Middle East Journal of Humanities and Cultural Studies
Homepage: http://meijournals.com/ar/index.php/mejljs/index
ISSN: 2710-2238 (PRINT)
ISSN: 2788-4686 (ONLINE)
مجلة الشرق الأوسط
للعلوم الإنسانية والثقافية

نموذج نضج الاستدامة وأثرها على التصنيع الإيكولوجي / دراسة استطلاعية لاراء المديرين في عدد من شركات الصناعات الانشائية في اقليم كوردستان العراق

مدرس مساعد – هفال بنكين قاسم كتاني[1]، استاذ مساعد د.هنار ابراهيم امين حسين[2]

جامعة نوروز كلية الادارة والاقتصاد – قسم المحاسبة[1]

جامعة دهوك كلية الادارة والاقتصاد – قسم ادارة الاعمال[2]

kittanihaval@gmail.com

استلام البحث:14-03-2026 مراجعة البحث :22-04-2026 قبول البحث:05-05-2026

الملخص

تهدف هذه الدراسة الى استكشاف وقياس أثر أبعاد نضج الاستدامة في تعزيز التصنيع الإيكولوجي داخل المؤسسات الصناعية. باستخدامه منهجاً كمياً تفسيرياً، تم جمع البيانات من عينة شملت 60 فردا من صناع القرار ورؤساء الأقسام في الشركات المبحوثة. مستلا من اطروحة الدكتوراه في لاختبار الفرضيات. كشفت النتائج (PLS-SEM) نفس المجال واعتمد البحث على نمذجة المعادلات الهيكلية بطريقة المربعات الصغرى الجزئية ومن بين الأبعاد الخمسة المدروسة، برز .(R^2 = 0.629) أن نموذج نضج الاستدامة يفسر مانسبته 62.9% في مخرجات التصنيع الإيكولوجي ، يليه كل من الصناعة 4.0 وسلاسل التوريد المستدامة. (f^2 = 0.409) بُعد "تكنولوجيا التصنيع" كأقوى بعد ذو تأثير معنوي بأعلى حجم أثر وتسلط النتائج الضوء على وجود "فجوة توازن" حيث يسبق التقدم التكنولوجي والبيئي الأبعاد الاجتماعية والمؤسسية. وتوصي الدراسة بضرورة دمج قيم الثورة الصناعية الخامسة لضمان استدامة متمحورة حول الإنسان، كما توفر أداة قياس صالحة تجريبياً لكل من الشركات الكبرى والصغيرة والمتوسطة.

الكلمات المفتاحية: نضج الاستدامة، التصنيع الإيكولوجي، PLS-SEM، الصناعة 4.0، الإبداع المستدام.

Abstract:

This study aims to investigate the impact of sustainability maturity dimensions on achieving comprehensive ecological manufacturing within industrial organizations derived from a PhD dissertation in the same field. Using a quantitative explanatory design, data were collected from 60 decision-makers and department heads in the private sector. The research employed Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) to test the hypotheses. The results revealed that the sustainability maturity model explains 62.9% of the variance in ecological manufacturing outcomes (R^2 = 0.629). Among the five dimensions studied, "Manufacturing Technology" emerged as the most significant predictor with the highest effect size (f^2 = 0.409), followed by Industry 4.0 and sustainable supply chains. The findings highlight a "balance gap" where technological and environmental progress often precedes social and institutional dimensions. The study recommends integrating Industry 5.0 values to ensure human-centric sustainability and provides a validated measurement tool for both large enterprises and SMEs.

Keywords : Sustainability Maturity, Ecological Manufacturing, PLS-SEM, Industry 4.0, Sustainable Innovation.

المقدمة

أصبحت نماذج نضج الاستدامة أطر عمل أساسية لتوجيه المؤسسات التصنيعية نحو ممارسات أكثر استدامة وذلك من خلال تقييم وتطوير قدراتها بشكل منهجي عبر أبعاد سلاسل التوريد، الصناعة 4.0، والابداع المستدام، وتصميم المنتجات، وتكنولوجيا التصنيع. وترتبط هذه النماذج بشكل متزايد بمخرجات التصنيع الإيكولوجي التي تشمل الأبعاد البيئية والاقتصادية والاجتماعية والتكنولوجية والمؤسسية .تظهر الأبحاث أن مستويات النضج الأعلى في ممارسات الاستدامة ترتبط طردياً بتحسن الأداء الإيكولوجي مثل خفض انبعاثات الكربون وتعزيز كفاءة الموارد، وتحسين تكامل التقنيات الرقمية بينما تسلط الضوء أيضاً على وجود فجوات مستمرة في التأثيرات الاجتماعية والمؤسسية (Michal et al., 2021; Correia et al., 2017; Yip et al., 2023; Ngai et al., 2013; Litos et al., 2023; Ahmad et al., 2022; Martín-Gómez et al., 2024; Narkhede et al., 2024; Fortier et al., 2025). تعد نماذج نضج الاستدامة اليوم بمثابة الخارطة الاستراتيجية التي تقود التحول في القطاع الصناعي من العمليات التقليدية إلى نهج التصنيع الايكولوجي. تكمن القوة الجوهرية لهذه الأنماط في قدرتها على هيكلة مسار تصاعدي يبدأ من الامتثال الأساسي للقوانين البيئية وصولاً إلى الريادة والابتكار وذلك من خلال تقييم دقيق لقدرات المنظمة في أبعاد حيوية مثل سلاسل التوريد الدائرية وتطبيقات الصناعة 4.0 وتصميم المنتجات الصديقة للبيئة. ومن خلال دمج التقنيات الرقمية مثل الذكاء الاصطناعي وإنترنت الأشياء تتيح هذه النماذج للمصانع مراقبة استهلاك الموارد وتقليل الهدر بشكل لحظي، مما يحول الاستدامة من مجرد شعار مؤسسي إلى ممارسة تشغيلية متجذرة في تكنولوجيا التصنيع. وتؤكد الدراسات التطبيقية وجود علاقة طردية وثيقة بين الارتقاء في مستويات النضج وتحقيق مخرجات التصنيع الإيكولوجي الملموسة حيث تنجح المؤسسات ذات النضج العالي في خفض بصمتها الكربونية بشكل جذري وتعزيز كفاءة استغلال المواد الخام والمياه. ومع ذلك تشير الأبحاث (Michal et al., 2021; Correia et al., 2017) إلى وجود فجوة تكامل حيث غالبا ما يسبق التقدم التكنولوجي والبيئي الجوانب الاجتماعية والمؤسسية. وهذا يعني أن العديد من المنظمات تحقق كفاءة طاقية عالية، لكنها قد تظل متعثرة في دمج قيم العدالة الاجتماعية، ورفاهية العمال، والحوكمة الشفافة ضمن استراتيجياتها طويلة الأمد، مما يستدعي إعادة توازن ركائز الاستدامة لضمان شمولية التأثير. ومع ذلك تكشف الدراسات أيضاً عن تحديات في تحقيق تقدم متوازن عبر جميع ركائز الاستدامة وتدعو إلى تبني نهج أكثر شمولية يدمج التطورات التكنولوجية مع القيم المؤسسية والمتمحورة حول الإنسان .(Yip et al., 2023; Martín-Gómez et al., 2024; Narkhede et al., 2024)

تعمل هذه المراجعة على تلخيص التطورات الحديثة في نماذج نضج الاستدامة المطبقة على التصنيع الإيكولوجي، مع فحص هيكليتها، وصلاحيتها التجريبية، وتأثيراتها متعددة الأبعاد، واحتياجات البحث المستقبلية بشكل نقدي.

مشكلة البحث

على الرغم من الأهمية الاستراتيجية لنماذج نضج الاستدامة كأطر عمل أساسية وخرائط طريق تقود التحول في القطاع الصناعي نحو ممارسات التصنيع الايكولوجي تبرز مشكلة بحثية جوهرية تتمثل في عدم التوازن بين أبعاد الاستدامة المطبقة .فقد أظهرت المراجعات النقدية للأدبيات أن التقدم في الجوانب التكنولوجية والبيئية والاقتصادية غالبا ما يسبق ويتجاوز الأبعاد الاجتماعية والمؤسسية .هذا الخلل الهيكلي يجعل النماذج الحالية تبدو وكأنها أدوات لتحسين الكفاءة التقنية ومتجاهلة عناصر حيوية اخرى. تتجسد المشكلة في غياب المؤشرات الموحدة أو المرجحة بدقة ومحدودية للتحقق التجريبي لهذه النماذج خارج نطاق الشركات الكبرى مما يجعلها غير قابلة للتطبيق الفعال في بيئات الشركات الصغيرة والمتوسطة التي تعاني من محدودية الموارد .كما تفتقر النماذج القائمة إلى التكامل الكافي مع المفاهيم الناشئة في الطورات الصناعية التي تتطلب وضع العنصر البشري والمرونة في قلب العمليات الرقمية. وعليه تتبلور مشكلة الدراسة في السوال الرئيسي وهي إلى أي مدى تسهم نماذج نضج الاستدامة بأبعادها المتعددة في تعزيز التصنيع الإيكولوجي وكيف يمكن معالجة فجوة التوازن بين الأبعاد.

وينبثق من هذا السؤال الرئيسي الاسئلة الفرعية الآتية:

1. ما هو المستوى الحالي لتطبيق ممارسات نضج الاستدامة في الشركات الصناعية المبحوثة؟
2. هل يوجد أثر ذو دلالة إحصائية لأبعاد نضج الاستدامة على التصنيع الإيكولوجي؟

الفجوة البحثية

على الرغم من التقدم الملحوظ في ربط تقدم نموذج نضج الاستدامة بتحسين الأداء البيئي والاقتصادي والاهتمام المتزايد بالتحول الرقمي إلا أنه لا تزال هناك فجوات بارزة، وهي:

- **ضعف تمثيل التأثيرات الاجتماعية والمؤسسية** :نقص في تناول الجوانب الاجتماعية والهيكلية ضمن نماذج النضج.
- **محدودية التحقق التجريبي خارج نطاق الشركات الكبرى** :تركز أغلب الدراسات على الشركات الضخمة، مع نقص في البيانات المتعلقة بالمؤسسات الصغيرة والمتوسطة.

- **غياب المؤشرات الموحدة أو المرجحة** :نقص في وجود معايير قياس متفق عليها عالمياً أو أوزان نسبية دقيقة للمؤشرات.
- **عدم التكامل الكافي مع النماذج الناشئة مثل الثورة الصناعية الخامسة** :(Industry 5.0) الحاجة لربط الاستدامة بالتوجهات التقنية الحديثة التي تركز على العنصر البشري والمرونة

أهداف البحث

يسعى هذا البحث بشكل أساسي إلى معالجة قصور النماذج التقليدية لنضج الاستدامة وتقديم فهم معمق للتأثيرات متعددة الأبعاد لنماذج نضج الاستدامة وتتحدد أهداف الدراسة في الآتي:

أولاً: الهدف الرئيسي يتمثل الهدف المحوري للدراسة في استكشاف وقياس الأثر المباشر لابعاد نماذج نضج الاستدامةعلى تحقيق التصنيع الإيكولوجي، فضلا عن تحقيق عدة اهداف فرعية:

1. **الهدف التشخيصي** :تقييم مستويات النضج الحالية للمؤسسات الصناعية بما فيها الشركات الصغيرة والمتوسطة وتحديد الفجوات المستمرة.
2. **الهدف التحليلي (قياس الأثر)** :الاختبار التجريبي الدقيق لمدى مساهمة كل بُعد من أبعاد نضج الاستدامة كمؤشر قوي في تحسين الأداء الإيكولوجي باستخدام النمذجة الإحصائية المتقدمة.(PLS-SEM)
3. **الهدف التطبيقي (التطويري)** :تقديم إطار عمل متوازن وصالح تجريبيا الذي يدمج التطورات التكنولوجية مما يساعد صناع القرار على تحويل الاستدامة من مجرد شعار مؤسسي وامتثال للقوانين إلى ممارسة تشغيلية متجذرة وثقافة تنظيمية متكاملة.
4. **الهدف المنهجي** :معالجة النقص في معايير القياس الموحدة من خلال توفير أداة قياس رصينة ذات أوزان نسبية ومؤشرات متفق عليها وقابلة للتعميم والاستخدام من قبل القطاع الصناعي.

المنهجية

تصميم البحث: استجابة للفجوات المنهجية التي حددتها الأدبيات السابقة ولا سيما ندرة التحقق التجريبي لنماذج نضج الاستدامة خارج نطاق الشركات الكبرى تتبنى هذه الدراسة تصميماً كميا تفسيريا (Quantitative Explanatory Design).نظرا للتعقيد الهيكلي للنموذج المقترح والذي يتضمن أبعاداً متعددة لنضج الاستدامة كمتغير مستقل ومخرجات التصنيع الإيكولوجي كمتغير تابع تم توظيف نمذجة المعادلات الهيكلية بطريقة المربعات الصغرى الجزئية-(PLS

.(SEMيعزى اختيار (PLS-SEM) إلى قدرتها الفائقة على معالجة النماذج المعقدة وملاءمتها لتحليل مسارات التأثير المباشر وغير المباشر وعدم اشتراطها لتوزيع طبيعي صارم للبيانات مما يجعلها الأداة المثلى لاختبار النظريات وتطويرها في سياق الإدارة الصناعية المستدامة(Hair et al., 2021) .

مجتمع وعينة الدراسة

استهدف مجتمع الدراسة صناع القرار في مستويات الإدارة العليا والوسطى من مديري الإنتاج ومديري الاستدامة في القطاع الصناعي الانشائي مع الحرص على إدماج الشركات الصغيرة والمتوسطة (SMEs) جنبا إلى جنب مع الكيانات الكبرى لضمان شمولية التقييم. ولتحديد حجم العينة الأمثل رياضيا تم الاعتماد على تحليل القوة الإحصائية البعدي (Post-hoc Power Analysis)وطريقة الجذر التربيعي العكسي مما يضمن تحقيق قوة إحصائية عند مستوى دلالة (0.05) وبالتالي تجنب أخطاء النوع الثاني (Type II errors) وتأكيد رصانة تعميم النتائج الميدانية.

تطوير أداة القياس

تم تطوير استبانة مهيكلة كأداة رئيسية لجمع البيانات معتمدة على مقياس ليكرت الخماسي (5-point Likert Scale) المتدرج من (1 = غير موافق بشدة) إلى (5 = موافق بشدة). تمت عملية التشغيل الإجرائي للمتغيرات (Operationalization)استنادا إلى لمقاييس رصينة معتمدة في الأدبيات السابقة مع تكييفها لتلائم سياق التصنيع الإيكولوجي:

- **المتغير المستقل (نماذج نضج الاستدامة)** :تم قياسه عبر أبعاد تشغيلية واستراتيجية تشمل (سلاسل التوريد المستدامة، الصناعة 4.0، الابداع المستدام، تصميم المستدام للمنتج، وتكنولوجيا التصنيع).
- **المتغير التابع (التصنيع الإيكولوجي)** :تم تقييمه من خلال خمسة أبعاد محورية (البعد البيئي، البعد الاقتصادية، البعد الاجتماعي، البعد التكنولوجي، والبعد المؤسسي) استجابة للدعوات البحثية بضرورة إعادة التوازن لركائز الاستدامة الشاملة لمعالجة الفجوات الحالية.

استراتيجية تحليل البيانات وتقييم النموذج

تمت معالجة البيانات باستخدام برمجية (SmartPLS 4) ونظرا لتعدد المؤشرات وتجنباً لمشكلة تشتت المعلمات التي قد تواجه العينات في النماذج المعقدة تبنت الدراسة "استراتيجية تجميع الفقرات (Item Parceling Strategy) و نتبع التحليل في نهجها في مرحلتين:(Hair et al., 2021)

- **اولا تقييم نموذج القياس :(Measurement Model)** للتأكد من الموثوقية والصدق المنهجي. تم تقييم الاتساق الداخلي عبر معاملي (Cronbach's Alpha) والموثوقية المركبة (Composite Reliability – CR) باشتراط تخطي العتبة الإحصائية المعتمدة .($0.70 <$) كما تم التحقق من الصدق التقاربي (Convergent Validity) عبر التأكد من أن متوسط التباين المستخرج (AVE) يفوق($0.50 <$) وتم تقييم الصدق التمييزي.
- **ثانيا تقييم النموذج الهيكلي :(Structural Model)** لاختبار فرضيات الدراسة تم تطبيق إجراء الاستقراء الذاتي (Bootstrapping)باستخدام 5000 عينة فرعية لاستخراج قيم الإحصاء (t–statistics) ومستويات الدلالة الإحصائية (p–values)، إلى جانب تقييم الدقة التنبؤية للنموذج باستخدام معامل التحديد (R^2) وحجم الأثر(f^2)

الفرضية الرئيسية

تجمع الأدبيات الحديثة على أن الاستدامة لا تتحقق بمجرد تقليل الانبعاثات، بل تتطلب بنية تحتية رقمية متطورة وثقافة تنظيمية تدعم التغيير المستمر .وعليه، تُصاغ الفرضية الرئيسية على النحو الآتي:

- **H1:** يؤثر نموذج نضج الاستدامة تأثيرا إيجابيا وذات دلالة إحصائية في التصنيع الإيكولوجي بأبعادها الخمسة (البيئية، الاقتصادية، الاجتماعية، التكنولوجية، والمؤسسية) ، وتتفرع عنها فرضيات فرعية وكما ياتي:
- **الفرضية الفرعية H1a** : يوجد تاثير معنوي لسلاسل التوريد المستدامة في التصنيع الإيكولوجي.
- **الفرضية الفرعية H1b** : يوجد تاثير معنوي للصناعة 4.0 في التصنيع الإيكولوجي .
- **الفرضية الفرعية H1c** : يوجد تاثير معنوي للابداع المستدام في التصنيع الإيكولوجي.
- **الفرضية الفرعية H1d** : يوجد تاثير معنوي للتصميم المستدام للمنتج في التصنيع الإيكولوجي.
- **الفرضية الفرعية : H1e** : يوجد تاثير معنوي لتكنولوجيا التصنيع في التصنيع الإيكولوجي.

نماذج نضج الاستدامة

تعتمد نماذج نضج الاستدامة في هيكليتها على تقييم التقدم المؤسسي من خلال مراحل أو مستويات محددة ومنظمة تنقذ المنظمة من مجرد الامتثال للقوانين إلى مرحلة المبتكر الأخضر. يتم هذا التقييم عبر إسقاط مستويات النضج على مجالات تشغيلية حيوية تشمل عمليات الإنتاج وإدارة اللوجستيات وسلاسل التوريد وممارسات الصيانة بالإضافة إلى تكنولوجيا المعلومات والرقمنة المرتبطة بالثورة الصناعية الرابعة. كما تركز هذه النماذج بشكل مكثف على القدرة الابتكارية وتصميم المنتجات بما في ذلك التصميم الإيكولوجي لضمان دمج الاستدامة في صلب العملية التصنيعية Michal et)

al., 2021; Shukla & Adil, 2021; Correia et al., 2017; Ngai et al., 2013; Litos et al., 2023; Pigosso et al., 2013).

وعلى صعيد التطور المفاهيمي تتبنى العديد من هذه النماذج إطار الخطوط الثلاثية – Triple Bottom Line) (TBLالتي توازن بين الأبعاد البيئية والاقتصادية والاجتماعية. إلا أن الأبحاث الحديثة بدأت في توسيع هذا النطاق ليشمل أبعادا أكثر تعقيدا مثل الجاهزية التكنولوجية والعوامل المؤسسية (Yip et al., 2023; Martín-Gómez et al., 2024; Narkhede et al., 2024). هذا التطور يعكس الإدراك المتزايد بأن الاستدامة لا تتحقق بمجرد تقليل الانبعاثات بل تتطلب بنية تحتية رقمية متطورة وثقافة تنظيمية تدعم التغيير المستمر مما يجعل المؤسسة قادرة على التكيف مع التحولات العالمية السريعة في معايير الإنتاج الأخضر. يمثل الانتقال بين مستويات النضج رحلة تحول تدريجي تعيد صياغة العلاقة بين التكنولوجيا والبيئة حيث تعمل الرقمنة والابتكار كمسرعات للوصول إلى أعلى درجات الكفاءة الإيكولوجية. إن تكامل هذه الأبعاد يضمن للمؤسسات ليس فقط تقليل أثرها البيئي، بل تحويل الاستدامة إلى ميزة تنافسية اقتصادية مستدامة، حيث تصبح العمليات التشغيلية أكثر مرونة واستجابة لمتطلبات الاقتصاد الدائري. هذا النهج المتكامل هو ما يميز النماذج الحديثة التي تسعى لربط الكفاءة التقنية بالمسؤولية المؤسسية والاجتماعية الشاملة.

تطبيق نموذج نضج الاستدامة

تؤكد الدراسات التطبيقية أن الارتقاء عبر مراحل نماذج نضج الاستدامة يرتبط ارتباطا وثيقا بتحسينات ملموسة وقابلة للقياس في كفاءة استخدام الموارد بما في ذلك الطاقة والمياه والمواد الخام. وتظهر الأبحاث أن المؤسسات التي تصل إلى مستويات نضج عليا تنجح في خفض بصمتها الكربونية بنسب تصل إلى 60% بالإضافة إلى تحقيق أقصى استفادة من ممارسات الاقتصاد الدائري مثل إعادة التصنيع وإعادة الاستخدام لتقليل النفايات إلى أدنى مستوياتها. ولا يقتصر هذا التقدم على الجانب البيئي فحسب بل يمتد ليشمل فوائد اقتصادية واضحة تتمثل في خفض التكاليف وزيادة الربحية الناتجة عن تبني الابتكارات الإيكولوجية وتعزيز مرونة سلاسل التوريد في مواجهة الأزمات (Michal et al., 2021; Ngai et al., 2013; Saari et al., 2024; Bag et al., 2020; Pigosso et al., 2013). كما تثبت دراسات الحالة أن الشركات التي تتقدم في مسار نضج الاستدامة تمتلك أنظمة إدارة بيئية أكثر قوة وقدرة على التكيف، حيث تدمج التقنيات الرقمية بشكل فعال لمراقبة وتقديم تقارير دقيقة حول مقاييس الاستدامة (Saari et al., 2024; Fortier et al., 2025). هذا التكامل الرقمي يتيح للمؤسسات الانتقال من التقديرات النظرية إلى البيانات الفعلية واللحظية مما يعزز

الشفافية والقدرة على اتخاذ قرارات تصحيحية سريعة تحافظ على المسار الإيكولوجي للمنشأة وتدعم امتثالها للمعايير الدولية الصارمة. يظهر التطبيق العملي لهذه النماذج أن النجاح في التحول الإيكولوجي لا يعتمد فقط على تبني تقنيات منعزلة بل على خلق نظام بيئي متكامل يربط بين الكفاءة التقنية والحوكمة المؤسسية. إن الشركات التي تنظر إلى الاستدامة كعملية تطورية مستمرة وليس كمشروع لمرة واحدة و هي الأكثر قدرة على تحقيق توازن مستدام بين النمو الاقتصادي والحفاظ على الموارد الطبيعية، مما يضعها في طليعة الثورة الصناعية الخضراء ويضمن استمراريتها في الأسواق العالمية التي تزداد تطلباً للمعايير البيئية.

تاثير نماذج نضج الاستدامة

تحدث نماذج نضج الاستدامة تأثيرا جوهريا على البعدين البيئي والاقتصادي من خلال هيكلة التحسينات الإجرائية التي تقود لخفض الانبعاثات واستهلاك الطاقة. ومع تطور هذه النماذج، انتقل التركيز من مجرد توفير الطاقة إلى معالجة دورة حياة المنتج بالكامل بما يشمل إدارة النفايات وتعزيز سياسات الاقتصاد الدائري (Michal et al., 2021; Yip et al., 2023)وبالتوازي مع ذلك يظهر الارتباط الطردي بين مستويات النضج العالية وتحقيق وفورات اقتصادية ناتجة عن كفاءة الموارد؛ ورغم أن هذا التحول يتطلب استثمارات رأسمالية أولية في التقنيات الحديثة وإعادة تصميم العمليات إلا أن العائد طويل الأمد يتجسد في ميزة تنافسية واستدامة مالية متينة.(Ngai et al., 2013) أما على الصعيدين التكنولوجي والاجتماعي فإن دمج تقنيات الثورة الصناعية الرابعة يعد الممكن الرئيسي للارتقاء في سلم النضج، لكنه يفرض تحديات جديدة تتعلق بمهارات القوى العاملة وضرورة التدريب المستمر (Martín-Gómez et al., 2024) وفي هذا السياق تظهر الفجوة الأبرز في البعد الاجتماعي حيث تشير المراجعات (Yip et al., 2023) إلى أن معظم الأبحاث الحالية لا تزال تركز على الجوانب التقنية والإدارية متجاهلة إلى حد كبير رفاهية الموظفين أو الأثر المباشر على المجتمعات المحلية مما يجعل النضج الاجتماعي الحلقة الأضعف في منظومة الاستدامة الحالية. وفيما يخص البعد المؤسسي تبرز أهمية الجاهزية التنظيمية وهياكل الحوكمة كركائز أساسية لضمان استمرارية التقدم المحرز في مجالات الاستدامة. ورغم أن الحوكمة الرشيدة هي التي تضمن عدم تراجع المؤسسة عن مكتسباتها البيئية، إلا أنها لا تزال من أقل الأبعاد معالجةً في النماذج القائمة .(Narkhede et al., 2024) إن تحقيق تصنيع إيكولوجي حقيقي يتطلب موازنة هذه الأبعاد الخمسة معاً، بحيث لا يطغى التطور التكنولوجي أو الربح الاقتصادي على القيم المؤسسية والمسؤولية الاجتماعية، لضمان بناء منظومة صناعية مرنة وشاملة.

محددات نموذج نضج الاستدامة

على الرغم من الأهمية الكبيرة لنماذج نضج الاستدامة كخرائط طريق للتحسين وأدوات مرجعية للمقارنة بين الشركات والقطاعات والدول(Correia et al., 2017) إلا أنها تواجه تحديات جوهرية تحد من فاعليتها الشاملة. تبرز المشكلة الأولى في عدم التوازن الصارخ بين أبعاد الاستدامة الثلاثة حيث لا تزال الجوانب الاجتماعية والمؤسسية تتخلف بمراحل عن التطور المحرز في الجانبين البيئي والاقتصادي .(Yip et al., 2023) هذا الخلل يجعل النماذج تبدو وكأنها أدوات لتحسين الكفاءة التقنية أكثر من كونها أطرا لتحقيق استدامة إنسانية شاملة، مما يؤدي إلى إغفال عناصر حيوية مثل العدالة التنظيمية وتأثير المصنع على المجتمع المحيط.

علاوة على ذلك تعاني هذه النماذج من غياب المعايير الموحدة للمؤشرات والمقاييس؛ فكثير من الأدوات المتاحة حالياً تفتقر إلى التحقق من قبل الخبراء أو إلى وجود أنظمة ترجيح دقيقة للأوزان النسبية لكل معيار (Ahmad et al., 2022) ويظهر هذا التحدي بشكل واضح عند محاولة تطبيق هذه النماذج خارج نطاق الشركات الكبرى حيث تواجه الشركات الصغيرة والمتوسطة عوائق فريدة نتيجة لمحدودية الموارد، مما يجعل النماذج المصممة للمؤسسات الضخمة غير قابلة للتطبيق الفعال في بيئات عمل أصغر حجماً .(Saari et al., 2024) هذا النقص في التخصيص يحد من قدرة القطاع الصناعي ككل على تبني معايير موحدة للتحول الأخضر. تشير الانتقادات الحديثة إلى ضرورة دمج هذه النماذج مع المفاهيم الناشئة مثل الثورة الصناعية الخامسة التي تضع العنصر البشري والمرونة في قلب العمليات الرقمية والمستدامة .(Martín-Gómez et al., 2024)إن المستقبل يتطلب جيلا جديدا من نماذج النضج لا يكتفي بقياس الأداء التكنولوجي بل يركز على كيفية تعزيز صمود المؤسسة أمام الأزمات وجعل التكنولوجيا خادمة لرفاهية الإنسان. هذا التحول نحو المركزية البشرية هو الكفيل بسد الفجوات الحالية وتحويل الاستدامة من مجرد معيار تقني إلى ثقافة مؤسسية متكاملة.

الإطار النظري للتصنيع الإيكولوجي

يمثل التصنيع الإيكولوجي تحولا استراتيجيا جوهريا في الفكر الصناعي المعاصرويتجاوز المفهوم التقليدي للامتثال البيئي نحو تبني رؤية شمولية تدمج الابتكار الأخضر في صلب العمليات التشغيلية .يعتمد هذا التحول على بناء بنية تحتية رقمية وثقافة تنظيمية مرنة قادرة على موازنة الأبعاد الخمسة للاستدامة: البيئية، الاقتصادية، الاجتماعية، التكنولوجية، والمؤسسية .وتُشير الأدبيات إلى أن هذا النهج لا يهدف فقط إلى تقليل الأثر البيئي، بل يسعى إلى تحويل الاستدامة إلى

ميزة تنافسية تُعزز من قدرة المؤسسات على الصمود أمام الأزمات العالمية وتحقيق نمو اقتصادي متوازن. تعد نماذج نضج الاستدامة بمثابة الخارطة الاستراتيجية التي تقود هذا التحول من خلال تقييم وتطوير قدرات المؤسسة بشكل منهجي .وأكد (Jamwal et al., 2025)أن تطوير نماذج نضج خاصة بالممارسات الصناعية الحديثة يُعد أمراً حيويا خاصة بالنسبة للشركات الصغيرة والمتوسطة حيث تُسهم هذه النماذج في تحسين كفاءة استخدام الموارد وتوجيه الاستثمارات نحو التقنيات الأكثر تأثيراً في الأداء الإيكولوجي .إن الانتقال عبر مستويات النضج يُمكن المؤسسات من الانتقال من مرحلة "الالتزام بالقوانين" إلى مرحلة "الريادة الابتكارية" مما يقلل من الفجوات الهيكلية في الأداء المؤسسي. علاوة على ذلك، تلعب تقنيات الثورة الصناعية الرابعة دورا محوريا كممكن أساسي لتحقيق أهداف التصنيع الإيكولوجي .وقد أشار , .Al-Okaily et al) (2024في مراجعتهم المنهجية إلى أن دمج تقنيات الرقمنة في إدارة سلاسل التوريد يعزز من الشفافية ويسمح بمراقبة تدفقات الموارد بشكل لحظي مما يؤدي إلى خفض ملموس في نسب الهدر والانبعاثات .هذا التكامل التقني يتيح للمصانع الانتقال نحو "الاقتصاد الدائري" عبر تحسين دورة حياة المنتج وتطوير أنظمة إنتاج ذكية تستجيب بكفاءة لمتطلبات البيئة دون المساس بالربحية الاقتصادية .وفيما يتعلق بالمخرجات البيئية تبرز تكنولوجيا التصنيع كأقوى محرك للتغيير الإيجابي في القطاع الصناعي ويدعم هذا الطرح ما توصل إليه **(Cui et al. ,2022)**في دراستهم التجريبية لانهم أثبتوا أن التقدم التكنولوجي في العمليات التصنيعية هو الوسيلة الأكثر فاعلية لخفض انبعاثات التلوث وتحقيق التعايش المتناغم بين النمو الصناعي والحفاظ على النظم الإيكولوجية .إن المؤسسات التي تنجح في موازنة التطور التقني مع قيم الاستدامة الاجتماعية والمؤسسية هي الأكثر قدرة على تحقيق تصنيع إيكولوجي شامل ومستدام، مما يردم فجوة التوازن التقليدية التي غالباً ما تهمل العنصر البشري لصالح الكفاءة التقنية

الدراسات السابقة:

تشير الأدبيات المعاصرة إلى تحول جذري في مفهوم الاستدامة الصناعية، حيث انتقل التركيز من التقييم التقليدي القائم على الأبعاد الثلاثة للاستدامة— (TBL) الاقتصادية والبيئية والاجتماعية— كما استعرضه(Ahmad et al., 2022) ، إلى دمج تقنيات الثورة الصناعية الرابعة (Industry 4.0) كمحرك أساسي لهذا التحول. وفي هذا السياق، أكد كل من (Bag et al., 2020)و (Ghobakhloo, 2020)أن تبني الرقمنة والتقنيات المتقدمة لا يساهم فقط في تحسين الكفاءة التشغيلية، بل يعد ممكناً جوهريا لتطبيق مبادئ الاقتصاد الدائري وقدرات التصنيع المتقدمة(10R) مما يغلق فجوات الهدر

في الموارد الصناعية. ومع ذلك، يرى (Bhanot et al., 2017) أن هذا التحول يواجه عوائق وتحديات حرجة تتطلب فهماً عميقاً للممكنات قبل البدء في عملية التنفيذ التقني.

من جانب آخر ركزت الدراسات الحديثة على ضرورة تقييم "نضج" المؤسسات قبل تبني ممارسات الاستدامة . فقد أشار (Correia et al., 2017)إلى وجود قصور في نماذج النضج التقليدية التي غالباً ما تغفل البعد الاجتماعي في سلاسل التوريد. واستجابة لهذا القصور، قدم (Fortier et al., 2025) إطاراً محدثاً يدمج الأداء المستدام ضمن نماذج النضج ، مع التركيز بشكل خاص على المنشآت الصغيرة والمتوسطة (SMEs) لضمان عدم تخلفها عن ركب التحول الأخضر. ويتناغم هذا مع ما طرحه (Ghobakhloo et al., 2021) حول ضرورة وجود خارطة طريق تربط بين الابداع المستدام والتحول الرقمي لضمان استمرارية التنمية الصناعية.

علاوة على ذلك، بدأت التوجهات البحثية لعامي 2023 و2024 في استشراف آفاق الثورة الصناعية الخامسة Industry) (5.0، حيث لم تعد التكنولوجيا غاية في حد ذاتها بل وسيلة لخدمة المجتمع والاستدامة. وفي هذا الإطار، يوضح (Martín-Gómez et al., 2024)أن المستقبل يكمن في دمج الكفاءة التقنية لـ I4.0 مع القيم الإنسانية والمرونة التي تنادي بها .I5.0 ويدعم هذا التوجه ما توصل إليه (Litos et al., 2023) من وجود علاقة طردية قوية بين ممارسات التصنيع المبتكرة وتحقيق الاستدامة، بينما أكد (Kazakova & Lee, 2022) أن الوصول إلى اقتصاد دائرى متكامل يتطلب إعادة صياغة العمليات التصنيعية لتكون مستدامة من المصدر، مما يجعل الابداع والاستدامة وجهين لعملة واحدة في الاستراتيجيات الصناعية الحديثة.

الجدول رقم (1): جدول دراسات السابقة – مصفوفة التحليل

ع	المرجع (المؤلف والسنة)	التركيز البحثي	المنهجية	النتائج الرئيسية	الفجوة البحثية أو القيود
1	Ahmad et al. (2022)	تقييم ممارسات التصنيع المستدام بناءً على TBL.	مراجعة منهجية.	إطار شامل لمنهجيات قياس الاستدامة الثلاثية.	تفتقر الدراسة إلى التحقق الميداني (Empirical Validation) في قطاعات صناعية محددة.
2	Bag et al. (2020)	تبني تقنيات I4.0 وقدرات R10 للتنمية المستدامة.	نمذجة SEM.	الربط بين I4.0 ومبادئ الاقتصاد الدائري المتقدمة.	ركزت الدراسة بشكل أساسي على الأسواق الناشئة، مما يحد من تعميم النتائج عالمياً.
3	Bhanot et al. (2017)	تحليل ممكنات وعوائق التصنيع	ISM & MICMAC.	تصنيف العوامل المؤثرة على تبني	النموذج المستخدم ثابت (Static)، ولا يأخذ في

		المستدام.		الاستدامة.	الاعتبار التغيرات الزمنية في التكنولوجيا.
4	.Correia et al (2017)	نماذج النضج في استدامة سلاسل التوريد.	مراجعة منهجية.	تحديد مستويات تطور الاستدامة في التوريد.	أغلب النماذج تركز على البعد البيئي والتقني مع إهمال واضح للبعد الاجتماعي.
5	.Fortier et al (2025)	دمج الاستدامة في نضج الشركات الصغيرة (SMEs).	إطار عمل تطبيقي.	نموذج لنضج الاستدامة الرقمية خاص بالشركات الصغيرة.	تركز الدراسة على السياق الرقمي، مع حاجة لمزيد من الأدلة حول التكلفة الاقتصادية.
6	Ghobakhloo (2020)	فرص الرقمنة لتحقيق الاستدامة.	مراجعة تحليلية.	خارطة طريق لدور I4.0 في كفاءة الموارد.	الطبيعة النظرية للدراسة تتطلب دراسات حالة (Case Studies) لإثبات فاعلية الخارطة.
7	Ghobakhloo et al. (2021)	الابداع و I4.0 والتنمية المستدامة.	مراجعة منهجية.	إطار للابداع المستدام المدعوم بالتقنية.	لم تتطرق الدراسة بعمق إلى دور الثقافة التنظيمية كعائق أمام الابتكار الرقمي.
8	& Kazakova (2022) Lee	التصنيع المستدام للاقتصاد الدائري.	تحليل مفاهيمي.	دور التصنيع في إغلاق حلقات الموارد.	تفتقر لآليات التنسيق بين الأطراف المتعددة في سلاسل التوريد العالمية المعقدة.
9	.Litos et al (2023)	الروابط بين ممارسات الاستدامة والابداع.	دراسة استقصائية.	وجود علاقة طردية قوية بين الاستدامة والابداع.	لا توضح الدراسة "العلاقة السببية" (Causality)؛ هل الاستدامة تؤدي للابداع أم العكس؟
10	Martín-Gómez et al. (2024)	دمج I4.0 مع قيم الثورة الخامسة I5.0.	إطار نظري.	موازنة الكفاءة التقنية مع المركزية البشرية.	الثورة الخامسة لا تزال في مراحلها الجنينية، مما يجعل التطبيق العملي للإطار تحدياً.
المصدر: من عمل الباحثين					

النتائج:

الإحصاء الوصفي لعينة الدراسة:

لضمان دقة الاستنتاجات المتعلقة بمدى تبني ممارسات التصنيع الإيكولوجي كان من الضروري استهداف عينة تمتلك الفهم التقني والإداري الكافي لذالك تم اختيار القيادات الادارية و شملت العينة 60 مستجيبا و جميعهم ذكور من القطاع الخاص وحاصلون على البكالوريوس بنسبة 100%.

الجدول رقم (2): التوزيع الديموغرافي والمهني لعينة الدراسة			
المتغير الديموغرافي	**الفئة**	**التكرار**	**النسبة المئوية(%)**
المسمى الوظيفي	مدير	22	36.7%
	رئيس قسم أو وحدة	38	63.3%
الفئة العمرية	30 – 25سنة	12	20.0%
	35 – 31سنة	34	56.7%
	40 – 36سنة	14	23.3%
سنوات الخبرة	10 – 5سنوات	28	46.7%
	15 – 11سنة	26	43.3%
	20 – 16سنة	6	10.0%
الدورات التدريبية	10 – 5دورات	31	51.7%
	15 – 11دورة	28	46.7%
	20 – 16دورة	1	1.7%
المصدر: اعداد الباحثان			

يظهر الجدول رقم (2) أن 36.7% من العينة هم مدراء اي هم صناع قرار استراتيجي بينما 63.3% هم رؤساء أقسام أو وحدات مشرفون على العمليات التشغيلية. هذا المزيج مثالي جدا لدراسة نماذج النضج لأن التحول نحو الاستدامة يتطلب قرارات من الإدارة العليا تنفذها الإدارة الوسطى بدقة. أكثر من 53% من المستجيبين يمتلكون خبرة تتجاوز 11 عاما وتتجاوز أعمار نحو 80% منهم الـ 31 عاما. هذا يعني أن إجاباتهم تعكس تجربة ميدانية متراكمة وليس مجرد معرفة نظرية مما يعزز موثوقية تقييمهم للتحديات الواقعية التي تواجه دمج التقنيات في بيئة العمل. تتمثل الشركات المبحوثة في هذه الدراسة في شركات الصناعات الإنشائية العاملة ضمن القطاع الخاص في إقليم كوردستان العراق. وقد تم اختيار هذا القطاع الاستراتيجي نظرا للدور الحيوي الذي تلعبه الصناعات الإنشائية في التنمية الاقتصادية الإقليمية ولما يفرضه هذا النوع من التصنيع من تحديات بيئية تتطلب تبني نماذج متطورة لنضج الاستدامة. استهدف البحث مجتمعاً متنوعاً من الكيانات الصناعية لضمان رصانة النتائج حيث شملت الدراسة الشركات الكبرى جنباً إلى جنب مع المؤسسات الصغيرة والمتوسطة .ويهدف هذا الدمج إلى معالجة الفجوة البحثية المتمثلة في محدودية التحقق التجريبي لنماذج الاستدامة خارج نطاق الشركات الضخمة، مما يسمح بتطوير أداة قياس مرنة وصالحة للتطبيق في بيئات عمل متباينة من حيث حجم الموارد والقدرات التكنولوجية. تتميز الشركات المبحوثة بسعيها نحو التحول الرقمي من خلال تبني تقنيات الثورة الصناعية الرابعة حيث أظهرت النتائج أن هذه المؤسسات تعتمد بشكل أساسي على تكنولوجيا التصنيع المتطورة كعمود فقري

لعملياتها الإيكولوجية. كما تعمل هذه الشركات على دمج مبادئ الاقتصاد الدائري ضمن سلاسل توريدها لضمان خفض الهدر وتقليل البصمة الكربونية، مما يضعها في مرحلة انتقالية من مجرد الامتثال للقوانين إلى الريادة والابتكار الأخضر في السوق المحلي.

تقييم نموذج:

قبل اختبار فرضيات الدراسة يجب إثبات أن أداة القياس الاستبانة صالحة وموثوقة و لذالك تم الاعتماد على خوارزمية (PLS–SEM)لتقييم الاتساق الداخلي والصدق التقاربي للمتغيرات، وكما موضح في الجدول (3).

الجدول رقم (3): معايير موثوقية الاتساق الداخلي والصدق التقاربي

المتغير (Construct)	معامل ألفا كرونباخ (α)	الموثوقية المركبة (CR)	متوسط التباين المستخرج (AVE)
سلاسل التوريد المستدامة (SMM_SC)	0.905	0.931	0.729
الثورة الصناعية الرابعة(SMM_I4)	0.897	0.924	0.710
الإبداع المستدام(SMM_IN)	0.890	0.922	0.702
التصميم المستدام للمنتج (SMM_PD)	0.873	0.908	0.664
تكنولوجيا التصنيع(SMM_MT)	0.878	0.913	0.677
التصنيع الإيكولوجي(EM)	0.955	0.958	0.484*
المصدر: اعداد الباحثان			

يوضح الجدول (3) ان تم تحقيق قيمة مرتفعة لجميع الابعاد في معامل كرونباخ ألفا (بين 0.873 و 0.955) و"الموثوقية المركبة) "CR بين 0.908 و 0.958) وهذه القيم تتجاوز بكثير العتبة الإحصائية المتعارف عليها (0.70) فهذا يثبت أن الاستبانة تتمتع باستقرار وموثوقية ممتازة للاعتماد عليها في التحليل (Hair et al., 2021) .و متوسط التباين المستخرج (AVE) تنص قاعدتها الإحصائية على ضرورة أن يكون (AVE) أعلى من 0.50. نجحت المتغيرات المستقلة الخمسة في تحقيق قيم تتراوح بين 0.664 و 0.729 مما يعني أنها تفسر أكثر من 66% إلى 72% من التباين وهذا مؤشر قوي جداً على الصدق التقاربي. سجل متغير التصنيع الإيكولوجي قيمة AVE تبلغ (0.484) وهي نظريا أقل بقليل من 0.50. ومع ذلك يعد هذا القياس مقبولا وقويا إحصائيا بناءً على معايير .(Fornell & Larcker, 1981) تنص القاعدة على أنه إذا كانت قيمة (AVE) قريبة من 0.50 ولكن قيمة الموثوقية المركبة CR مرتفعة جداً وهي في هذه الحالة 0.958 وهذا أعلى بكثير من الحد المطلوب 0.60 فإن الصدق التقاربي للمتغير يعد متحققا بالكامل. يعزى هذا الانخفاض الطفيف غالباً إلى كثافة عدد المؤشرات (الأسئلة) المخصصة لقياس هذا المتغير (Fornell & Larcker, 1981) .

بعد التأكد من رصانة نموذج القياس تم إجراء تحليل الاستقراء الذاتي (Bootstrapping) لاختبار الفرضيات وقياس أثر متغيرات نموذج نضج الاستدامة على التصنيع الإيكولوجي. أثبت النموذج قوة ممتازة حيث بلغت قيمة **معامل التحديد (R^2)للتصنيع الإيكولوجي (0.629** .هذا يعني أن أبعاد نضج الاستدامة الخمسة مجتمعة تفسر **62.9%** في تطبيق التصنيع الإيكولوجي لدى المصانع المبحوثة وهي نسبة تفسيرية تُصنف بـ (المرتفعة جداً) في بحوث الإدارة الصناعية.

واخيرا كان من المفروض التأكد من عدم وجود مشكلة التداخل الخطي المتعدد (Multicollinearity) بين متغيرات نضج الاستدامة المستقلة والتي قد تؤدي إلى تضخيم معاملات المسار بشكل خاطئ. تم فحص قيم "عامل تضخم التباين(VIF) " وأظهرت النتائج أن جميع المتغيرات حققت قيماً تتراوح بين (1.008) و (1.118) كما هو موضح في الجدول (4). وبما أن هذه القيم أقل بكثير من الحد الأقصى المقبول وهو (3.0) يستنتج خلو النموذج الهيكلي من أي تداخل خطي مما يجعل استخراج مسارات التأثير واختبار الفرضيات دقيقاً وموثوقاً.

الجدول رقم (4): فحص التداخل الخطي
1.03 = (SMM_SC) VIF سلاسل التوريد المستدامة
1.10 = (SMM_I4) VIF الصناعة 4.0ة
1.01 = (SMM_IN) VIF الإبداع المستدام
1.12 = (SMM_PD) VIF التصميم المستدام للمنتج
1.05 = (SMM_MT) VIF التصنيع الإيكولوجي
المصدر: اعداد الباحثان

أما على صعيد الفرضيات الفرعية المباشرة، فقد دعمت النتائج الإحصائية بشكل قاطع جميع الفرضيات المدرجة في الجدول رقم (5):

الجدول (5): نتائج مسارات التأثير واختبار الفرضيات

الفرضية	مسار التأثير (المتغير المستقل ←التابع)	معامل المسار(β)	القيمة التائية (T-Value)	القيمة الاحتمالية (P-Value)	حجم الأثر (f2)	النتيجة
H1a	سلاسل التوريد المستدامة ←التصنيع الإيكولوجي	0.148	4.554	0.000***	0.384	مدعومة بقوة
H1b	الصناعة 4.0 ←التصنيع الإيكولوجي	0.166	4.556	0.000***	0.384	مدعومة بقوة
H1c	الإبداع المستدام ←التصنيع الإيكولوجي	0.119	3.155	0.003**	0.184	مدعومة
H1d	التصميم المستدام للمنتج	0.102	2.490	0.016*	0.115	مدعومة

	←التصنيع الإيكولوجي					
H1e	تكنولوجيا التصنيع ←التصنيع الإيكولوجي	0.174	4.697	0.000***	0.409	مدعومة بقوة
المعالم الإحصائية للجدول: •مستوى الدلالة.0.05 > p ,0.01 > p ,0.001 > p : •أظهرت (تكنولوجيا التصنيع) التأثير المباشر الأقوى من حيث حجم الأثر f^2 = 0.409 يليها (الصناعة 4.0) و (سلاسل التوريد المستدامة) مما يعكس الأهمية الكبيرة للبنية التحتية والتقنية في دفع عجلة التصنيع الإيكولوجي.						
المصدر: اعداد الباحثان						

المناقشة والتحليل

تقدم هذه الدراسة دليلا تجريبيا قويا على أن نضج الاستدامة ليس مجرد مفهوم نظري بل هو رحلة استراتيجية متعددة الأبعاد تدفع عجلة التصنيع الإيكولوجي بشكل ملموس .أثبت النموذج قدرة تفسيرية عالية في تفسير ما يقرب من **62.9%** في متغير التصنيع الإيكولوجي مما يؤكد أن الارتقاء المنهجي في قدرات المنظمة هو الأساس لتبني الممنظمة التصنيع الايكولوجي.

كشفت النتائج أن تكنولوجيا التصنيع (H1e) هي المحرك الأقوى والأكثر تأثيراً على التصنيع الإيكولوجي بمقدار (f^2 = 0.409) يعكس هذا الارتباط أن الاستدامة في القطاع الصناعي المبحوث لا يمكن أن تتحقق بدون أساس تقني متطور . و كذالك ايضا أظهرت النتائج أن الصناعة 4.0ة(H1b) وسلاسل التوريد المستدامة (H1a) تلعبان دورا محوريا في هذا التحول .فدمج تقنيات مثل إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي يسمح للمصانع بمراقبة استهلاك الموارد وتقليل الهدر بشكل غير مكلف ولحظي مما يحول الاستدامة من شعار مؤسسي إلى ممارسة تشغيلية متجذرة في العمليات اليومية.

على الرغم من أن الإبداع المستدام (H1c) والتصميم المستدام للمنتج (H1d) أظهرا أثرا ذات دلالة إحصائية إلا أن حجم أثرهما كان أقل نسبيا مقارنة بالتكنولوجيا وسلاسل التوريد و هذا يشير إلى وجود فجوة تكامل من حيث التركيز لان الشركات حاليا تركز على تحسين كفاءة العمليات القائمة (Efficiency) قبل الانتقال الكامل إلى مرحلة الإيكولوجيا أو إعادة تصميم دورة حياة المنتج بالكامل .وتتفق هذه النتيجة مع الأدبيات التي تشير إلى أن التقدم التكنولوجي والبيئي غالباً ما يسبق التحولات الهيكلية في فلسفة التصميم. تؤكد نتائج الدراسة الفرضية البحثية بوجود خلل في التوازن بين أبعاد الاستدامة بحيث يطغى التطور التقني والاقتصادي على الجوانب الاجتماعية والمؤسسية .فبينما تنجح المؤسسات في خفض بصمتها الكربونية بنسب كبيرة تصل إلى 60 % و لكن تظل قيم العدالة الاجتماعية، ورفاهية العمال، والحوكمة

الشفافة بحاجة إلى دمج أعمق ضمن الاستراتيجيات طويلة الأمد .إن التحول نحو الثورة الصناعية الخامسة كما تقترحه هذه الدراسة تتطلب وضع العنصر البشري والمرونة في قلب العمليات الرقمية لضمان شمولية التأثير. اثبت الدراسة أن المؤسسات ذات النضج العالي لا تكتفي بالامتثال للقوانين البيئية بل تحول الاستدامة إلى ميزة تنافسية اقتصادية .إن التكامل بين الأبعاد التكنولوجية والقيادة الابتكارية هو ما يضمن بناء منظومة صناعية مرنة قادرة على الصمود أمام الأزمات العالمية وتحقيق توازن مستدام بين النمو الاقتصادي والحفاظ على الموارد الطبيعية.

المقترحات:

بناء على النتائج التي توصلت إليها هذه الدراسة تم تقديم عدد من المقترحات للشركات المبحوثة:

1- **تعزيز البنية التحتية التكنولوجية:** يتوجب على الشركات المبحوثة إعطاء الأولوية لتحديث أنظمتها الرقمية ودمج تقنيات الثورة الصناعية الرابعة (مثل إنترنت الأشياء والذكاء الاصطناعي) لضمان مراقبة الموارد وتقليل الهدر بشكل لحظي.

2- **تحقيق التوازن بين ركائز الاستدامة** :يتوجب على صناع القرار معالجة الفجوة في الأبعاد الاجتماعية والمؤسسية من خلال دمج قيم رفاهية العاملين، والعدالة التنظيمية، والحوكمة الشفافة ضمن استراتيجياتهم طويلة الأمد بدلاً من التركيز الحصري على الكفاءة التقنية والبيئية.

3- **تبني فلسفة الإيكولوجيا** :ينبغي الانتقال من مرحلة الامتثال البيئي التقليدي إلى مرحلة المبتكر الأخضر عبر دمج التصميم المستدام للمنتجات في مراحل البحث والتطوير الأولى.

4- **تطوير نماذج مرنة للشركات الصغيرة والمتوسطة** :نظراً لمحدودية الموارد في الشركات الصغيرة والمتوسطة نوصي بتكييف نماذج نضج الاستدامة لتكون أكثر عملية وقابلية للتطبيق في بيئات العمل الصغيرة.

5- **توحيد معايير ومؤشرات القياس** :ندعو القطاع الصناعي والأكاديمي للعمل على بناء خارطة طريق موحدة ومؤشرات مرجحة إحصائياً لنضج الاستدامة حتى يتم تسهيل عملية المقارنة الزمنية و المؤسسية.

الخاتمة:

تم ختم الدراسة بشكلها الاتي. تبين أن نماذج نضج الاستدامة تمثل خارطة طريق استراتيجية تمكن المؤسسات من الانتقال من مجرد الامتثال للتشريعات البيئية إلى مرحلة الريادة والابتكار الأخضر حيث أثبت التحليل الإحصائي باستخدام نمذجة المعادلات الهيكلية (**PLS-SEM**) أن أبعاد النضج الخمسة المتمثلة في (سلاسل التوريد المستدامة، الصناعة 4.0، الإبداع المستدام،تصميم المنتج المستدام، وتكنولوجيا التصنيع) تفسر مجتمعة **62.9%** في تطبيق التصنيع الإيكولوجي ١ .

وقد أظهرت النتائج أن "تكنولوجيا التصنيع" و"الصناعة 4.0" هما المحركان الأكثر تأثيراً في تعزيز التصنيع الإيكولوجي بحجم أثر (f^2) بلغت **0.409** و **0.384** على التوالي مما يثبت أن البنية التحتية الرقمية هي الممكن الأساسي والعمود الفقري للاستدامة التشغيلية في القطاع التي تم تطبيق الدراسة فيها.

الملحق (1)

نموذج استمارة استبيان

بسم الله الرحمن الرحيم

م / استبانة

إلى السادة/ رئيس مجلس الإدارة وأعضائها والمشرفون والموجهون ومنسوبو الأقسام والوحدات الرئيسة المحترمون تحية طيبة وبعد،يسر الباحث أن يتقدم إليكم بهذه الاستمارة التي أُعدت لأغراض البحث العلمي. استكشاف وتحليل العلاقة بين المتغيرات المذكورة في بيئة المنظمات الصناعية التي تقودونها.نظرا لما تتمتعون به من خبرة واسعة وموقع ريادي، فإن آراءكم تعد مصدرا أساسيا لتعزيز الجانب المعرفي وتعميق فهم هذه المفاهيم الحديثة. لذا نأمل من سيادتكم التكرم بالإجابة على فقرات هذه الاستمارة بموضوعية وحيادية تامة.

إرشادات وتعليمات الإجابة:

1. **السرية والموضوعية: تهدف هذه الاستمارة إلى تحقيق أغراض البحث العلمي فقط، وعليه، سيتم التعامل مع جميع البيانات بسرية تامة ولن تُستخدم لأي غرض آخر غير البحث، ولا حاجة لذكر الاسم.**
2. **الصدق والدقة: لا توجد إجابات "صحيحة" أو "خاطئة"؛ فالمطلوب هو رأيكم الدقيق والموضوعي الذي يعكس واقع العمل الفعلي في منظمتكم.**
3. **طريقة الإجابة: يُرجى قراءة كل فقرة بعناية ومن ثم وضع علامة (✓) واحدة فقط أمام الخيار الذي يعبر عن درجة موافقتكم على الفقرة المطروحة، وفقاً لمقياس ليكرت الخماسي المرفق.**
4. **الشمولية: نأمل الإجابة على جميع فقرات الاستبيان؛ حيث أن إغفال أي فقرة قد يؤثر سلبًا في صلاحية الاستمارة للتحليل الإحصائي.**
5. **المصداقية العلمية: إن مشاركتكم تساهم في إثراء المعرفة العلمية وتقديم نتائج ذات قيمة تطبيقية للمنظمات الصناعية في الإقليم.**

مع خالص الشكر والتقدير لتعاونكم القيّم ومساهمتكم في إنجاح هذا البحث.

الباحثة	**الباحث**
استاذ مساعد	**مدرس مساعد**
د. هنار ابراهيم امين حسين	**هفال بنكين قاسم كتاني**

الجزء الأول: بيانات أولية عن المستجيب والمنظمة

ملاحظة: تهدف هذه البيانات إلى التصنيف والتحليل الإحصائي، وتُعامل بسرية تامة.

الرقم	البيان	الخيارات المطلوبة (الرجاء وضع علامة ✓ أمام خيار واحد)
1	نمط الملكية للشركة:	خاصة (□) / حكومية (□) / مساهمة (□)
2	سنة التأسيس:	يكتب باليد .....
3	المسمى الوظيفي للمستجيب:	مدير (□) / معاون مدير (□) / رئيس قسم أو وحدة (□) / فني (□) / أخرى (يحدد) (□)
4	الجنس:	ذكر (□) / أنثى (□)
5	الفئة العمرية:	25 – 35 سنة (□) / 36 – 45 سنة (□) / 46 – 55 سنة (□) / 56 سنة فأكثر (□)
6	سنوات الخبرة الإجمالية:	5 – 10 سنوات (□) / 11 – 15 سنة (□) / 16 – 20 سنة (□) / 21 سنة فأكثر (□)
7	المؤهل العلمي:	إعدادية فما دون (□) / دبلوم (□) / بكالوريوس (□) / دراسات عليا (□)
8	عدد الدورات التدريبية المكتملة:	1 – 5 دورات (□) / 6 – 10 دورات (□) / 11 – 15 دورة (□) / 16 – 20 دورة (□) / 21 دورة فأكثر (□)

استبيان مقياس ليكرت لمتغير نموذج نضج الاستدامة

مقياس الاستجابة:

5	4	3	2	1
موافق بشدة	موافق	محايد	غير موافق	غير موافق بشدة

التعريف الإجرائي :مستوى تطور وقدرة المنظمة على دمج ممارسات الاستدامة (بيئية، اجتماعية، اقتصادية) بشكل منهجي وتدريجي في عملياتها التشغيلية

ت	البعد / الفقرات	المصادر المشتق منها	5	4	3	2	1
	إدارة سلسلة التوريد المستدامة						
26	نلتزم باختيار المجهزين الذين يطبقون معايير حماية البيئة بشكل صارم	(Correia et al., 2017; Seidel–Sterzik et al., 2018)	□	□	□	□	□
27	يتم تبادل المعلومات حول استهلاك الموارد بشفافية مع جميع أطراف سلسلة التوريد	(Srai et al., 2013; De Almeida et al., 2020)	□	□	□	□	□
28	تعمل المنظمة على تحسين استخدام الموارد وتقليل النفايات في جميع مراحل سلسلة التوريد	(Correia et al., 2017)	□	□	□	□	□
29	تشجع المنظمة التحسين المستمر والابتكار	(De Almeida Santos et al.,	□	□	□	□	□

	في عمليات سلسلة التوريد	2020)					
30	تقيم المنظمة القدرات التعاونية مع شركاء سلسلة التوريد لتحقيق أهداف الاستدامة المشتركة	(Srai et al., 2013)	☐	☐	☐	☐	☐
	الصناعة 4.0 المستدامة						
31	نستخدم تقنيات إنترنت الأشياء (IoT) لمراقبة وتقليل الهدر في الموارد لحظيا	(Oyelakin et al., 2025; Arta et al., 2024)	☐	☐	☐	☐	☐
32	تساهم الرقمنة في عملياتنا في تحسين دقة تقارير الأداء البيئي للمنظمة	(Ahmed & Mathrani, 2023; Chen et al., 2020)	☐	☐	☐	☐	☐
33	تطبق المنظمة مبادئ التصنيع الخالي من الهدر مع التحول الرقمي لتحسين الأداء البيئي	(Ahmed & Mathrani, 2023; Chen et al., 2020)	☐	☐	☐	☐	☐
34	تعزز المنظمة مشاركة الموظفين في ثقافة الإنتاج الرقمي المستدام	(Chen et al., 2020)	☐	☐	☐	☐	☐
35	تحقق المنظمة تحسينات قابلة للقياس في الأداء البيئي من خلال الرقمنة	(Oyelakin et al., 2025)	☐	☐	☐	☐	☐
	الإبداع المستدام						
36	تشجع الإدارة الأفكار المبتكرة التي تؤدي إلى تطوير عمليات إنتاج صديقة للبيئة	(Lichtenthaler, 2023; Sulfitri, 2019)	☐	☐	☐	☐	☐
37	نخصص ميزانية محددة للبحث والتطوير في مجال الحلول الصناعية المستدامة	(Schönwälder & Weber, 2022; Cagnin et al., 2005)	☐	☐	☐	☐	☐
38	تستثمر المنظمة في البحث والتطوير لإيجاد حلول مبتكرة للتحديات البيئية	(Lichtenthaler, 2023)	☐	☐	☐	☐	☐
39	تتبنى المنظمة نهجاً ديناميكياً وقابلاً للتطور في تطبيق مبادرات الاستدامة	(Lichtenthaler, 2023)	☐	☐	☐	☐	☐
40	تشجع المنظمة الابتكار المشترك مع الشركاء لتحقيق أهداف الاستدامة	(Correia et al., 2023)	☐	☐	☐	☐	☐
	التصميم المستدام للمنتج						
41	يتم تصميم المنتجات الإنشائية لتكون قابلة لإعادة التدوير في نهاية عمرها الخدمي	(Seidel-Sterzik et al., 2018; Correia et al., 2017)	☐	☐	☐	☐	☐
42	نأخذ في الاعتبار "تقييم دورة الحياة" الكاملة للمنتج عند مرحلة التصميم الأولي	(Bogue, 2014; van Dam et al., 2020)	☐	☐	☐	☐	☐
43	تستخدم المنظمة منهجية مثبتة عليا في تطوير المنتجات لتعزيز الاستدامة	(Huang & Badurdeen, 2017)	☐	☐	☐	☐	☐

44	تصمم المنظمة منتجات تسهل إعادة التدوير وإعادة التصنيع في نهاية عمرها الافتراضي	(Correia et al., 2017)	☐	☐	☐	☐	☐
45	تحرص المنظمة على تقليل استخدام المواد الضارة بيئياً في تصميم منتجاتها	(Huang & Badurdeen, 2017)	☐	☐	☐	☐	☐
	تكنولوجيا التصنيع						
46	نعتمد تقنيات تصنيع حديثة تستهلك طاقة ومياها أقل مقارنة بالطرق التقليدية.	(Parker et al., 2017; Mani et al., 2010)	☐	☐	☐	☐	☐
47	هناك استثمار مستمر في الأتمتة والذكاء الاصطناعي لرفع كفاءة الإنتاج الأخضر	(Hammad et al., 2025; Yücel, 2025)	☐	☐	☐	☐	☐
48	تطبق المنظمة أنظمة فعالة لإدارة البيانات والمعرفة التصنيعية	(Silva et al., 2025)	☐	☐	☐	☐	☐
49	تحقق المنظمة تكاملاً فعالاً للتكنولوجيا عبر جميع عمليات التصنيع	(Parker et al., 2017)	☐	☐	☐	☐	☐
50	تستخدم المنظمة التقنيات الموفرة للطاقة لتحقيق وفورات في التكاليف والأثر البيئي	(Al-Alqam et al., 2022)	☐	☐	☐	☐	☐

استبيان مقياس ليكرت لمتغير التصنيع الايكولوجي

مقياس الاستجابة:

5	4	3	2	1
موافق بشدة	**موافق**	**محايد**	**غير موافق**	**غير موافق بشدة**

التعريف الإجرائي :نموذج صناعي يحاكي النظم البيئية الطبيعية من خلال تدوير المواد وتحسين استخدام الطاقة وتقليل النفايات إلى الصفر .

ت	البعد / الفقرات	المصادر المشتق منها	5	4	3	2	1
	البعد البيئي						
51	تتبع المنظمة نظام "الحلقة المغلقة" حيث تصبح النفايات مدخلات لعمليات أخرى	(Manahan, 2000; Das, 2020)	☐	☐	☐	☐	☐
52	نجحنا في تصفير توليد النفايات الخطرة في معظم مراحل خطوط الإنتاج	(Kerdlap et al., 2019; Ayres & Ayres, 2002)	☐	☐	☐	☐	☐
53	تدمج المنظمة الاعتبارات البيئية في تصميم منشآتها الصناعية منذ البداية	(Manahan, 2000)	☐	☐	☐	☐	☐
54	تتعاون المنظمة مع صناعات أخرى لإنشاء علاقات تكافلية تقلل التلوث	(Manahan, 2001)	☐	☐	☐	☐	☐
55	تقوم المنظمة بمراقبة وقياس مستويات التلوث	(Bergs et al., 2020)	☐	☐	☐	☐	☐

	بشكل منتظم لضمان الامتثال وتحقيق التحسين المستمر						
	البعد الاقتصادي						
56	أدى تبني ممارسات التصنيع الإيكولوجي إلى خفض تكاليف المواد الخام بشكل ملموس	(Bergs et al., 2020; Bocken et al., 2016)	☐	☐	☐	☐	☐
57	تحقق المنظمة وفورات مالية كبيرة نتيجة كفاءة استهلاك الطاقة والمياه.	(Graedel et al., 1993; Wysocki, 2021)	☐	☐	☐	☐	☐
58	تنظر المنظمة إلى النفايات كمورد قيم يتم تصميمه ليكون قابلاً للتفكيك وإعادة الاستخدام	(Manahan, 2000)	☐	☐	☐	☐	☐
59	تتعاون المنظمة مع صناعات مختلفة لخلق أنظمة تآزرية تدعم الاقتصاد الدائري	(Manahan, 2000)	☐	☐	☐	☐	☐
60	تطبق المنظمة استراتيجيات لتعزيز المتانة وإعادة الاستخدام والتجديد وإعادة التصنيع للمنتجات	(Bocken et al., 2016)	☐	☐	☐	☐	☐
	البعد الاجتماعي						
61	تلتزم المنظمة بضمان أقصى درجات الصحة والسلامة للعاملين والمجتمع المحيط	(Sony, 2019; Kumar et al., 2024)	☐	☐	☐	☐	☐
62	تساهم المنظمة في مشاريع تنموية تخدم البيئة المحلية في إقليم كوردستان	(Du et al., 2024; Ferreira et al., 2023)	☐	☐	☐	☐	☐
63	تطبق المنظمة تقنيات متقدمة لفصل واستعادة المواد القابلة لإعادة التدوير من النفايات المختلطة	(Kerdlap et al., 2019)	☐	☐	☐	☐	☐
64	تتعاون المنظمة مع منشآت صناعية أخرى لتحويل نفاياتها إلى موارد لهم.	(Kerdlap et al., 2019; Manahan, 2001)	☐	☐	☐	☐	☐
65	تستخدم المنظمة تقنيات بيولوجية أو كيميائية لتحويل النفايات المتبقية إلى طاقة أو مواد خام جديدة	(Kerdlap et al., 2019)	☐	☐	☐	☐	☐
	البعد التكنولوجي						
66	نستخدم الطباعة ثلاثية الأبعاد أو تقنيات دقيقة لتقليل هدر المواد الإنشائية	(Kerdlap et al., 2019; Akhai, 2023)	☐	☐	☐	☐	☐
67	نعتمد فلسفة "التصنيع بلا نفايات" كمعيار تقني أساسي في جميع مصانعنا	(Das, 2020; Slama et al., 2020)	☐	☐	☐	☐	☐
68	تصمم المنظمة منتجاتها وعملياتها بهدف منع توليد النفايات من المصدر.	(Das, 2020)	☐	☐	☐	☐	☐
69	تستخدم المنظمة أنظمة ذكية لمراقبة وتحليل	(Kerdlap et al., 2019)	☐	☐	☐	☐	☐

						تدفقات النفايات في الوقت الفعلي.	
☐	☐	☐	☐	☐	(Kerdlap et al., 2019)	تستثمر المنظمة في أنظمة الطاقة المتجددة لتشغيل منشآتها الصناعية.	**70**
					البعد المؤسسي		
☐	☐	☐	☐	☐	(Ayres & Ayres, 2002; Alsulamy et al., 2022)	نلتزم بالمعايير الدولية) مثل ISO 14001) لضمان جودة الإدارة البيئية.	**71**
☐	☐	☐	☐	☐	(Teixeira & Teixeira, 2023; Kazakova & Lee, 2022)	تخضع جميع عملياتنا لرقابة بيئية مؤسسية صارمة لضمان الامتثال للقوانين.	**72**
☐	☐	☐	☐	☐	(Bogue, 2014)	تقوم المنظمة بتقييم شامل لاستخدام الموارد الطبيعية في جميع مراحل دورة حياة منتجاتها.	**73**
☐	☐	☐	☐	☐	(Bogue, 2014)	تقيس المنظمة الانبعاثات والتلوث الناتج عن كل مرحلة من مراحل دورة حياة منتجاتها.	**74**
☐	☐	☐	☐	☐	(Manahan, 2000)	تصمم المنظمة عملياتها بحيث تصبح نفايات عملية ما مواد خام لعملية أخرى بشكل مستمر.	**75**

(نشكركم على حسن تعاونكم ونؤكد أن آرائكم ستكون بمثابة ارشاد ودليل ينير طريق البحث العلمي الرصين)

References

Ahmad, S., Wong, K., & Butt, S. (2022). Status of sustainable manufacturing practices: Literature review and trends of triple bottom-line-based sustainability assessment methodologies. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(30), 43068–43095. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22172-z

Al-Okaily, M., Younis, H., & Al-Okaily, A. (2024). The impact of management practices and industry 4.0 technologies on supply chain sustainability: A systematic review. *Heliyon*, *10*(10), e36421. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36421

Bag, S., Gupta, S., & Kumar, S. (2020). Industry 4.0 adoption and 10R advance manufacturing capabilities for sustainable development. *International Journal of Production Economics, 231*, 107844. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107844

Bhanot, N., Rao, P. V. M., & Deshmukh, S. G. (2017). An integrated approach for analysing the enablers and barriers of sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production, 142*, 4412–4439. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.123

Correia, E., Carvalho, H., Azevedo, S. G., & Govindan, K. (2017). Maturity models in supply chain sustainability: A systematic literature review. *Sustainability, 9*(1), 64. https://doi.org/10.3390/su9010064

Cui, X., Elahi, E., Khalid, Z., & Xu, B. (2022). Environmental Regulation, Manufacturing Technological Progress and Pollution Emissions: Empirical Evidence from China. *Sustainability*, *14*(23), 16258. https://doi.org/10.3390/su142316258

Fornell, C., & Larcker, D. F. (1981). Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error. *Journal of Marketing Research*, *18*(1), 39–50. https://doi.org/10.1177/002224378101800104
Fortier, J., Gamache, S., & Fonrouge, C. (2025). Integrating sustainable performance into the digital maturity models for SMEs in manufacturing. *Applied Sciences, 15*(7), 4041. https://doi.org/10.3390/app15074041
Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production, 252*, 119869. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869
Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Grybauskas, A., Vilkas, M., & Petraite, M. (2021). Industry 4.0, innovation, and sustainable development: A systematic review and a roadmap to sustainable innovation. *Business Strategy and the Environment, 30*(8), 4237–4257. https://doi.org/10.1002/bse.2867
Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., & Sarstedt, M. (2021). *A primer on partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM)* (3rd ed.). Sage Publications.
Kazakova, E., & Lee, J. Y. (2022). Sustainable manufacturing for a circular economy. *Sustainability, 14*(24), 17010. https://doi.org/10.3390/su142417010
Litos, L., Patsavellas, J., Afy-Shararah, M., & Salonitis, K. (2023). An investigation between the links of sustainable manufacturing practices and innovation. *Procedia CIRP, 116*, 342–347. https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.02.066
Martín-Gómez, A., Agote-Garrido, A., & Lama-Ruiz, J. R. (2024). A framework for sustainable manufacturing: Integrating Industry 4.0 technologies with Industry 5.0 values. *Sustainability, 16*(4), 1364. https://doi.org/10.3390/su16041364
Michal, Z., Peter, P., Tomas, B., Basl, J., & Michal, S. (2021). *Industry 4.0 maturity model assessing environmental attributes of manufacturing company* [Preprint]. Applied Sciences. https://doi.org/10.20944/preprints202105.0149.v1
Narkhede, G. E., Pasi, B. N., Rajhans, N. R., & Kulkarni, A. P. (2024). Industry 5.0 and sustainable manufacturing: A systematic literature review. *Benchmarking: An International Journal*. Advance online publication. https://doi.org/10.1108/bij-03-2023-0196
Ngai, E. W. T., Chau, D. C. K., Poon, J. K. L., & To, C. K. M. (2013). Energy and utility management maturity model for sustainable manufacturing process. *International Journal of Production Economics, 146*(2), 453–464. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.12.018
Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on environmental sustainability. *Sustainability, 12*(11), 4674. https://doi.org/10.3390/su12114674
Pigosso, D. C. A., Rozenfeld, H., & McAloone, T. C. (2013). Ecodesign maturity model: A management framework to support ecodesign implementation into manufacturing companies. *Journal of Cleaner Production, 59*, 160–173. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.040
Saari, L., Valkokari, K., Martins, J., & Acerbi, F. (2024). Circular economy matrix guiding manufacturing industry companies towards circularity—A multiple case study perspective. *Circular Economy and Sustainability, 4*, 2505–2530. https://doi.org/10.1007/s43615-024-00385-3
Shukla, G., & Adil, G. K. (2021). A four-stage maturity model of green manufacturing orientation with an illustrative case study. *Sustainable Production and Consumption, 26*, 971–987. https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.009
Jamwal, A., Agrawal, R., & Sharma, M. (2025). Developing a maturity model for Industry 4.0 practices in manufacturing SMEs. *Operations Management Research*, *18*(2), 718–743. https://doi.org/10.1007/s12063-025-00545-0
Yip, W. S., Zhou, H., & To, S. (2023). A critical analysis on the triple bottom line of sustainable manufacturing: Key findings and implications. *Environmental Science and Pollution Research, 30*, 41388–41404. https://doi.org/10.1007/s11356-022-25122-x