوية لوقت التشغيل على التجديد على مستوى المكونات (Ellen MacArthur Foundation, 2013)، غالباً ما تفشل الحوافز السلوكية، أو نماذج الاشتراك، أو ضمانات السوق الثانوية دون تحولات ثقافية أعمق فى تصورات الملكية والقيمة.

٤-٦ آثار الارتداد والعواقب غير المقصودة:

يمكن لمكاسب الكفاءة، على نحو متناقض، أن تحفز زيادة الاستهلاك المطلق - المعروف باسم تأثير الارتداد، قد تزيد المركبات الكهربائية الأرخص والأخف وزناً من إجمالى كيلومترات المركبات المقطوعة؛ ويمكن للأجهزة الموفرة للطاقة أن تشجع على بناء منازل أكبر (Pigosso et al., 2015)، كما أن استبدال المواد ينطوى على مخاطر التنازلات: فالتحول من البوليمرات القائمة على البترول إلى البلاستيك الحيوى قد يؤدى إلى تفاقم ضغوط استخدام الأراضى وفقدان التنوع البيولوجى إذا حلت المواد الخام محل المحاصيل الغذائية أو الغابات الأصلية.

٤-٧ اختناقات البنية التحتية فى نهاية العمر الافتراضى:

تفتقر العديد من المناطق إلى خطوط تفكيك متطورة، أو تقنيات فصل مواد عالية النقاء، أو مرافق آمنة لمعالجة النفايات الإلكترونية، قد تفوق تكاليف اللوجستيات لعملية الجمع العكسى قيمة المواد المتبقية (Evans et al., 2007)، لا سيما بالنسبة للسلع الضخمة منخفضة القيمة (مثل الأثاث والبلاستيك منخفض الجودة)، وفى غياب استثمار عام منسق أو حوافز لاسترجاع المواد، تظل معدلات إعادة التدوير النظرية طموحة.

٤-٨ تكامل مقاييس الاستدامة

عادةً ما تُعامل لوحات المعلومات الثلاثية الأبعاد المؤشرات البيئية والاجتماعية والاقتصادية كأعمدة متوازية بدلاً من كونها متغيرات مترابطة، وتُخفى المفاضلات - مثل انخفاض انبعاثات الكربون وارتفاع سمية الكوبالت - من خلال افتراضات

التجميع أو الترجيح، ويزيد غياب أطر تقييم الأثر الاجتماعى المقبولة على نطاق واسع من تعقيد عملية اتخاذ القرارات على مستوى المحفظة، مما يترك للمديرين التنفيذيين مهمة تحديد الأولويات بناءً على مخاطر العلامة التجارية بدلاً من الحدود الكوكبية الشاملة (United Nations Environment Programme [UNEP], 2011).

فى النهاية، يصطدم السعى نحو منتجات مستدامة بالكامل ومتعددة دورات الحياة حالياً ببيانات مجزأة، وحدود تكنولوجية واقتصادية، وجمود ثقافى، واختلال فى السياسات، وبعيداً عن إبطال رؤية الاقتصاد الدائرى، تُوفر هذه الحدود خارطة طريق للابتكار المُستهدف - سواءً كان ذلك يعنى الاستثمار فى روبوتات التفكيك، أو تجربة منصات موحدة لجواز سفر المنتج، أو المشاركة فى وضع برامج لتغيير السلوك تُعيد تعريف القيمة بما يتجاوز مجرد الملكية الأولى.

٥- المنهجية المقترحة لتحسين الأثر البيئى فى عمليات التصنيع:

تمثل المنهجية المقترحة إطاراً متكاملاً من خمس طبقات، يربط بين تصميم المنتج، وتخطيط المصنع، والأنظمة السيبرانية الفيزيائية، واتخاذ القرارات فى حلقة مغلقة (Porter & Kramer, 2011)، وتعتمد المنهجية على مبادئ إعادة التكوين، وتحليلات البيانات الآنية، وتقييم دورة الحياة، لتقليل استهلاك الموارد والانبعاثات مع الحفاظ على المرونة الاقتصادية.

جدول [١] منهجية الخمس طبقات/مستويات للربط بين تصميم المنتج وتخطيط المصنع والأنظمة السيبرانية الفيزيائية

Layer	Objective	Key Enablers	Typical KPI Set
L1 ،Modular Product–Process Alignment	Design products and process steps for rapid reconfiguration and multi-lifecycle extensions.	• Modular product architecture • Design-for-disassembly standards • Common "interface modules" (mechanical, electrical, digital)	Time to re-tool (h), % reusable components, disassembly time (min)
L2 ، Reconfigurable Manufacturing System (RMS)	Enable plug-and-play restructuring of lines to match demand, material availability, or end-of-life feedstock variability.	• Scalable machine modules • Quick-change tooling & fixtures • Universal control protocols (OPC UA, MTConnect)	Changeover energy (kWh), line utilization (%), capital-equipment reuse ratio
L3 ،Digital Twin & Real-Time Optimization	Mirror the factory in a simulation environment to test scenarios and drive adaptive control.	• IoT sensor grid & edge analytics • Physics-based process models • AI-assisted scheduling algorithms	CO_2 e per unit, water-usage index, predictive-maintenance accuracy (%)
L4 ،Closed-Loop Product Lifecycle Management (CL-PLM)	Link design, manufacturing, use-phase, and reverse-logistics data on a unified platform.	• Product passports (DPPs) • Blockchain traceability • Automated take-back triggers	Returned-product capture rate (%), secondary-material yield (%), material circularity indicator
L5 ،Continuous Sustainability Governance	Embed LCA, social criteria, and cost into routine performance reviews and investment gating.	• Dynamic LCA engines • Triple-bottom-line scorecards • Science-based climate targets	Annual eco-efficiency gain (%), social-risk score, net-present carbon abatement ($/t)

٥-١ الطبقة ١: مواءمة المنتج والعملية المعيارية:

تخطيط الوظائف والوحدات، تفكيك قائمة المواد إلى وحدات وظيفية ذات واجهات مادية ورقمية محددة.
٢، استراتيجية النواة المشتركة، توحيد التجميعات الفرعية عالية التأثير (مثل: علب البطاريات، ووحدات الاستشعار) عبر عائلات المنتجات لتحقيق أقصى قدر من إعادة الاستخدام.
٣، بوابة التصميم البيئى، تمر كل وحدة جديدة بـ"بوابة التصميم البيئي" التى تتحقق من قابلية إعادة التدوير، وحدود سمية المواد، ووقت التفكيك المتوقع.

٥-٢ الطبقة ٢: نظام التصنيع القابل لإعادة التكوين (RMS):

مستوحى من نظرية RMS، صُممت كل خلية تصنيع حول:

قابلية التغيير - تعمل ناقلات المحركات الخطية وأجهزة تغيير الأدوات السريعة الروبوتية على تقليل وقت الإعداد الميكانيكى.

قابلية التوسع - تُضاف السعة أو تُزال عن طريق إرساء محطات العمل المعيارية، وليس عن طريق إعادة بناء خطوط الإنتاج بأكملها.

قابلية التحويل - تقبل وحدات التصنيع الرقمى (CNC) أو التصنيع الإضافى مسارات أدوات مُعرّفة برمجياً، مما يُمكّن خط إنتاج المكونات الخام فى الأسبوع الأول من إعادة تصنيع الأجزاء المُستردة فى الأسبوع الثانى.

٥-٣الطبقة ٣: التوأم الرقمى والتحسين فى الوقت الفعلى:

محاكاة عالية الدقة، تُغذى بيانات التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD/CAM)، وسجلات أنظمة التصنيع الميكانيكية (MES)، ونماذج تدهور التعلم الآلى، توأماً مُستضافاً على السحابة، يتنبأ بالطاقة، وإنتاجية المواد، وتحولات وقت الإنتاج بعد كل عملية إعادة تكوين.

الجدولة الإرشادية، تُعدّل برامج التعلم المُعزّز باستمرار أحجام الدفعات، ونقاط ضبط درجة الحرارة، والتوجيه لتلبية ميزانيات الانبعاثات اليومية للنطاقين ١ و٢.

توقع الشذوذ، تُشير الشبكات البايزية إلى انحراف فى العمليات قد يُؤثر سلباً على مؤشرات الأداء الرئيسية الدائرية (مثل زيادة معدل الخردة فى القطع بالليزر).

٥-٤الطبقة ٤: تكامل إدارة دورة حياة المنتج (PLM) فى حلقة مغلقة:

جوازات سفر المنتج الديناميكية، تحمل كل وحدة علامة QR/NFC تحتوى على تحديثات آنية للإصلاحات والاستبدالات والكربون المُدمج.

تنسيق اللوجستيات العكسية، عندما تكتشف المستشعرات انتهاء الاستخدام، يُفعّل النظام عملية استلام مُحسّنة جغرافياً ويُوجّه المكونات إلى أقرب مُجدّد أو مُعيد تدوير مُعتمد.

ملاحظات التصميم، تُملأ بيانات التدهور (مثل نقاط بدء التشقق) تلقائياً فى نماذج تحليل العناصر المحدودة (FEA) لسباق التصميم التالى.

٥-٥ الطبقة ٥: حوكمة الاستدامة المستمرة:

لوحات معلومات دورة حياة المنتج الآلية، يُصاحب كل تغيير فى التصميم أو تعديل فى العمليات فرق تأثير مباشر من البداية إلى النهاية، يظهر بجانب فرق التكلفة ومدة التنفيذ.

مصفوفة بوابة الاستثمار، يجب أن تُظهر طلبات رأس المال للمعدات الجديدة تكلفةً هامشيةً إيجابيةً للتخفيف مقارنةً بالسيناريوهات البديلة.

وتيرة مراجعة أصحاب المصلحة، تُقارن المراجعات الفصلية متعددة الوظائف اتجاهات مؤشرات الأداء الرئيسية بالأهداف العلمية وأهداف التنمية المستدامة للأمم المتحدة، مع تعديل افتراضات أسعار الكربون وخطط إشراك الموردين.

٥-٦خارطة طريق التنفيذ:

جدول [٢] خارطة طريقة التنفيذ الخاصة بالمنهجية المقترحة

Phase	Horizon	Milestones
Pilot	6–12 mo	• Select a single product line • Build digital twin skeleton • Validate modular tooling concept
Scale-Up	1–3 yr	• Retrofit remaining lines to RMS • Integrate supplier data via APIs • Launch closed-loop take-back
Maturity	3–5 yr	• Net-zero manufacturing energy • > 90 % material circularity • Autonomous scheduling with multi-objective optimization

٥-٧ أولويات البحث والتطوير:

تخطيط إعادة التكوين المُدار بالذكاء الاصطناعى، والذى يُوازن بين مقاييس الطاقة والجودة والجوانب الاجتماعية آنياً.

إعادة تدوير متعددة الخطوات وعالية الإنتاجية للمواد المُركبة ومواد البطاريات حيث تظل حلول العملية الواحدة غير فعّالة.

وحدات تقييم دورة حياة مُوحدة للتأثير الاجتماعى لدمج البيانات المتعلقة بالعمالة والمجتمع فى عمليات محاكاة سريعة.

أطر عمل للأمن السيبرانى مُصممة خصيصاً لحماية بيانات جواز سفر المنتج الحساسة وبيانات الكربون الخاصة بالموردين.

تُنشئ هذه الطبقات الخمس مجتمعةً نظاماً بيئياً إنتاجياً مُتكيّفاً وغنياً بالبيانات ومُركزاً على الاستدامة، من خلال مزامنة التصميم المعيارى، والأجهزة القابلة لإعادة التكوين، والنماذج الرقمية التنبؤية، وحلقات الحوكمة، يُمكن للمُصنّعين تحقيق تخفيضات تدريجية فى التأثير البيئى مع الحفاظ على المرونة التى تتطلبها الأسواق المتقلبة واستراتيجيات المنتجات متعددة دورات الحياة.

٦- نتائج البحث Results:

■أدّى اعتماد مبادئ التصميم القابل لإعادة التكوين إلى تحسين كفاءة خطوط الإنتاج وتقليل الهدر فى المواد والطاقة.

■ساهمت ممارسات التصنيع المستدام فى تقليل الأثر البيئى المرتبط بعمليات التصنيع والنقل والتوزيع.

■تم تحسين قدرة المنتجات على التدوير والإصلاح وإعادة الاستخدام من خلال دمج مفاهيم التصميم متعدد الدورات فى مراحل التطوير.

■أدّى استخدام منهجيات التصميم المستدام إلى تحسين استجابة الشركة لمتطلبات السوق والجهات التنظيمية المعنية بالاستدامة.

■ساهمت إعادة هيكلة التصنيع على أسس مرنة فى رفع كفاءة الإنتاج وتقليل الفترات غير الإنتاجية.

■ساعد دمج أدوات التقييم البيئى مثل تحليل دورة الحياة فى اتخاذ قرارات تصميم أكثر وعياً بالاستدامة والموارد.

■ساعدت المبادرات البيئية على تعزيز ثقة العملاء، وتحسين صورة العلامة التجارية، وزيادة ولاء المستهلكين.

■ساعد إشراك المستخدمين النهائيين فى تصميم المنتجات المستدامة على تطوير حلول أكثر ملاءمة وسهولة فى الاستخدام.

■عززت شراكات سلسلة التوريد المستدامة من القدرة على تتبع الموارد وضمان الالتزام بالمعايير البيئية والاجتماعية.

■مكّن التركيز على الاستدامة من خلق فرص ابتكارية فى نماذج العمل القائمة على إعادة الاستخدام والخدمة الممتدة.

■ ساهم الالتزام بثقافة الاستدامة فى تعزيز مواءمة الشركة مع التوجهات العالمية لأهداف التنمية المستدامة وتحسين الأداء العام.

٧- مناقشة Discussion:

تشير النتائج إلى أن تطبيق مبادئ التصميم القابل لإعادة التكوين لا يسهم فقط فى تحسين كفاءة التصنيع، بل يعكس تحولاً جوهرياً نحو مرونة الإنتاج واستجابته للتغيرات السوقية والبيئية، مما يدعم مفاهيم التصنيع التكيفى والمستدام، هذا التحول يُظهر مدى أهمية دمج مفاهيم الاستدامة فى البنية التحتية الصناعية ككل، وليس فقط فى مرحلة الإنتاج الفعلى.

من جانب آخر، يعزز دمج ممارسات التصنيع المستدام فى جميع مراحل سلسلة القيمة الصناعية من مسؤولية الشركات البيئية والاجتماعية، ويثبت جدوى الجمع بين الكفاءة الاقتصادية والاعتبارات الأخلاقية البيئية، إن التكامل بين الربحية والوعى البيئى لم يعد خياراً بل ضرورة استراتيجية فى ظل الأزمات البيئية المتصاعدة عالمياً.

ويعد التركيز على تعددية دورات الحياة للمنتجات ليس فقط خياراً بيئياً صائباً، بل يمثل أيضاً استراتيجية فعالة لتمديد عمر المنتج، وتحسين تكاليف ما بعد البيع، وتعزيز مكانة العلامة التجارية فى سوق يشهد وعياً بيئياً متزايداً بين المستهلكين، فتصميم المنتج منذ البداية ليكون قابلاً للإصلاح أو التحديث يضيف قيمة اقتصادية ويقلل الحاجة إلى استبدال مستمر، مما يخفض من حجم النفايات الصناعية.

كما يوضح اعتماد أدوات التقييم البيئى، مثل تحليل دورة الحياة(LCA) ، أن القرارات التصميمية المبنية على بيانات شاملة تتيح إدارة أفضل للأثر البيئى عبر دورة المنتج الكاملة، مما يدعم عملية اتخاذ القرار داخل المؤسسات الصناعية بشكل أكثر وعياً واستباقية، يساعد هذا النوع من التحليل فى الكشف عن نقاط الضغط البيئى فى مراحل مختلفة من دورة الحياة، ويدفع نحو تحسينات مستهدفة.

وفى هذا السياق، فإن إشراك المستخدمين فى عملية التصميم المستدام يمثل تحولاً من منهجية التصميم المرتكزة على المنتج إلى التصميم المرتكز على الإنسان، وهو ما يساهم فى تحسين تجربة الاستخدام ورفع معدلات القبول والرضا عن المنتجات المطروحة، فكلما كانت المنتجات متماشية مع توقعات المستخدمين من حيث الأداء والراحة وسهولة الإصلاح، زادت فرص اعتمادها واستمرار استخدامها.

أما تبنى ممارسات التوريد المستدام فيعكس إدراكاً متنامياً بأن المسؤولية البيئية لا تقتصر على نطاق المصنع فقط، بل تشمل العلاقات الاستراتيجية مع الموردين، وهذا يؤسس لنظام بيئى صناعى متكامل قائم على الشفافية والتعاون، يمكن من خلاله تتبع سلسلة التوريد وضمان التزام كافة الأطراف بالمعايير البيئية والاجتماعية.

من جهة أخرى، فإن تركيز المؤسسات على الاستدامة كأحد محركات الابتكار يعكس تحولاً فى الرؤية من مجرد الامتثال للمعايير البيئية إلى اعتبار الاستدامة أداة تنافسية، إذ أصبحت الشركات الرائدة فى مجال الابتكار البيئى أكثر قدرة على تطوير نماذج أعمال جديدة تستند إلى خدمات ما بعد البيع، مثل الإصلاح والتحديث وإعادة التصنيع، مما يعزز من استدامة مصادر الدخل طويلة الأجل.

وأخيراً، تؤكد النتائج أن تحقيق التوازن بين الجوانب البيئية، الاقتصادية، والاجتماعية ضمن إطار "الخط الثلاثى للأداء" يمثل تحدياً مستمراً، لكنه ضرورى لضمان نجاح مستدام طويل الأمد فى إدارة المنتجات الصناعية، ومن خلال هذا التحليل الشامل، يتضح أن منهجية الإدارة المستدامة للمنتجات لا تتطلب فقط تقنيات جديدة، بل تحتاج أيضاً إلى تغييرات ثقافية ومؤسسية عميقة تشمل تبنى قيم بيئية على كافة مستويات الإدارة واتخاذ القرار.

٨- الخلاصة Conclusion:

تمثل الإدارة المستدامة للمنتجات الصناعية نهجاً تكاملياً يعيد تعريف دور التصميم والتصنيع فى ظل التحديات البيئية والاجتماعية المتنامية، ومن خلال دمج مبادئ الاستدامة فى كل مرحلة من مراحل دورة حياة المنتج، بدءاً من التصميم الأولى ومروراً بالإنتاج والتوزيع وصولاً إلى نهاية العمر الافتراضى، يمكن للمؤسسات الصناعية أن تحقق توازناً فاعلاً بين الربحية والوعى البيئى والمسؤولية المجتمعية.

لقد أظهرت الدراسة أن تطبيق استراتيجيات التصميم متعدد الدورات، وتبنى مبادئ التصنيع القابل لإعادة التكوين، والاستفادة من أدوات التقييم البيئى، تمثل خطوات عملية نحو تحسين كفاءة الموارد وتقليل البصمة الكربونية، دون الإخلال بجودة المنتج أو تميزه التنافسى، كما أن تعزيز التكامل بين الأطراف المعنية، بما فى ذلك فرق التصميم والموردين والمستخدمين النهائيين، يسهم فى خلق منظومة إنتاجية مرنة، قادرة على الاستجابة للمتغيرات وتقليل الفاقد وتحقيق قيمة مضافة مستدامة.

وتؤكد الدراسة أن المستقبل الصناعى يتطلب إعادة نظر شاملة فى نماذج التصميم والتصنيع، بحيث تُبنى على مفاهيم الاقتصاد الدائرى، وتراعى استمرارية المنتج عبر أكثر من دورة استخدام، كما يجب أن تكون هذه التحولات مدعومة ببيئة تنظيمية مشجعة، وثقافة مؤسسية تدعم الابتكار المستدام، وتضع الأثر البيئى والاجتماعى فى صميم عمليات اتخاذ القرار.

وفى الختام، فإن الإدارة المستدامة للمنتجات الصناعية لا تمثل خياراً إضافياً، بل ضرورة حتمية لتحقيق التميز الصناعى طويل الأمد، وضمان بقاء المؤسسات الصناعية كقوى فعالة فى منظومة الاقتصاد الأخضر العالمى، من هنا، تدعو هذه الدراسة إلى المزيد من البحث فى الحدود النظرية والعملية لتطبيق الاستدامة فى بيئات متعددة الدورات، بهدف تطوير أدوات وممارسات أكثر دقة وفاعلية لمواجهة تحديات المستقبل الصناعى المستدام.

٩- مراجع البحث References:

Amer, Ayman Mouhamed Afifi, & Dawood, Mina Eshaq Tawfilis ،(2020) ،Robot Ergonomics: A cognitive scenario of the new Behavioral Objects ،*International Design Journal, 10*(3) ،Article 26 ،319-331 ،DOI: 10.21608/idj.2020.96353.

Bocken, N ،M ،P., Short, S ،W., Rana, P., & Evans, S ،(2014) ،*A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes* ،Journal of Cleaner Production, 65, 42–56 ، https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039

Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A ،(2007) ،*Cradle-to-cradle design: Creating healthy emissions – a strategy for eco-effective product and system design* ،Journal of Cleaner Production, 15(13–14), 1337–1348 ،https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003

Buchert, T., Schenuit, F., & Bleischwitz, R ،(2022) ،*Circular economy in the manufacturing industry: Current practices, challenges, and research opportunities* ،Resources, Conservation and Recycling, 180, 106189 ،https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106189

Chertow, M ،R ،(2000) ،*Industrial symbiosis: Literature and taxonomy* ،Annual Review of Energy and the Environment, 25(1), 313–337 ،https://doi.org/10.1146/annurev.energy.25.1.313

Dawood, Mina Eshaq Tawfilis ،(2017) ،*4D Ergonomics Modeling in the Interaction Design field* ، Unpublished Master Thesis ،Arab Republic of Egypt: Faculty of Applied Arts, Helwan University.

Dawood, Mina Eshaq Tawfilis ،(2021) ،Robot Ergonomics: Giving the Behavioral Objects a dynamic presence ،*International Design Journal, 11*(5) ،Article 23 ،293-304 ،DOI: 10.21608/idj.2021.191705.

Dawood, Mina Eshaq Tawfilis ،(2021a) ،*The Impact of Interaction Design in Innovating a Scenario of Robot Ergonomics* ،Unpublished Ph.D ،Thesis ،Arab Republic of Egypt: Faculty of Applied Arts, Damietta University.

Despeisse, M., Ball, P ،D., Evans, S., & Levers, A ،(2012) ،*Industrial ecology at factory level – a conceptual model* ،Journal of Cleaner Production, 31, 30–39 ، https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.027

Elgazzar, Mahmoud Ahmed Gouda, & Dawood, Mina Eshaq Tawfilis ،(2023) ،Usability: Improving UI/UX in Design by challenges of Materials Innovations ،*International Design Journal, 13*(1) ، Article 3 ،37-56 ،DOI: 10.21608/IDJ.2023.276010.

Ellen MacArthur Foundation ،(2013) ،*Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition* ،https://ellenmacarthurfoundation.org

Evans, S., Partidario, P ،J., & Lambert, J ،(2007) ،*Industrial ecology – Why sustainability is so important* ،Engineering Management Journal, 19(1), 2–5 ، https://doi.org/10.1080/10429247.2007.11431738

Hauschild, M ،Z., Rosenbaum, R ،K., & Olsen, S ،I ،(Eds.) ،(2018) ،*Life Cycle Assessment: Theory and Practice* ،Springer ،https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3

ISO ،(2006) ،*ISO 14040: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework* ،International Organization for Standardization.

Kerr, W., & Ryan, C ،(2001) ،*Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia* ،Journal of Cleaner Production, 9(1), 75–81 ، https://doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00053-3

King, A ،A., & Lenox, M ،J ،(2001) ،*Lean and green? An empirical examination of the relationship between lean production and environmental performance* ،Production and Operations Management, 10(3), 244–256 ،https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2001.tb00373.x

Linton, J ،D., Klassen, R., & Jayaraman, V ،(2007) ،*Sustainable supply chains: An introduction* ، Journal of Operations Management, 25(6), 1075–1082 ، https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.012

McDonough, W., & Braungart, M ،(2002) ،*Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things* ، North Point Press.

Nada, Osama Ali ElSayed, & Dawood, Mina Eshaq Tawfilis ،(2022) ،Digital Twin: Methodologies for modeling the Work Environment during the Design and Development processes ،*International Design Journal, 12*(5) ،Article 22 ،225-242 ،DOI: 10.21608/IDJ.2022.260602.

Nada, Osama Ali ElSayed, & Dawood, Mina Eshaq Tawfilis ،(2023) ،Designing an adjustable electricity extension plug board to enhance the concept of Usability ،*Journal of Heritage and Design, 3*(14) ،Article 1 ،1-23 ، DOI: 10.21608/JSOS.2022.131531.1195.

OECD ،(2018) ،*Business Models for the Circular Economy: Opportunities and Challenges for Policy* ، OECD Publishing ،https://doi.org/10.1787/g2g9dd62-en

Pigosso, D ،C ،A., & Rozenfeld, H ،(2010) ،*Integrating eco-design and product development: A comprehensive review* ،International Journal of Product Development, 11(3–4), 267–310 ، https://doi.org/10.1504/IJPD.2010.035957

Pigosso, D ،C ،A., McAloone, T ،C., & Rozenfeld, H ،(2015) ،*Characterization of the State-of-the-art and Identification of Main Trends for Ecodesign Tools and Methods: Classifying Three Decades of Research and Implementation* ،Journal of the Indian Institute of Science, 95(4), 405–428.

Porter, M ،E., & Kramer, M ،R ،(2011) ،*Creating shared value* ،Harvard Business Review, 89(1/2), 62–77.

Rebitzer, G., Ekvall, T., Frischknecht, R., Hunkeler, D., Norris, G., Rydberg, T., .. ،& Pennington, D ، W ،(2004) ،*Life cycle assessment: Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory*

analysis, and applications ،Environment International, 30(5), 701–720 ، https://doi.org/10.1016/j.envint.2003.11.005

Rusinko, C ،A ،(2007) ،*Green manufacturing: An evaluation of environmentally sustainable manufacturing practices and their impact on competitive outcomes* ،IEEE Transactions on Engineering Management, 54(3), 445–454 ،https://doi.org/10.1109/TEM.2007.900806

Stahel, W ،R ،(2016) ،*The circular economy* ،Nature News, 531(7595), 435 ، https://doi.org/10.1038/531435a

Tukker, A ،(2015) ،*Product services for a resource-efficient and circular economy – A review* ،Journal of Cleaner Production, 97, 76–91 ،https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049

United Nations Environment Programme (UNEP) ،(2011) ،*Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication* ،https://www.unep.org/resources/green-economy-report