SUDAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا
DEANSHIP OF SCIENTIFIC RESEARCH عمـادة البحـث العلمـــي
مجلّة العلوم الإنسانية
JOURNAL OF HUMANITIES SCIENCES (JHS)
Available at: https://repository.sustech.edu/handle/123456789/16997
QUARTERLY PEER-REVIEWED SCIENTIFIC JOURNAL مجلة علميّة محكّمة - فصليّة

دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين كفاءة التصميم الصناعي وتقليل زمن تطوير المنتج: دراسة تحليلية

1/ مهيد مصطفى أبكر شريف

محاضر: جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا/ كلية الفنون الجميلة والتطبيقية – قسم التصميم الصناعي.
muhayad@sustech.edu
+249 91 521 8991

المستخلص:

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين كفاءة التصميم الصناعي، وبيان الكيفية التي يمكن أن تسهم بها في تقليل زمن تطوير المنتج، من خلال دراسة العلاقة بين إمكانات التصنيع بالإضافة ومتطلبات عمليات التصميم والتطوير. واعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي القائم على مراجعة وتحليل الأدبيات العلمية والدراسات السابقة والمراجع المتخصصة والمعايير الفنية ذات الصلة، بهدف تحديد آليات الاستفادة من هذه التقنيات والعوامل المؤثرة في فاعليتها.

وركز التحليل على دور الطباعة ثلاثية الأبعاد في تسريع إنتاج النماذج الأولية، وتقييم البدائل التصميمية، واكتشاف المشكلات في المراحل المبكرة، وتحسين عمليات التعديل والاختبار. وتشير الأدبيات التي تناولتها الدراسة إلى أن توظيف هذه التقنيات يمكن أن يدعم كفاءة بعض مراحل التصميم الصناعي، ويتيح فرصًا لتقليل الزمن اللازم للنمذجة والتقييم، إلا أن حجم هذه المنافع يختلف باختلاف نوع تقنية الطباعة، وخصائص المواد، وتعقيد المنتج، ومستوى خبرة المصمم، ومدى تطبيق مبادئ التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM)، فضلًا عن متطلبات المعالجة اللاحقة والتكلفة وحجم الإنتاج.

واستنادًا إلى تحليل هذه العلاقات، تقترح الدراسة إطارًا تفسيريًا يربط بين توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد وآليات تحسين كفاءة التصميم الصناعي وانعكاساتها المحتملة على زمن تطوير المنتج. وخلصت الدراسة إلى أن الاستفادة من هذه التقنيات ترتبط بحسن اختيارها ودمجها ضمن مراحل تطوير المنتج، وأن تقليل زمن التطوير لا يمثل نتيجة حتمية في جميع التطبيقات، بل يتوقف على الظروف التقنية والتصميمية والتنظيمية. ويظل النموذج التحليلي المقترح بحاجة إلى اختبار تطبيقي للتحقق من العلاقات التي يفترضها.

الكلمات المفتاحية: الطباعة ثلاثية الأبعاد، التصنيع بالإضافة، التصميم الصناعي، كفاءة التصميم الصناعي، النماذج الأولية، زمن تطوير المنتج، التصميم من أجل التصنيع بالإضافة.

Abstract:

This study aimed to analyze the role of three-dimensional (3D) printing technologies in improving industrial design efficiency and to examine the mechanisms through which these technologies may contribute to reducing product development time. The study adopted a descriptive-analytical approach based on reviewing and analyzing relevant scientific literature, previous studies, specialized academic references, and technical standards related to additive manufacturing and product development.

The analysis focused on the role of 3D printing in accelerating prototyping, evaluating design alternatives, identifying design problems at early stages, and supporting design iteration and testing. The reviewed literature suggests that these technologies can improve the efficiency of certain industrial design activities and potentially reduce the time required for prototyping and evaluation. However, the extent of these benefits varies according to the selected printing technology, material properties, product complexity, designer expertise, the application of Design for Additive Manufacturing (DfAM) principles, post-processing requirements, production costs, and production volume.

Based on these relationships, the study proposes a conceptual analytical framework linking the adoption of 3D printing technologies to mechanisms of improving industrial design efficiency and their potential implications for product development time. The study concludes that successful integration of these technologies depends on appropriate technological selection and their effective incorporation into the product development process. Reducing development time is not an inevitable outcome in all applications but depends on technical, design, and organizational conditions. The proposed framework requires further empirical validation.

Keywords: 3D Printing, Additive Manufacturing, Industrial Design, Industrial Design Efficiency, Prototyping, Product Development Time, Design for Additive Manufacturing.

المقدمة:

شهدت تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (Three-Dimensional Printing)، التي تندرج ضمن تقنيات التصنيع بالإضافة (Additive Manufacturing)، تطورًا ملحوظًا في تطبيقاتها الصناعية والتصميمية، نتيجة لقدرتها على تحويل النماذج الرقمية إلى مجسمات مادية من خلال إضافة المادة بصورة متتابعة وفق بيانات التصميم الرقمي. وقد أتاح هذا الأسلوب إمكانات متنوعة لإنتاج النماذج الأولية والأجزاء ذات التكوينات الهندسية المعقدة، بما يوفر بدائل تصنيعية يمكن توظيفها في مراحل مختلفة من تصميم المنتجات وتطويرها (Ngo et al., 2018; Gibson et al., 2021).

وفي مجال التصميم الصناعي، تتجاوز أهمية هذه التقنيات عملية إنتاج المجسمات المادية، لتشمل دعم مراحل تطوير الأفكار التصميمية، وإنتاج النماذج الأولية، وتقييم البدائل، والتحقق من الجوانب الوظيفية والشكلية والإرجونومية للمنتج. وتتيح النماذج المادية للمصممين فرصة اختبار بعض الخصائص التصميمية والكشف المبكر عن المشكلات المحتملة، الأمر الذي قد يساعد في تحسين القرارات التصميمية وتيسير عمليات التعديل قبل الانتقال إلى المراحل المتقدمة من تطوير المنتج (Ulrich et al., 2020).

ويرتبط توظيف هذه الإمكانات بمفهوم التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (Design for Additive Manufacturing – DfAM)، الذي يركز على مواءمة القرارات التصميمية مع خصائص عمليات التصنيع بالإضافة وإمكاناتها وقيودها. ويشمل ذلك مراعاة طبيعة المواد، والتعقيد الهندسي، ودمج المكونات، ومتطلبات الدقة والجودة، وإجراءات المعالجة اللاحقة. ومن ثم، فإن الاستفادة من الطباعة ثلاثية الأبعاد لا تتحدد بمجرد توافر التقنية، وإنما ترتبط بمدى ملاءمتها لمتطلبات المنتج وقدرة المصمم على توظيف خصائصها ضمن منهجية تطوير متكاملة (Gibson et al., 2021).

وانطلاقًا من ذلك، تتناول الدراسة الحالية دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين كفاءة التصميم الصناعي وتقليل زمن تطوير المنتج، بالاعتماد على المنهج الوصفي التحليلي ومراجعة الأدبيات العلمية والدراسات السابقة ذات الصلة. وتركز

الدراسة على المقارنة بين ما تقدمه الأدبيات من أدلة وتفسيرات، وتحليل العلاقات بين التقنية وآليات تحسين كفاءة التصميم وانعكاساتها المحتملة على زمن التطوير، وصولًا إلى اقتراح نموذج تحليلي يوضح هذه العلاقات والعوامل المؤثرة فيها، دون افتراض إثباتها تجريبيًا في نطاق الدراسة الحالية.

مشكلة البحث:

تتناول الأدبيات العلمية تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد من جوانب متعددة تشمل تقنيات التصنيع، وخصائص المواد، والتطبيقات الصناعية، والقيود التقنية والاقتصادية. كما تتناول أدبيات التصميم وتطوير المنتجات أهمية النمذجة الأولية والاختبار والتعديل المتكرر في تحسين عمليات التصميم. وعلى الرغم من الترابط بين هذه الموضوعات، فإن تحديد دور الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين كفاءة التصميم الصناعي يتطلب تحليلًا يتجاوز عرض خصائص التقنية ومزاياها، ليشمل الكيفية التي يمكن أن تنعكس بها تلك الخصائص على مؤشرات الأداء التصميمي وزمن تطوير المنتج (Ngo et al., 2018; Gibson et al., 2021; Ulrich et al., 2020).

وتتمثل الإشكالية البحثية في أن اختصار الزمن اللازم لإنتاج النموذج الأولي باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد لا يعني بالضرورة اختصار الزمن الكلي لتطوير المنتج؛ إذ ترتبط كفاءة عملية التطوير بمراحل متعددة تشمل إعداد التصميم، وإنتاج النماذج، والاختبار، والتقييم، وإجراء التعديلات، والتحقق من ملاءمة المنتج لمتطلبات التصنيع. كما تتأثر إمكانية الاستفادة من هذه التقنيات بعوامل تقنية وتصميمية وتنظيمية، من بينها نوع تقنية الطباعة المستخدمة، وخصائص المواد، وتعقيد المنتج، وحجم الإنتاج، ومستوى خبرة المصمم، ومدى تطبيق مبادئ التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM)، ومتطلبات المعالجة اللاحقة.

وبناءً على ذلك، تتمثل مشكلة الدراسة في أن تقليل الزمن اللازم لإنتاج النماذج الأولية باستخدام تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد لا يعني بالضرورة تقليل الزمن الكلي لتطوير المنتج أو تحسين كفاءة عملية التصميم الصناعي؛ إذ تتداخل في تحديد النتائج عوامل تقنية وتصميمية وتنظيمية متعددة، تشمل نوع التقنية المستخدمة، وخصائص المواد، وتعقيد المنتج، ومتطلبات الاختبار والتعديل والمعالجة اللاحقة. ومن هنا تبرز الإشكالية البحثية في تحديد الكيفية التي ترتبط بها إمكانات هذه التقنيات بمؤشرات كفاءة التصميم الصناعي وزمن تطوير المنتج، والظروف التي قد تعزز هذا الارتباط أو تحد منه.

أسئلة البحث:

السؤال الرئيس:

ما دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين كفاءة التصميم الصناعي وتقليل زمن تطوير المنتج، وما الآليات والعوامل التي تحكم هذه العلاقة في ضوء الأدبيات العلمية؟

الأسئلة الفرعية:

1. ما أوجه توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مختلف مراحل عملية التصميم الصناعي، ولا سيما إنتاج النماذج الأولية واختبارها وتقييمها؟
2. ما الآليات التي يمكن من خلالها أن تسهم تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين مؤشرات كفاءة التصميم الصناعي، من حيث سرعة النمذجة، وتقييم البدائل التصميمية، وجودة القرارات، وكفاءة عمليات التعديل؟
3. كيف يمكن أن يسهم توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تقليل الزمن اللازم لمراحل تطوير المنتج، وما حدود انعكاس ذلك على الزمن الكلي للتطوير وفقًا للأدلة الواردة في الدراسات السابقة؟
4. كيف يمكن بناء نموذج تحليلي مقترح يوضح العلاقة بين توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد، وكفاءة التصميم الصناعي، وزمن تطوير المنتج، مع تحديد الآليات الوسيطة والعوامل المؤثرة في هذه العلاقة، مثل نوع التقنية، وخصائص المواد، وتعقيد المنتج، وخبرة المصمم، وتطبيق مبادئ التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM)؟

أهداف البحث:

الهدف الرئيس:

تحليل دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين كفاءة التصميم الصناعي وتقليل زمن تطوير المنتج

الأهداف الفرعية:

1. تحليل أوجه توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مراحل عملية التصميم الصناعي، مع التركيز على إنتاج النماذج الأولية واختبارها وتقييم البدائل التصميمية.
2. تحديد وتحليل الآليات التي يمكن من خلالها أن تسهم تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين مؤشرات كفاءة التصميم الصناعي، ولا سيما سرعة النمذجة الأولية، وكفاءة تقييم البدائل، وجودة القرارات التصميمية، وعمليات التعديل.
3. تحليل العلاقة بين توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والزمن اللازم لمراحل تطوير المنتج، وتحديد مدى إمكانية انعكاس التحسين في زمن النمذجة والاختبار والتعديل على الزمن الكلي للتطوير، استنادًا إلى الأدلة الواردة في الدراسات السابقة.
4. بناء نموذج تحليلي تفسيري مقترح يربط بين توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد وكفاءة التصميم الصناعي وزمن تطوير المنتج، مع تحديد الدور الوسيط المحتمل لكفاءة التصميم والعوامل المعدّلة لهذه العلاقة، بما يشمل نوع التقنية، وخصائص المواد، وتعقيد المنتج، وخبرة المصمم، وتطبيق مبادئ التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM).

أهمية البحث:

أولًا: الأهمية العلمية:

تنبع الأهمية العلمية للدراسة من الربط النقدي بين إمكانات التصنيع بالإضافة، والمؤشرات التي تُستخدم لتقييم كفاءة التصميم الصناعي، والزمن الكلي لتطوير المنتج. وتُبرز الدراسة دور مبادئ التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM) والعوامل التقنية والتنظيمية في تفسير اختلاف نتائج التوظيف، وتقترح إطارًا تفسيريًا قابلًا للاختبار في بحوث تطبيقية لاحقة.

ثانيًا: الأهمية التطبيقية:

تتمثل الأهمية التطبيقية لهذه الدراسة في إمكانية الإفادة من نتائج التحليل العلمي في دعم القرارات المتعلقة بتوظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد ضمن مراحل التصميم الصناعي وتطوير المنتجات، ولا سيما في إنتاج النماذج الأولية، وتقييم البدائل التصميمية، واختبار الخصائص الوظيفية والشكلية والإرجونومية، وإجراء التعديلات قبل الانتقال إلى مراحل التصنيع المتقدمة.

وتظل الإفادة التطبيقية من نتائج الدراسة مشروطة بملاءمة التقنية المستخدمة للمتطلبات الفنية والاقتصادية والتنظيمية، نظرًا إلى أن الدراسة الحالية تعتمد على تحليل الأدبيات المنشورة ولا تقدم قياسًا ميدانيًا مباشرًا لفاعلية هذه التقنيات.

منهجية البحث:

اعتمد البحث المنهج الوصفي التحليلي من خلال مراجعة نقدية انتقائية لمصادر منشورة ترتبط بتطبيق الطباعة ثلاثية الأبعاد في عملية التصميم، ومؤشرات كفاءة التصميم وزمن التطوير. ولا يتضمن جمع بيانات أولية أو تجربة ميدانية. ويُعامل كل مصدر وفق نوعه: مراجعة تقنية، أو دراسة ممارسة تصميمية، أو اختبار تطبيقي، أو كتاب تأسيسي، أو مواصفة معيارية.

نوع المراجعة ومادة التحليل:

هذه مراجعة نقدية تحليلية (Critical Analytical Literature Review)، وليست مراجعة منهجية شاملة (Systematic Review). وتضم مادة التحليل تسع دراسات منشورة في جدول المقارنة النقدية (2)، بالإضافة إلى كتب تأسيسية ومواصفة ISO/ASTM 52900:2021 لتحديد المفاهيم وتصنيف العمليات، لا لإثبات نتائج زمنية تجريبية.

نطاق اختيار الدراسات ومعاييرها:

اعتمدت الدراسة الاختيار القصدي للأدبيات العلمية المنشورة ذات البيانات الببليوغرافية القابلة للتحقق، وفق مدى ارتباطها المباشر بأهداف البحث وأسئلته. وشملت معايير الإدراج الدراسات التي تناولت تقنيات التصنيع بالإضافة وقيودها، وتطبيقات التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM)، وممارسات التصميم الصناعي، والمؤشرات المرتبطة بكفاءة عمليات التصميم أو زمن تطوير المنتج.

وأُعطيت الأولوية للدراسات المنشورة خلال الفترة (2018–2025)، مع الاستعانة ببعض المراجع التأسيسية السابقة، ومنها دراسة Ford and Despise (2016)، لدعم المناقشة المتعلقة بالجوانب البيئية والاستدامة. واستُبعدت المصادر التي لا ترتبط مباشرة بمحاور الدراسة، أو التي يتعذر التحقق من بيانات نشرها. كما جرى التمييز بين الدراسات التطبيقية والمراجعات العلمية والمصادر المعيارية، دون استخدام الأدلة الوصفية أو الفنية وحدها لإثبات تحسن مؤشرات الأداء أو انخفاض زمن تطوير المنتج.

واستند التحليل النقدي إلى تسع دراسات علمية محددة، جرى تناول سبع منها في المقارنة الأساسية، مع الاستعانة بدراستين حديثتين لتعزيز مناقشة المؤشرات التصميمية والزمنية. وقد صُنفت الأدلة وفق طبيعة الدراسة ومجال تطبيقها والمتغيرات التي تناولتها وحدود الاستدلال بنتائجها.

وتندرج الدراسة ضمن المراجعات النقدية التحليلية للأدبيات العلمية (Critical Analytical Literature Review)، ولا تمثل مراجعة منهجية شاملة (Systematic Review). ولم يتوافر سجل أصلي موثق يتيح إعادة بناء جميع إجراءات البحث والفرز، بما يشمل قواعد البيانات وصيغ الاستعلام وتواريخ البحث وأعداد السجلات المسترجعة والمستبعدة. ويُعد ذلك أحد الحدود المنهجية للدراسة، مما يقتضي تفسير نتائجها في نطاق الأدبيات المختارة دون تعميمها على جميع الدراسات المنشورة في المجال.

التحقق التوثيقي التكميلي:

في 16 أكتوبر 2026، أُجري تحقق توثيقي تكميلي من دراستين محددتين، بالرجوع إلى بيانات النشر والمحتوى العلمي المتاح عبر منصتَي الناشرين Cambridge Core وWiley Online Library، باستخدام معرفَي الكائن الرقمي (DOI): 10.1017/dsj.2023.34 و10.1111/jpim.12673، وذلك للدراستين Budinoff et al. (2024) وRoscoe et al. (2023)، على التوالي.

وركز التحقق على صحة البيانات المرجعية، وطبيعة المنهج المستخدم في كل دراسة، ونطاق الأدلة التي تقدمها بشأن الأداء التصميمي وعمليات تطوير المنتج. وقد استُخدمت نتائج هذا التحقق لدعم التحليل النقدي والتمييز بين التحسينات المرتبطة بأنشطة تصميمية محددة والتغيرات المحتملة في الزمن الكلي لتطوير المنتج.

ويمثل هذا الإجراء تحققًا علميًا تكميليًا محدود النطاق، ولا يُعد بحثًا شاملًا في قواعد البيانات أو بديلًا عن سجل البحث والفرز المنهجي.

خطوات التحليل النقدي:

استُخرجت من كل دراسة محددة في مادة التحليل: بيانات النشر، ونوع المنهج، ومجال التطبيق، والآليات أو المتغيرات المدروسة، والمؤشر المقاس (إن وُجد)، ونتيجته، وحدود التعميم. وصُنفت الأدلة إلى: معرفة تقنية معيارية، وتحليل أو مراجعة منشورة، وتجربة أو حالة تطبيقية. ثم قورنت النتائج حسب أربعة أسئلة البحث، مع فصل أدلة المهام الجزئية عن مؤشرات الزمن الكلي.

التعامل مع اختلاف الأدلة:

في حال اختلاف النتائج، فُسِّر التباين بحسب نوع العملية والمواد وتعقيد المنتج وخبرة المصمم وحجم الإنتاج ونوع الدراسة. ولا يُستدل من سرعة إنتاج النموذج أو نشاط التجميع على اختصار دورة التطوير كاملة. وتُحفظ للدراسات التطبيقية حدود عينتها أو حالتها بدل تعميمها.

طريقة بناء النموذج وحدود الاستدلال:

رُبطت الأدلة التقنية بآليات النمذجة والتقييم والتعديل، ثم بمؤشرات كفاءة التصميم، وأخيرًا باحتمال تأثيرها في زمن تطوير المنتج. ويُقترح هذا التسلسل مسارًا تفسيريًا قابلًا للاختبار وليس نموذج وساطة مثبتًا.

مصادر أخرى وحدود المراجعة:

استُخدمت كتب Gibson et al. (2021)، وPahl et al. (2007)، وUlrich et al. (2020) لبناء الإطار المفاهيمي، ومواصفة ISO/ASTM 52900:2021 لتعريف فئات التصنيع بالإضافة. وهي ليست بديلًا عن بيانات تجريبية. ولا تقدم الدراسة تقديرات كمية مجمعة أو تحليلًا تلويًا أو حصرًا شاملًا لكل دراسات المجال.

الدراسات السابقة:

تُمثل الدراسات السابقة أساسًا علميًا لتحليل العلاقة بين تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد وكفاءة التصميم الصناعي وزمن تطوير المنتج؛ إذ تتيح تحديد مجالات توظيف التصنيع بالإضافة، والآليات التصميمية المرتبطة به، والقيود التي قد تؤثر في فاعليته. وتقتضي طبيعة الدراسة الحالية التمييز بين الدراسات التي تتناول الخصائص التقنية للتصنيع بالإضافة، والدراسات المرتبطة بممارسات التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM)، والدراسات التطبيقية التي تتضمن مؤشرات لقياس الزمن أو الأداء.

يُعرض أدناه تحليل نقدي لتسع دراسات منشورة ذات صلة (2016–2025)، تختلف من حيث نوع الدليل: مراجعات تقنية ومنهجية، ودراسات ممارسة مهنية، ودراسة تجريبية مضبوطة، وتطبيق هندسي، وحالة صناعية طولية. ويجمع الجدول (2) الدراسات التسع ضمن محاور موحدة تتضمن المنهج والمتغيرات وأبرز النتائج وحدود الاستدلال.

أولًا: دراسة Ngo et al. (2018):

تناولت الدراسة مراجعة تقنيات التصنيع بالإضافة والمواد المستخدمة فيها وتطبيقاتها الصناعية والتحديات المرتبطة بها. واعتمد الباحثون تحليل الأدبيات المتعلقة بعمليات التصنيع المختلفة وخصائصها واستخداماتها، مع بيان المزايا والقيود التي تميز تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد.

التعقيب النقدي: تقدم الدراسة أساسًا مناسبًا لفهم الخصائص التقنية والعوامل التي ينبغي مراعاتها عند اختيار طريقة الطباعة، لكنها لا تمثل اختبارًا موحدًا للعلاقة بين استخدام هذه التقنيات وكفاءة التصميم الصناعي والزمن الكلي لتطوير المنتج. ولذلك تُستخدم في البحث الحالي لتفسير الإمكانات والقيود التقنية، دون الاستناد إليها وحدها لإثبات انخفاض زمن التطوير.

ثانيًا: دراسة Ford and Despise (2016):

تناولت الدراسة إمكانات التصنيع بالإضافة في دعم الاستدامة الصناعية، مع التركيز على إعادة تصميم المنتجات والعمليات، وكفاءة استخدام الموارد، والتصنيع حسب الطلب، والتغيرات المحتملة في سلاسل القيمة. واعتمدت الدراسة منهجًا استكشافيًا قائمًا على تحليل بيانات ومعلومات منشورة عن تطبيقات التصنيع بالإضافة.

التعقيب النقدي: تسهم الدراسة في توضيح أن المنافع المتوقعة من التصنيع بالإضافة ترتبط بظروف التطبيق والنظام الإنتاجي، لكنها تركز على الاستدامة ولا تقدم قياسًا مباشرًا شاملًا لكفاءة التصميم الصناعي أو الزمن الكلي لتطوير المنتج. ولذلك تُستخدم بوصفها مرجعًا تأسيسيًا مساندًا لتحليل القيود والجدوى.

ثالثًا: دراسة Pradel et al. (2018a):

هدفت الدراسة إلى تنظيم المعرفة المتاحة بشأن التصميم من أجل التصنيع بالإضافة، وتقديم إطار مفاهيمي يربط هذه المعرفة بمراحل عملية التصميم. واعتمدت تحليلًا وتصنيفًا لـ81 منشورًا علميًا، وزعت موضوعاتها على التصميم المفاهيمي والتجسيدي والتفصيلي، إلى جانب تخطيط العملية التصنيعية واختيارها.

التعقيب النقدي: ترتبط هذه الدراسة مباشرة بموضوع البحث الحالي لأنها تضع DfAM ضمن سياق التصميم الصناعي وتطوير المنتجات، لكنها تركز على تنظيم المعرفة التصميمية ولا تقدم اختبارًا تجريبيًا للعلاقة بين كفاءة التصميم والزمن الكلي لتطوير المنتج.

رابعًا: دراسة Pradel et al. (2018b):

تناولت الدراسة الممارسة المهنية للتصميم من أجل التصنيع بالإضافة، من خلال استبيان استجاب له 110 مصممين، إلى جانب مقابلات شبه منظمة مع 18 مصممًا. وركزت على مدى استخدام المصممين للتقنية في إنتاج الأجزاء النهائية، ومصادر معرفتهم التصميمية، والمعوقات المؤثرة في تطبيق DfAM.

التعقيب النقدي: تقدم هذه الدراسة دليلًا مستمدًا من الممارسة المهنية، وهو ما يجعلها مهمة لتحليل دور خبرة المصمم ومستوى تطبيق DfAM في كفاءة التصميم. إلا أن نتائجها تتعلق بعينة محددة من المصممين ولا تتضمن اختبارًا شاملًا للزمن الكلي لتطوير المنتج، مما يحد من إمكان تعميمها على جميع البيئات الصناعية.

خامسًا: دراسة Holub et al. (2023):

تناولت الدراسة تطبيق منهجية تصميم متقدمة قائمة على مبادئ DfAM والتحسين الطوبولوجي (Topology Optimization) في تطوير مكونات محددة لآلات متحركة، مع المقارنة بين إجراءات التصميم التقليدية والمنهجية المقترحة من حيث زمن التطوير وبعض خصائص المكونات، ومنها الكتلة.

التعقيب النقدي: توفر هذه الدراسة دليلًا تطبيقيًا أكثر مباشرة على إمكانية تحسين زمن نشاط تصميمي محدد باستخدام DfAM والتحسين الطوبولوجي. ومع ذلك، فإن النتائج تتعلق بمكونات وإجراءات تصميم معينة، ولا تعني تحقق النسب نفسها في مختلف المنتجات أو في الزمن الكلي لدورة تطوير المنتج. كما يجب التمييز بين إسهام منهجية التحسين التصميمي وإسهام تقنية التصنيع بالإضافة نفسها، لأن التطبيق يجمع بينهما.

سادسًا: دراسة Murugan and Vinodh (2025):

قدمت الدراسة مراجعة علمية لأدبيات التصميم من أجل التصنيع بالإضافة، تناولت المبادئ والإرشادات والأدوات والطرق المستخدمة للاستفادة من إمكانات عمليات التصنيع بالإضافة ومراعاة قيودها. كما ناقشت مجالات التطبيق والتحديات والفجوات التي تحتاج إلى مزيد من التطوير البحثي.

التعقيب النقدي: تدعم هذه الدراسة تحليل دور مبادئ DfAM في مواءمة القرارات التصميمية مع خصائص التصنيع بالإضافة، لكنها لا تقدم بذاتها قياسًا موحدًا للعلاقة السببية بين تطبيق DfAM وكفاءة التصميم الصناعي وزمن تطوير المنتج. ولذلك تُستخدم لدعم الإطار المفاهيمي وتحديد العوامل ذات الصلة.

سابعًا: دراسة Dash et al. (2025):

هدفت الدراسة إلى تحليل البحوث التي تجمع بين الفرص التي يوفرها التصنيع بالإضافة والقيود التي تفرضها عملياته، ضمن منظور التصميم من أجل التصنيع بالإضافة المزدوج (Dual DfAM). واعتمد الباحثون مراجعة منهجية شملت 148 منشورًا، مع تصنيف موضوعاتها وفق مراحل عملية التصميم وتحليل العلاقات بين الاتجاهات البحثية.

التعقيب النقدي: تقدم هذه الدراسة دليلًا حديثًا ومحددًا على توزيع الاهتمام البحثي بين مراحل التصميم، وتدعم أهمية تحليل العلاقة بين خصائص التصنيع بالإضافة وعملية اتخاذ القرار التصميمي. ومع ذلك، لا ينبغي الاستدلال منها على

انخفاض زمن تطوير المنتج، لأن تركيزها الرئيس ينصب على خرائط المعرفة ومناهج DfAM، وليس على قياس مدد التطوير والتكلفة.

التعقيب النقدي العام على الدراسات السابقة:

تُبرز دراسة Budinoff et al. (2024) أهمية التمييز بين جودة المخرجات وزمن المهمة: ففي تجربة شملت 49 مشاركًا قلّ عدد مخالفات قابلية التصنيع عند استعمال أداة برمجية مقارنة بورقة إرشادات ($p = 0.04$)، لكن زمن إنجاز المهمة لم يختلف اختلافًا ذا دلالة إحصائية بين المجموعتين. أما دراسة Roscoe et al. (2023) فهي حالة طولية لتحول مؤسسي نحو التوسع في التصنيع بالإضافة، وتُظهر ضرورة التنسيق بين الفرق ووظائف التطوير، ولا تعزل أثر التقنية وحدها في الزمن الكلي للمنتج.

تتمثل الفجوة التحليلية في أن الدراسات التسع المختارة لا تختبر بمقياس موحد المسار الكامل: توظيف التقنية ← كفاءة التصميم الصناعي ← الزمن الكلي لتطوير المنتج. وتكشف المقارنة تفاوت مستويات الدليل بين تحسين محدد في نشاط تصميمي، وتحول تنظيمي واسع، ونموذج تفسيري لم يُختبر بعد؛ ولذلك لا تُفسّر هذه الفجوة على أنها غياب لجميع الدراسات السابقة عن الموضوع.

جدول (1): المقارنة النقدية بين الدراسات السابقة

الدراسة ونوع الدليل	المجال والمتغيرات	أبرز النتائج المستخلصة	الحدود والفجوة بالنسبة للبحث
Ngo et al. (2018) مراجعة نقدية	عمليات AM والمواد والتطبيقات والقيود التقنية	تصنيف إمكانات التقنية ومحددات اختيارها بحسب المادة والتطبيق	لا تختبر كفاءة التصميم في زمن تطوير منتج كامل بمقياس مقارن
Ford & Despeisse (2016) دراسة استكشافية	الاستدامة، كفاءة الموارد، إعادة تصميم المنتجات وسلاسل القيمة	تحديد فرص التصنيع بالإضافة وتحدياته في أنظمة الإنتاج	محدودها الاستدامة لا قياس تأثير مباشر على زمن تطوير المنتج
Pradel et al. (2018a) مراجعة 81 منشورا	معرفة DfAM ومراحل التصميم المفاهيمي والتفصيلي	إطار لتوزيع المعرفة على مراحل العملية التصميمية	لا تتضمن تجربة لقياس كفاءة التصميم والزمن الكلي
Pradel et al. (2018b) استبيان ومقابلات	110 مصممين بالاستبيان و18 بالمقابلات: ممارسات DfAM والخبرة	تحديد عوائق الممارسة المهنية ودور المعرفة والخبرة	عينة مهنية دون قياس دورة التطوير كاملة
Holub et al. (2023) تطبيق هندسي	DfAM والتحسين الطوبولوجي وزمن تصميم مكونات لآلات	مقارنة إجراءات تصميم مكونات محددة بالطرق التقليدية	نطاق المكونات لا يثبت تحسين الزمن الكلي لكل المنتجات
Murugan & Vinodh (2025) مراجعة للأدبيات	مبادئ DfAM والأدوات والإرشادات والتحديات	تنظيم الممارسات والمحددات وموضوعات البحث	لا يوفر تقديرا تجريبيا موحدا لتغير زمن التطوير
Dash et al. (2025) مراجعة منهجية (148)	Dual DfAM عبر مراحل التصميم وموضوعات التحسين والتنظيم	تركز الأدبيات على المراحل المتأخرة وقيد التصنيع	خريطة بحثية لا تختبر الوساطة والسببية والزمن الكلي
Budinoff et al. (2024) تجربة مضبوطة (49)	أداة برمجية مقابل إرشادات DfAM: قابلية التصنيع وزمن المهمة	مخالفات أقل مع الأداة البرمجية ($p = 0.04$)، بلا فرق زمني دال	مهمة قصيرة؛ لا تختبر دورة تطوير منتج كاملة
Roscoe et al. (2023) دراسة حالة طولية	التوسع في AM في صناعة الطيران وتكامل الفرق والعمليات	الحاجة إلى تحولات تنظيمية وتنسيق أنظمة تطوير التقنية	لا تعزل أثر الطباعة وحدها في الزمن الكلي ولا تصلح لتعميم سببي

المصدر: إعداد الباحث استنادا إلى المصادر الأصلية للدراسات التسع المذكورة في قائمة المراجع، مع التمييز بين نتائج الدراسة وحدود الاستدلال.
ملاحظة: هذا الجدول مقارنة نوعية للأدلة، ولا يمثل تحليلا مقوليا أو قياسا إحصائيا موحدا لتأثير التقنية في زمن تطوير المنتج.

الاطار النظري:

مفهوم التصميم الصناعي وأهدافه:

التصميم الصناعي عملية استراتيجية لتطوير منتجات تلبي احتياجات المستخدمين ومتطلبات الأداء والجماليات والتصنيع والاقتصاد. ولا يقتصر على المظهر، بل يشمل صياغة المشكلة، وتوليد البدائل، واختبارها واختيار الأنسب. ومن ثم تُفهم كفاءة التصميم في هذه الدراسة بوصفها قدرة عملية التطوير على تحقيق متطلبات المنتج بموارد وزمن مناسبين مع المحافظة على جودة القرار التصميمي.

تُعرّف المنظمة العالمية للتصميم التصميم الصناعي بوصفه عملية استراتيجية لحل المشكلات تربط الإنسان والتكنولوجيا والأعمال، وتعزز الابتكار وجودة الحياة (World Design Organization, n.d). ويُستخدم التعريف هنا لتحديد نطاق أنشطة التصميم التي قد تدعمها الطباعة ثلاثية الأبعاد.

تساعد الأدوات الرقمية، ومنها التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD) والتصنيع بالإضافة، على الانتقال من النموذج الرقمي إلى النموذج المادي لفحص الشكل والملاءمة والوظيفة. لكن قيمة هذا الانتقال تعتمد على ملاءمة النموذج لغرض الاختبار، ولا تساوي تلقائيًا انخفاضًا في زمن التطوير (Gibson et al., 2021).

عملية التصميم الصناعي ومراحلها:

تمر عملية التصميم الصناعي بسلسلة مترابطة من الأنشطة التي تتخللها مراجعات وتعديلات متكررة. ويتفاوت ترتيب تلك الأنشطة بحسب نوع المنتج وتعقيده، وهو ما يفسر ضرورة التمييز بين اختصار نشاط منفرد واختصار الزمن الإجمالي للمشروع (Pahl et al., 2007; Ulrich et al., 2020).

يُنظّم الشكل (1) هذه العملية، لأغراض التحليل، في سبع مراحل: تحديد المشكلة، وجمع البيانات، والتصميم المفاهيمي، والتصميم التجسيدي والتفصيلي، وإنتاج النموذج الأولي واختباره، والتقييم والتعديل، ثم اعتماد التصميم والإعداد للتصنيع. ويظهر الاستخدام الأكثر مباشرة للطباعة ثلاثية الأبعاد في المراحل التي تتطلب تمثيلًا ماديًا واختبارًا وتكرارًا.

الشكل (1): مراحل عملية التصميم الصناعي والعلاقات التكرارية بينها



المصدر: إعداد الباحث بالاستناد إلى Pahl et al (2007) وUlrich et al. (2020)، مع إعادة تنظيم المراحل بما يتناسب مع موضوع الدراسة.

مفهوم الطباعة ثلاثية الأبعاد وتقنياتها:

الطباعة ثلاثية الأبعاد مجموعة من تطبيقات التصنيع بالإضافة التي تبني الأجزاء من بيانات رقمية عبر إضافة المواد بصورة متتابعة. وتوضح المواصفة ISO/ASTM 52900:2021 تصنيف العمليات ومصطلحاتها، لكنها لا تقدم دليلًا تجريبيًا على تحسن الكفاءة أو زمن التطوير.

يركز التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM) على موازنة فرص التعقيد الهندسي ودمج المكونات والتخصيص مع قيود المواد والاتجاه والدعامات والتفاوتات والفحص والمعالجة اللاحقة؛ ولذلك يُعد اختيار العملية والتصميم الملائم لها شرطًا لتفسير المنافع، لا نتيجة مفترضة سلفًا (Gibson et al., 2021; Pradel et al., 2018a).

أنواع وتقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد:

تصنّف المواصفة ISO/ASTM 52900:2021 عمليات التصنيع بالإضافة إلى سبع فئات: بثق المواد، والبلمرة الضوئية في الحوض، ودمج المسحوق في سرير المسحوق، ونفث المادة، ونفث المادة الرابطة، وترسيب الطاقة الموجّهة،

وتصفيح الصفائح. ويعرض الجدول (2) تقنيات تطبيقية منتقاة ذات صلة بالنمذجة والتقييم في التصميم الصناعي، ولا يغطي كل العمليات التجارية.

تُستخدم FFF/FDM لإنتاج نماذج أولية منخفضة التكلفة نسبيًا، وتناسب SLA التحقق الشكلي الذي يتطلب تفاصيل دقيقة، بينما تدعم SLS/PBF إنتاج أجزاء ذات هندسة معقدة وبعض الاختبارات الوظيفية. وتختلف عمليات طباعة المعادن والنفث الرابط في المادة والدقة والتجهيز والمعالجة اللاحقة؛ لذا ينبغي مقارنة دورة العملية كاملة لا زمن البناء وحده (Ngo et al., 2018; Gibson et al., 2021).

جدول (2): مقارنة تحليلية بين تقنيات مختارة للطباعة ثلاثية الأبعاد من حيث الخصائص والتطبيقات وعلاقتها بزمن تطوير المنتج

التقنية	آلية العمل	المواد المستخدمة	الدقة وجودة السطح	سرعة الإنتاج	التكلفة	الاستخدام في التصميم الصناعي	العلاقة المحتملة بزمن التطوير
FDM/FFF – بثق المواد	ترسيب المادة المنصهرة عبر فوهة على طبقات	PLA، ABS، PETG والبوليمرات المناسبة	تأثير واضح للطبقة واتجاه البناء؛ وقد تظهر خطوط الطبقات	تعتمد على حجم النموذج وإعدادات الترسيب	تكون منخفضة نسبيًا عند استخدام الأجهزة المكتبية	النماذج المفاهيمية، وفحص الأبعاد، والنماذج الوظيفية البسيطة	قد يسرّع دورة إنتاج النماذج منخفضة التكلفة، لكنه يحتاج أحيانًا لعمليات تشطيب
SLA – البلمرة الضوئية	معالجة الراتنج السائل باستخدام مصدر ضوئي	الراتنجات الحساسة للضوء	ملاءمة للتفاصيل الدقيقة والأسطح التي تتطلب جودة شكلية	تأثر بارتفاع البناء وإعدادات التعريض	تشمل تكلفة الراتنج والمعالجة اللاحقة	النماذج الجمالية والتفصيلية، وقوالب العرض، وأعمال الملاءمة	قد يسهّل التحقق الشكلي والتشطيب النهائي، لكنه يتطلب عمليات غسيل ومعالجة إضافية
SLS – دمج المسحوق البوليمري	دمج مناطق مختارة من مسحوق البوليمر باستخدام الليزر	ملل PA11 وPA12 ومساحيق بوليمرية مناسبة	ملاءمة للأجزاء الوظيفية والهندسية، لكن قد يتطلب تشطيبًا سطحيًا	تأثر بحجم البناء والتبريد وعدد الأجزاء	تتطلب معدات وتجهيزات أعلى من الأنظمة المكتبية البسيطة	الأجزاء الوظيفية، والنماذج المركبة، وتجارب الملاءمة والتجميع	قد تقلل الحاجة إلى الدعامات وتسرع بعض الاختبارات، لكن التبريد وإزالة المسحوق يؤثران في الزمن
SLM/DMLS – دمج المسحوق المعدني بالليزر	صهر مناطق مختارة من مسحوق المعدن باستخدام الليزر	الفولاذ، التيتانيوم، والألمنيوم، وسبائك مناسبة	تسمح بتفاصيل هندسية معقدة، وقد تُستخدم دعامات وتتطلب أحيانًا تشغيلًا إضافيًا	تعتمد على حجم الجزء وإعدادات البناء ومتطلبات المعالجة اللاحقة	مرتفعة نسبيًا بسبب المعادن والمواد الخامة ومتطلبات التشغيل	النماذج والأجزاء المعدنية الوظيفية والهياكل المعقدة	قد تختصر بعض خطوات التكامل أو أدوات الإنتاج، لكن التكلفة والفحص قد يمددان الزمن
Binder Jetting – نفث المادة الرابطة	ربط حبيبات المسحوق انتقائيًا باستخدام مادة رابطة	مواد متنوعة: رملية، سيراميكية، أو معدنية بحسب النظام	يتأثر بخصائص المسحوق والرابطة والانكماش والمعالجة اللاحقة	قد تكون مناسبة لبناء مجموعات أجزاء أو الهندسة الاستعراضية	قد تكون منافسة حسب المسحوق والمعالجة اللاحقة والربط أو التلبيد	النماذج والأشكال المعقدة والقوالب الرملية وبعض التطبيقات الفنية	قد يوفر مرونة في بناء الأجزاء، لكن التلبيد أو التشريب أو المعالجة اللاحقة قد يبطئ الزمن الكلي

المصدر: إعداد الباحث بالاستناد إلى ISO/ASTM 52900:2021، وNgo et al. (2018)، وGibson et al. (2021).
ملاحظة: تقارن هذه المعرفة بين أبعاد تقنية أساسية (آلية العمل، المواد، الدقة، السرعة، التكلفة، ومواضعها في التصميم) وظروف التشغيل والمعالجة اللاحقة، ولكن لا يمثل ترتيبًا رقميًا مطلقًا لهذه التقنيات.

قراءة تحليلية لجدول المقارنة:

يبيّن الجدول (1) أن ملاءمة التقنية تتحدد بنوع الاختبار ومادة النموذج ودقته وتكلفته ومدة الإعداد والمعالجة اللاحقة. فلا توجد عملية تحقق أفضل نتيجة لكل منتجات التصميم الصناعي؛ والأجدى المفاضلة وفق الغرض التصميمي والموارد والوقت المتاحين (ISO/ASTM 52900:2021; Ngo et al., 2018).

تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد وتطبيقاتها في التصميم الصناعي:

تتيح النمذجة المطبوعة تجسيد المفاهيم والتكوينات الشكلية وفحص الأبعاد والنسب، بما يدعم مقارنة البدائل والتواصل بين أعضاء فريق التطوير. وتختلف درجة وفاء النموذج بالغرض حسب مادة الطباعة ودقتها ومقياسه وخصائصه الحسية والإرجونومية (Ulrich et al., 2020).

تُستخدم النماذج كذلك في فحص الملاءمة والتجميع وبعض الوظائف والآليات الحركية، وفي الحصول على تغذية راجعة مبكرة وإجراء تعديلات متتابعة. لكن صلاحية الاستنتاجات من النموذج إلى المنتج النهائي تظل مشروطة بتكافؤ الخصائص المعنية، ولا سيما المتانة والأسطح والتفاوتات (Gibson et al., 2021; Pradel et al., 2018b).

وقد يتيح DfAM تقليل عدد المكونات أو إعادة تصميمها للاستفادة من قدرات التصنيع بالإضافة. غير أن كثرة النماذج التجريبية ليست بالضرورة دليلًا على كفاءة أعلى؛ فقد تساعد في تحسين الجودة مع زيادة عدد دورات التعديل. لذلك يُقيَّم الناتج بمؤشرات تجمع الزمن والموارد وجودة القرارات وعدد حالات إعادة العمل، لا بعدد النماذج وحده.



دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تحسين كفاءة التصميم الصناعي:

يمكن تحليل الكفاءة التصميمية من خلال أربعة مؤشرات: زمن الحصول على نموذج ملائم للتقييم، وفاعلية مقارنة البدائل، وجودة التحقق واتخاذ القرار، والموارد المستهلكة في إعادة العمل. وتُسهم الطباعة ثلاثية الأبعاد في توفير فرصة لتحسين هذه المؤشرات عند ملاءمة التقنية والاختبار، لكن الأدلة المختارة لا توفر قياسًا موحدًا لحجم التحسن بينها (Pradel et al., 2018a, 2018b).

دور تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في تقليل زمن تطوير المنتج:

يقتضي تقييم الزمن التفريق بين ثلاثة مستويات: زمن إنتاج نموذج قابل للاستخدام، وزمن دورة الاختبار والتعديل، والزمن الكلي لتطوير المنتج حتى اعتماده. فقد تختصر الطباعة وقت تجهيز النماذج أو تصنيع أجزاء محددة، لكن لا يلزم من ذلك اختصار مدة المشروع، التي تتأثر بالتنسيق والاختبارات واتخاذ القرارات والمعالجة اللاحقة (Ulrich et al., 2020; Holub et al., 2023).

يتكون زمن إنتاج النموذج من تجهيز بيانات CAD، وإعداد العملية، والطباعة، والمعالجة اللاحقة والفحص. وأي مقارنة منصفة تتناول مجموع هذه الأنشطة في بدائل تحقق متطلبات مكافئة. أما زمن دورات التعديل، فيتوقف على وضوح المعلومات الناتجة عن الاختبارات، وقد تتضاعف الدورات حين تصبح النمذجة متاحة بسهولة.

الزمن الكلي محصلة أنشطة متوازية ومتتابعة. ولا ينعكس اختصار نشاط على مدة التطوير إلا إذا كان النشاط مؤثرًا في المسار الزمني الحرج أو في وتيرة اتخاذ القرار؛ ولذلك يجب فصل مؤشرات النمذجة والاختبار عن زمن تطوير المنتج بوصفه متغيرًا مستقل القياس.

تتحكم في العلاقة الزمنية طبيعة التقنية والمواد وتعقيد المنتج وحجم الإنتاج وخبرة المصمم وتطبيق DfAM والمعالجة اللاحقة والبنية التنظيمية. ويقتضي الاستدلال بقياسات تطبيقية مقارنة تضبط هذه العوامل بدل تعميم المنافع التقنية على كل منتج (Holub et al., 2023).

التحديات والمعوقات المؤثرة في التوظيف:

تختلف صلاحية النماذج للاختبار حسب خصائص المادة واتجاه البناء ودقة الأبعاد والسطح؛ لذلك قد لا يصلح النموذج الشكلي لاختبار التحميل أو الأداء الوظيفي، ويستلزم نقل نتائجه إلى المنتج النهائي تحققًا مستقلًا (Ngo et al., 2018).

قد تزيد أعمال إزالة الدعامات والتنظيف والمعالجة الحرارية أو الضوئية والتشطيب والفحص من زمن تسليم النموذج وتكلفته. وعليه، فإن زمن البناء المطبوع لا يساوي زمن الحصول على نموذج صالح للاختبار.

تؤثر تكلفة المعدات والمواد وحجم الإنتاج وتوافر الكفاءات والبرامج وتكامل فرق العمل في جدوى التطبيق. وقد تكون تقنية تقليدية أو نموذج رقمي كافيًا في بعض المراحل. لذلك يُفاضَل بين الخيارات وفق متطلبات الأداء والوقت والتكلفة وحجم الإنتاج (Ford & Despise, 2016; Murugan & Vinodh, 2025).

النموذج التحليلي المقترح للدراسة:

يقترح البحث نموذجًا تفسيريًا يميز بين توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد (متغير مستقل)، وآليات النمذجة والتقييم والتعديل، وكفاءة التصميم الصناعي (وسيط مفترض)، والزمن الكلي لتطوير المنتج (متغير تابع)، والعوامل التقنية والتنظيمية المعدِّلة.

أولًا: المتغير المستقل - توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد:

يمثل توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد المتغير المستقل الرئيس في النموذج المقترح. ويُقصد به استخدام إحدى تقنيات التصنيع بالإضافة ضمن مراحل تطوير المنتج لأغراض تصميمية محددة، مثل إنتاج النماذج الأولية، أو اختبار البدائل، أو التحقق من الأبعاد والملاءمة الوظيفية، أو إنتاج أدوات مساعدة لعمليات التقييم والتجميع.

ثانيًا: الآليات التصميمية التفسيرية المحتملة:

تشمل الآليات التفسيرية إنتاج تمثيل مادي مبكر، وإتاحة اختبار الملاءمة الشكلية والوظيفية، وتطوير نماذج متتابعة استجابةً للتغذية الراجعة، وتعزيز التواصل بين الأطراف المعنية بالتصميم (Pradel et al., 2018a, 2018b).

ثالثًا: المتغير الوسيط المفترض - كفاءة التصميم الصناعي:

تُعرّف كفاءة التصميم الصناعي إجرائيًا بوصفها تحقيق متطلبات المنتج بموارد وزمن مناسبين دون الإخلال بجودة القرار أو صلاحية النموذج للاختبار. وتشمل مؤشراتها فاعلية التقييم وعدد مرات إعادة العمل وحسن استخدام الموارد.

رابعًا: المتغير التابع - الزمن الكلي لتطوير المنتج:

يُقصد بالزمن الكلي لتطوير المنتج المدة من تحديد متطلباته حتى اعتماد التصميم وفق نطاق المشروع، لا مجرد زمن الطباعة. ويُفترض أن تحسّن بعض مؤشرات الكفاءة قد ينعكس عليه إذا كانت الأنشطة المتأثرة تقع على المسار الحرج للمشروع.

خامسًا: العوامل المعدِّلة المحتملة للعلاقات:

تتضمن العوامل المعدِّلة نوع العملية وخصائص المواد وتعقيد المنتج وخبرة المصمم ومدى تطبيق DfAM وحجم الإنتاج والمعالجة اللاحقة. وينبغي قياسها أو ضبطها عند اختبار النموذج تطبيقياً.

سادسًا: مسارات العلاقة المقترحة:

المسار الأول: ملاءمة توظيف التقنية لطبيعة المهمة قد تحسن أنشطة النمذجة والتقييم والتعديل.

المسار الثاني: تحسن تلك الأنشطة قد يدعم مؤشرات الكفاءة التصميمية، ومنها جودة القرار والموارد والزمن.

المسار الثالث: قد يسهم التحسن في الكفاءة في اختصار الزمن الكلي للتطوير، بشرط تأثيره في الأنشطة الحاسمة زمنيًا، مع احتمال تعديل قوة المسارات حسب التقنية والمواد والخبرة وحجم الإنتاج.

سابعًا: حدود النموذج التحليلي وإمكانات اختباره:

لا يقدّر النموذج حجم التأثير ولا يختبر الوساطة أو التعديل إحصائيًا. وللتحقق منه يلزم إجراء دراسات مقارنة لمشروعات متكافئة تقيس حجم توظيف التقنية ومؤشرات الكفاءة والزمن الكلي والعوامل المعدلة.

جدول (3): الارتباط بين مكونات النموذج التحليلي ومصادرها العلمية

مكوّن النموذج	الأساس المستمد من الأدبيات	المصادر المرتبطة	حدود الاستدلال
توظيف الطباعة ثلاثية الأبعاد	تنوع التقنيات والمواد والتطبيقات والقيود	Ngo et al. (2018), Gibson et al. (2021)	يحدد خصائص التقنية، ولا يثبت التحسن الزمني
الآليات التصميمية	النمذجة والتقييم والتعديل وتكامل DfAM مع مراحل التصميم	Pradel et al. (2018a, 2018b), Dash et al. (2025)	يدعم تفسير الاستخدام، ولا يثبت علاقة سببية عامة
كفاءة التصميم الصناعي	ملاءمة القرارات التصميمية ومواءمتها لقيود التقنية	Ulrich et al. (2020), Murugan and Vinodh (2025)	مؤشرات تحليلية مقترحة لم تُقس في الدراسة الحالية
الزمن المرتبط بأنشطة التصميم	مقارنة زمن تطوير مكونات هندسية محددة	Holub et al. (2023)	نتائج تطبيقية محددة لا تمثل الزمن الكلي لكل مشروع
العوامل المعدّلة المحتملة	خصائص المواد، وتعقيد التصميم، والخبرة، ومتطلبات DfAM	Ngo et al. (2018), Pradel et al. (2018b), Murugan and Vinodh (2025)	لم تُختبر التأثيرات المعدّلة إحصائيًا
العلاقة الوسيطة المقترحة	تركيب تفسيري يربط استخدام التقنية بكفاءة التصميم ثم زمن التطوير	النموذج المقترح في الدراسة الحالية	يحتاج إلى تحقق تطبيقي مستقل

المصدر: إعداد الباحث من المقارنة النقدية للدراسات السابقة.
ملاحظة: المصفوفة توضح الأساس المفاهيمي لمكونات النموذج، ولا تعني أن الدراسات المذكورة اختبرت النموذج المركب نفسه أو جميع مساراته.

نتائج الدراسة ومناقشتها:

أنتجت المقارنة النقدية للأدبيات نتائج تفسيرية مرتبطة بأسئلة البحث الأربعة، مع التمييز بين مراجعات التقنية والبحوث التجريبية ودراسات الحالة. وينبغي تفسير النتائج ضمن هذا النطاق المحدد لا بوصفها نتائج تجربة أجراها الباحث.

أولًا: نتيجة السؤال الأول: مجالات توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مراحل التصميم الصناعي

النتيجة الأولى: تتعدد مجالات توظيف الطباعة ثلاثية الأبعاد في التصميم الصناعي، وتختلف طبيعة الاستفادة منها باختلاف المرحلة التصميمية والغرض من النموذج وخصائص التقنية المستخدمة.

تشير الأدبيات المختارة إلى أن تطبيقات التصنيع بالإضافة تشمل إنتاج النماذج المفاهيمية والأولية، والتحقق من بعض الأبعاد والعلاقات الهندسية، وفحص الملاءمة والتجميع، وإنتاج بعض الأجزاء الوظيفية أو أدوات الاختبار المساعدة. ولا تقتصر أهمية هذه التطبيقات على الجانب التصنيعي، بل ترتبط بإمكان استخدامها لتوفير تمثيل مادي يدعم أنشطة التصميم والتقييم.

تختلف القيمة التصميمية للنموذج المطبوع بحسب الغرض منه ومدى تمثيله خصائص المنتج النهائي، ولا تتساوى إمكانات مختلف التقنيات في جميع مراحل التصميم.

ثانيًا: نتيجة السؤال الثاني: الآليات المحتملة المرتبطة بكفاءة التصميم الصناعي

النتيجة الثانية: تتيح بعض تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد آليات يمكن أن تدعم كفاءة أنشطة التصميم الصناعي، إلا أن تحقق التحسن في الكفاءة يتوقف على جودة توظيف التقنية ومدى الاستفادة من نتائج التقييم والاختبار.

تشمل الآليات المحتملة تجسيد البدائل مبكرًا، والتحقق الشكلي والوظيفي، وتيسير تبادل المعلومات وتنفيذ التعديلات. غير أن تحسين جودة القرار يتطلب تصميم اختبار صالحًا، لا مجرد توافر نموذج مادي.

توضح Pradel et al. (2018b) ارتباط توظيف DfAM بخبرة المصمم وممارسة التصميم. وفي تجربة Budinoff et al. (2024)، شملت 49 مشاركًا، خفّضت أداة البرمجيات عدد مخالفات قابلية التصنيع مقارنةً بأداة الإرشادات المكتوبة (p = 0.04)، دون فرق ذي دلالة إحصائية في زمن المهمة التصميمية. وهذا يحد من تعميم تحسّن أحد مؤشرات الجودة على الكفاءة الزمنية الشاملة.

وعليه تشمل مؤشرات الكفاءة المرشحة للقياس زمن النمذجة وفاعلية التحقق وعدد مرات إعادة العمل وجودة القرارات والموارد المستخدمة، مع ضرورة الجمع بينها عند إصدار الحكم على الكفاءة.

ثالثًا: نتيجة السؤال الثالث: العلاقة بين الطباعة ثلاثية الأبعاد وزمن تطوير المنتج

النتيجة الثالثة: يتوافر في الأدبيات أساس لمناقشة منافع زمنية محتملة في أنشطة تصميمية محددة، لكن الأدلة المختارة لا تكفي لإثبات انخفاض عام في الزمن الكلي لتطوير المنتج نتيجة استخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد.

قد تختصر الطباعة تجهيز القوالب أو النماذج في بعض التطبيقات، لكن زمن تسليم نموذج صالح للاستخدام يشمل إعداد التصميم والطباعة والمعالجة اللاحقة والفحص. وقدمت دراسة Holub et al. (2023) مقارنة تطبيقية لمكونات محددة باستخدام DfAM والتحسين الطوبولوجي. وفي المقابل لم تجد تجربة Budinoff et al. (2024) فرقًا ذا دلالة إحصائية في زمن المهمة بين أداتَي الدعم، رغم تحسن قابلية التصنيع بإحداهما؛ وكلا الدليلين لا يقيس الزمن الكلي لتطوير منتجات صناعية متكافئة.

وتضيف دراسة Roscoe et al. (2023) حالة طولية تُظهر تغيرًا في مدد تطوير منظومات صناعية عند الانتقال التدريجي إلى التصنيع بالإضافة، غير أن الحالة تضمنت تغييرات تنظيمية وتكنولوجية موازية؛ ولذلك لا يجوز نسبة التغير في الزمن إلى الطباعة منفردة. وتؤكد المقارنة ضرورة فصل زمن إنتاج النموذج وزمن التعديل عن دورة التطوير بأكملها.

لا تسمح الأدلة المختارة باشتقاق نسبة عامة لتقليل الزمن؛ فالتأثير المحتمل مشروط بكون الأنشطة التي تحسنت مؤثرة في المدة الإجمالية وبملاءمة التقنية ومتطلبات المعالجة والتنسيق.

رابعًا: نتيجة السؤال الرابع: النموذج التفسيري والعوامل المؤثرة في العلاقات بين المتغيرات

تدعم المصادر بناء نموذج يربط الإمكانات التقنية بآليات النمذجة والتقييم والكفاءة والزمن، مع تعديل العلاقة بحسب العملية والمواد والخبرة وحجم الإنتاج. لكنها لا تختبر النموذج المركب أو علاقة الوساطة مباشرة.

مناقشة نقدية للأدلة وحدودها:

تختلف مستويات الأدلة اختلافًا مؤثرًا في قوة الاستنتاج: فقد قارنت Budinoff et al. (2024) أداة دعم برمجية بأداة إرشادية في مهمة تصميم محددة ووجدت تحسنًا في بعض مؤشرات قابلية التصنيع دون فرق زمني دال؛ بينما تناولت Holub et al. (2023) إجراءات تصميم مكونات هندسية بعينها؛ ووثقت Roscoe et al. (2023) تحولًا صناعيًا تنظيميًا طويل الأمد. ولهذا لا يجوز جمع هذه النتائج في نسبة واحدة لتقليل الزمن الكلي لتطوير المنتج.

إن انتقال فائدة تقنية إلى نتيجة تصميمية يتطلب ملاءمة المادة والنموذج للاختبار، ووضوح المعيار، وتوظيف نتائج التقييم في القرار. كما أن اختصار زمن نشاط منفرد لا يخفض المدة الإجمالية ما لم يؤثر في الأعمال الحاسمة زمنيًا. ولهذا فإن القيمة العلمية للنموذج المقترح هي صياغة فرضيات قابلة للاختبار، لا إثبات علاقات سببية.

الاستنتاجات:

1. تدعم الأدلة المختارة توظيف الطباعة ثلاثية الأبعاد في النمذجة والتقييم والتعديل والاختبار المبكر، وفق ملاءمة التقنية وخصائص النموذج للغرض التصميمي (Ngo et al., 2018; Pradel et al., 2018a).
2. قد تحسن أدوات دعم DfAM قابلية التصنيع لبعض المخرجات؛ إذ وجدت Budinoff et al. (2024) مخالفات تصنيعية أقل باستخدام الأداة البرمجية، لكنها لم تجد فرقًا ذا دلالة إحصائية بين المجموعتين في زمن مهمة التصميم، ولم تقس كفاءة دورة تطوير منتج كاملة.
3. لا يستلزم تقليل زمن إنتاج النموذج اختصار الزمن الكلي لتطوير المنتج؛ إذ تتداخل أنشطة الإعداد والمعالجة والتقييم والتنسيق. وتقدم Holub et al. (2023) وRoscoe et al. (2023) أدلة تطبيقية مختلفة النطاق لا تكفي لتعميم نسبة تأثير واحدة.
4. تتأثر جدوى الاستخدام بنوع العملية والمواد وتعقيد المنتج وخبرة المصمم وتطبيق DfAM والتكلفة وحجم الإنتاج؛ لذلك ينبغي المفاضلة بين البدائل تحت ظروف متكافئة (Murugan & Vinodh, 2025; Ford & Despeisse, 2016).
5. النموذج المقترح بناء مفاهيمي مستند إلى الأدبيات، ويحتاج إلى دراسة تطبيقية تقيس علاقة التوظيف بكفاءة التصميم والزمن وتختبر المسارات الوسيطة والعوامل المعدِّلة.

التوصيات:

في ضوء الأدلة وحدودها، توصي الدراسة بالتالي:

1. تقييم جدوى توظيف تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد في مراحل التصميم الصناعي قبل التوسع في استخدامها.
إجراء مقارنة فنية واقتصادية قبل تبني التقنية، تجمع زمن النموذج كاملًا، والدقة والمواد، ومتطلبات الاختبار والمعالجة اللاحقة، وتكلفة البدائل التصنيعية المناسبة.
2. تطوير البرامج الأكاديمية والتدريبية المتخصصة في التصميم من أجل التصنيع بالإضافة (DfAM).
تطوير التدريب على اختيار تقنية الطباعة والمواد، وتقييم قابلية التصنيع، وإعداد تجارب نمذجة ذات مؤشرات واضحة لجودة القرار والوقت والموارد.
3. اعتماد مشروعات تطبيقية تجريبية محدودة النطاق لتقييم كفاءة دمج الطباعة ثلاثية الأبعاد في عمليات تطوير المنتجات.
تنفيذ دراسات مقارنة على مشروعات فعلية، مع تسجيل زمن تجهيز البيانات والطباعة والمعالجة والاختبار والتعديل، وقياس جودة النتائج ومقدار إعادة العمل في ظروف متكافئة.
4. تعزيز التعاون البحثي بين الجامعات والمؤسسات الصناعية لاختبار العلاقات المقترحة في النموذج التحليلي للدراسة.
تشجيع بحوث مشتركة تختبر النموذج التحليلي بقياسات على الكفاءة والزمن الكلي للتطوير، مع ضبط نوع المنتج والتقنية وخبرة المصمم والعوامل التنظيمية.
5. إجراء دراسات اقتصادية وبيئية مقارنة لتقييم الجدوى الشاملة لتقنيات التصنيع بالإضافة.
تقييم التكلفة الكلية والآثار البيئية، بما في ذلك الطاقة والمواد والفاقد والمعالجة اللاحقة، ومقارنتها بطرائق التصنيع البديلة وفق نطاق دورة حياة محدد.
6. التوسع في الدراسات المستقبلية التي تتناول التكامل بين تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد والتصميم التوليدي والذكاء الاصطناعي.
بحث التكامل بين DfAM والتصميم التوليدي والذكاء الاصطناعي، وقياس إضافته الفعلية إلى جودة الحلول وزمن التطوير دون افتراض أن استخدام هذه الأدوات يحقق فائدة تلقائية.

قائمة المراجع:

1. Budinoff, H. D., McMains, S., & Shonkwiler, S. (2024). Exploring the impact of design tool usage on design for additive manufacturing processes and outcomes. Design Science, 10, Article e1. https://doi.org/10.1017/dsj.2023.34
2. Dash, S., Nordin, A., & Johansson, G. (2025). Dual design for additive manufacturing in engineering design: A systematic literature review. Rapid Prototyping Journal, 31(11), 40-61. https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2024-0245
3. Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: An exploratory study of the advantages and challenges. Journal of Cleaner Production, 137, 1573–1587. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150
4. Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., & Khorasani, M. (2021). Additive manufacturing technologies (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7
5. Holub, P., Gulan, L., Korec, A., Chovančíková, V., Nagy, M., & Nagy, M. (2023). Application of advanced design methods of "Design for Additive Manufacturing" (DfAM) to the process of development of components for mobile machines. Applied Sciences, 13 (22), Article 12532. https://doi.org/10.3390/app132212532
6. International Organization for Standardization, & ASTM International. (2021). Additive manufacturing—General principles—Fundamentals and vocabulary (ISO/ASTM Standard No. 52900:2021). https://www.iso.org/standard/74514.html
7. Murugan, R. S., & Vinodh, S. (2025) Holistic review on design for additive manufacturing. Progress in Additive Manufacturing, 10 (8), 4497–4532. https://doi.org/10.1007/s40964-024-00887-4
8. Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 143, 172–196. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012
9. Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K.-H. (2007). Engineering design: A systematic approach (3rd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84628-319-2

10. Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R., & Moultrie, J. (2018a). A framework for mapping design for additive manufacturing knowledge for industrial and product design. Journal of Engineering Design, 29(6), 291–326. https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1483011
11. Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R., & Moultrie, J. (2018b). Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice. Journal of Engineering Design, 29 (4–5), 165–200.
https://doi.org/10.1080/09544828.2018.1454589
12. Roscoe, S., Cousins, P. D., & Handfield, R. (2023). Transitioning additive manufacturing from rapid prototyping to high-volume production: A case study of complex final products. Journal of Product Innovation Management, 40(4), 554–576.
https://doi.org/10.1111/jpim.12673
13. Ulrich, K. T., Eppinger, S. D., & Yang, M. C. (2020) Product design and development (7th ed.) McGraw-Hill Education.
14. World Design Organization. (n.d.). Definition of industrial design.
https://wdo.org/about/definition/