مجلة الدراسات التجارية والإدارية

المجلد السادس – العدد الأول

يناير 2025

دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة في ظل الثورة الصناعية الرابعة: دراسة حالة

The Role of Digital Twin Technology in Supporting Sustainable Competitive Advantage in Light of the Industry 4.0: A Case Study

أحمد فتحي محمد عباس قاسم[1]

أحمد عبد السلام أبو موسي[2]

فايزة محمود عبيد الله[3]

الملخص

تتناول هذه الدراسة دور تقنية التوأمة الرقمية في ظل الثورة الصناعية الرابعة في دعم الميزة التنافسية المستدامة للشركات الصناعية، مع التركيز على دراسة حالة لتطوير سيارة تويوتا كامري 2024 باستخدام هذه التقنية. ولقد استهدفت تلك الدراسة تحليل دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة (بعد التكلفة، بعد الجودة، بعد المرونة، بعد التسليم، بعد الابتكار، والبعد البيئي) في ظل في ظل الثورة الصناعية الرابعة ، وقد اتجهت الدراسة في سبيل تحقيق هذا الهدف إلي تقسيم الدراسة الي شقين، **شق نظري** يعتمد علي المنهج الوصفي التحليلي لدراسة وتحليل الدراسات السابقة التي اهتمت بموضوع الدراسة، **وشق تطبيقي** يعتمد علي إجراء دراسة حالة تتمثل في تطوير سيارة تويوتا كامري 2024 باستخدام تقنية التوأمة الرقمية، وتوصلت نتائج البحث إلي اتفاق دراسة الحالة التطبيقية مع الجانب النظري فيما يتعلق بوجود أثر إيجابي لتقنية التوأمة الرقمية على أبعاد الميزة التنافسية المستدامة خلال مراحل دورة حياة سيارة تويوتا كامري2024، وفيما يتعلق ببعد التكلفة أوضحت النتائج انخفاض في التكاليف يصل الي 15% بحلول عام 2028، وفيما يختص ببعد الجودة يوجد تحسين بنسبة تصل الي 22%، وكذلك بعد المرونة تصل نسبة التحسين الي 28%، أما بعد التسليم فتصل نسبة التسريع الي 20%، وبالنسبة لبعد الإبتكار سيتحقق زيادة بنسبة 24%، وأخيرا البعد البيئي سيتحقق تقليل للهدر بنسبة 28%، وذلك كله بالتدرج من عام 2024 حتي عام 2028.

الكلمات المفتاحية: الجيل الصناعي الرابع, تقنية التوأمة الرقمية، الميزة التنافسية المستدامة.

Abstract:

This study examines the role of digital twin technology in supporting the sustainable competitive advantage of industrial companies, focusing on a case study of the development of the 2024 Toyota Camry using this technology. Therefore, the study aims to analyze the role of digital twin technology in

[1] مدرس مساعد بالمعهد العالي للعلوم التجارية بالمحلة الكبري

[2] استاذ المحاسبة ونظم المعلومات – كلية التجارة – جامعة طنطا

[3] استاذ محاسبة التكاليف – كلية التجارة – جامعة دمنهور

supporting the dimensions of sustainable competitive advantage (cost, quality, flexibility, delivery, innovation, and environmental impact) within the framework of Industry 4.0. To achieve this goal, the study is divided into two parts: a theoretical part that relies on the descriptive-analytical approach to study and analyze previous research on the topic, and an applied part that involves a case study of the development of the 2024 Toyota Camry using digital twin technology. The research findings show that the case study aligns with the theoretical side regarding the positive impact of digital twin technology on the dimensions of sustainable competitive advantage throughout the life cycle of the 2024 Toyota Camry. In terms of cost, the results indicate a cost reduction of up to 15% by 2028. In terms of quality, there is an improvement of up to 22%. For flexibility, the improvement reaches 28%, while the delivery dimension shows a 20% acceleration. As for innovation, a 24% increase is expected, and finally, in terms of environmental impact, waste reduction of 28% is expected. All of these improvements are projected to occur progressively from 2024 to 2028.

Keywords: Industry 4.0, Digital Twin Technology, Sustainable Competitive Advantage.

1- مقدمة البحث:

تعتبر المعلومات المحاسبية الدقيقة هي الأساس لمساعدة المديرين في إتخاذ قرارات العمل المناسبة، وتوجيه العمليات بشكل منتظم، وتشغيل وإدارة الشركة بشكل فعال، والحفاظ على رقابة داخلية ممتازة خاصةً في ظل الثورة الصناعية الرابعة Industry 4.0، وهو عصر التكنولوجيا الرقمية حيث يتصل كل شيء بالإنترنت (Thuan et al., 2022)، وفي هذا السياق، تطور التصنيع من التصنيع القائم على المعرفة إلى التصنيع الذكي الذي يستخدم التقنيات المعتمدة على البيانات، ولذلك يمكن إعتبار تقنية التوأمة الرقمية Digital Twin فرصة لتحسين أداء عملية التصنيع (Silva et al., 2023).

ولقد تطورت تقنية التوأمة الرقمية بفضل التطورات في التكنولوجيا الإفتراضية وتكنولوجيا جمع البيانات، وهى تعرف بأنها كيان إفتراضي مرتبط بكيان في العالم الحقيقي، إذ يمكن تكرار كل شيء في العالم الحقيقي في المساحة الإفتراضية بإستخدام تقنية التوأمة الرقمية (Ukko et al., 2021 ; Vemulapalli et al., 2021)، حيث أن هذه التقنية تسمح بإنشاء نموذج إفتراضي لكيان حقيقي

بطريقة رقمية لمحاكاة سلوكه حيث يمكن للنموذج الافتراضي فهم حالة الكيان الحقيقي من خلال بيانات أجهزة الاستشعار، والتنبؤ بالتغيرات الديناميكية وتقديرها وتحليلها(Qi & Tao, 2018a).

كما سيؤدي المزيد من التطور والتقدم في تكنولوجيا المعلومات والإتصالات إلى تحويل المنتجات التقليدية إلى منتجات ذكية بشكل مستمر والسماح بتقديم خدمات ذكية، وتعتبر تقنية التوأمة الرقمية تقنية أساسية لخلق القيمة مع الخدمات الذكية (Barth et al., 2022). كما أنها مفيدة للتغييرات في منهجيات إدارة شركات التصنيع، حيث تبحث الشركات عن طرق جديدة لتكييف عملياتها مع ظروف السوق المتغيرة، وزيادة قدرتها التنافسية مع تقليل هدر الموارد وخفض التكاليف، وتتعلق هذه التغييرات بالعمليات داخل الشركة وسلسلة التوريد بأكملها، ولذلك تعد تقنية التوأمة الرقمية أحد الحلول المتعلقة بالثورة الصناعية الرابعة والتي اكتسبت شعبية في قطاع التصنيع، وتعد تقنية التوأمة الرقمية والتقنيات الرقمية ذات الصلة عوامل تغيير لقواعد لعبة التصنيع، حيث تمهد الطريق للميزة التنافسية المستدامة. توقعت شركة Gartner أنه بحلول عام 2021، ستستخدم نصف الشركات الصناعية الكبرى التوأمة الرقمية، مما يؤدي إلى تحسين فاعلية هذه الشركات بنسبة 10٪، وبالتالي فإن تقنية التوأمة الرقمية تعمل كعامل تمكين لخلق قيمة إضافية للشركات، وتقوية العلاقة مع العملاء، وكمسرّع لعملية تقديم الخدمة في التصنيع (Gulewicz, 2022; Woitsch et al., 2022). كما يتوقع أن تحقق تقنية التوأمة الرقمية منافع إقتصادية كبيرة حيث تتوقع أبحاث السوق في المستقبل Market Research Future أن يصل سوق التوأمة الرقمية إلى 35 مليار دولار أمريكي بحلول عام 2025 (Hu et al., 2021).

كما توجد بعض الأمثلة الحديثة لتقنية التوأمة الرقمية طبقت في الحياة العملية في عدة مجالات مختلفة، ومنها علي سبيل المثال تطوير توأمة رقمية لعملية التطعيم الشامل ضد جائحة كورونا COVID-19 (Pilati et al., 2021)، وتطبيقها على الطاقة النووية (Gong et al., 2022)، وتطبيقها في صناعة الطيران، والرعاية الصحية والتصنيع والشبكات والإتصالات وفي الصناعة التحويلية لمراقبة حالة الآلات، والتنبؤ بالفشل، وتصميم المنتج، والتعاون بين الإنسان والآلة (Sheuly et al., 2022).

إن التطور السريع للحلول التكنولوجية التي تم تمكينها من خلال التحول الرقمي، والتركيز المتزايد في العديد من المجالات الصناعية على الأعمال القائمة على الخدمات يتطلب من الشركات إكتساب فهم جديد لعملائها وأنشطتهم وتطوير إبتكارات جديدة قائمة على البيانات مثل خدمات تقنية التوأمة الرقمية، وذلك لإضافة وخلق قيمة لعملائها (Rantala et al., 2021).

وفي ظل الثورة الصناعية الرابعة وما تشهده العديد من الصناعات من تحول رقمى، يمكن أن تكون تقنية التوأمة الرقمية أداة رائعة للشركات لزيادة مزاياها التنافسية والإنتاجية والكفاءة، وذلك لأنها تقنية لديها القدرة على ربط العالمين الحقيقي والإفتراضي في الوقت الفعلي وتوفر قياسًا أكثر واقعية وشامل لما هو غير متوقع، وسيناريوهات لا يمكن التنبؤ بها (Singh et al., 2021).

مما سبق يري الباحثون أنه في عصر الثورة الصناعية الرابعة تحول التصنيع التقليدي القائم علي المعرفة إلي التصنيع الذكي المستدام القائم علي التقنيات الإفتراضية، وأن أحد هذه التقنيات الرئيسية في هذا التحول هي تقنية التوأمة الرقمية التي تعمل كنسخة رقمية للمنتجات والأصول والعمليات، وبناءً علي ذلك يمكن القول أن تقنية التوأمة الرقمية يمكن أن يكون لها مردود إيجابي علي دعم المزايا التنافسية المستدامة للشركات الصناعية. لذا يهدف هذا البحث إلى التعرف على دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة للشركات الصناعية.

2- مشكلة البحث :

في ظل الثورة الصناعية الرابعة وما يشهده العالم من تحول رقمي، هناك حاجة ملحة للشركات الصناعية لإستخدام التقنيات المتقدمة في التصنيع مثل تقنية التوأمة الرقمية لخلق قيمة إضافية للشركات، وتحسين العلاقات مع العملاء، وتقليل الهدر وتخفيض التكاليف، وزيادة الإنتاجية والجودة، وتعزيز المرونة في التصنيع، والكفاءة التشغيلية، وغيرها من المزايا التنافسية المستدامة، خاصة في ظل ظروف السوق المتغيرة.

لذا، تكمن مشكلة البحث في محاولة الإجابة نظريا وعمليا علي الأسئلة التالية، ما المقصود بتقنية التوأمة الرقمية، ومنافعها؟، وما هي المزايا التنافسية لتقنية التوأمة الرقمية لشركات الأعمال؟، وما هو دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة للشركات الصناعية؟

٣-أهداف البحث :

الهدف الأساسي من هذا البحث هو توفير فهم شامل لتقنية التوأمة الرقمية ودورها في دعم الميزة التنافسية المستدامة للشركات الصناعية، وعلى وجه التحديد فإن الأهداف تتمثل في: تحديد المقصود بتقنية التوأمة الرقمية، ومنافعها، وتحديد المزايا التنافسية لتقنية التوأمة الرقمية لشركات الأعمال، وكذلك تحديد دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة للشركات الصناعية؟

4- أهمية ودوافع البحث:

تنبع أهمية البحث **أكاديميا** من إثراء الفكر المحاسبي بالتعرف علي تقنية حديثة تؤدي إلي تحقيق مجموعة من المزايا ومنها (تخفيض تكاليف الإنتاج، وإضافة قيمة للشركات، ومراقبة البيانات وتحليلها، والوصول الي عيوب المنتج، ومراقبة الموارد في الوقت الفعلي، وزيادة عمر المنتج من خلال التنبؤ بفشل المنتج، وإتخاذ القرارات في الوقت الفعلي من خلال التحليلات الدقيقة، وتقليل وقت وصول المنتج الي السوق، وتحسين هيكل الإنتاج) وخاصة في ظل ندرة الدراسات العربية وذلك في حدود علم الباحثين مما يجعل للبحث أهمية للباحثين والممارسين لمهنة المحاسبة للتعرف علي واحدة من التقنيات الحديثة للجيل الصناعي الرابع في المجال المحاسبي ألا وهي تقنية التوأمة الرقمية، وذلك من أجل جعل مهنة المحاسبة مواكبة لتطور العصر. **وتطبيقيا** تعتبر الدراسة مهمة لأنها تتناول دور تقنية التوأمة

الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة، وهذا له أهمية كبيرة تساعد الشركات الصناعية علي عدم النظر إلى الوراء وتحديد ما يجب أن تفعله لدفع وإضافة قيمة حقيقية على الصعيدين التشغيلي والإستراتيجي، وفهم إحتياجات العملاء بشكل أفضل، وتطوير وتحسين المنتجات والعمليات والخدمات الحالية، وبالتالي تحقيق ميزة تنافسية مستدامة للشركات التي تطبقها مما يؤدي إلي سد الفجوة الناتجة عن ندرة الأبحاث الأكاديمية في هذا المجال.

وعليه فإن **دوافع البحث** تتمثل في: سد الفجوة البحثية الناتجة عن ندرة الدراسات التطبيقية التي تربط بين تقنية التوأمة الرقمية ودعم الميزة التنافسية المستدامة خاصة بالنسبة للدول النامية، ومنها مصر، وذلك في حدود علم الباحثين. وتوفير دليل عملى للشركات الصناعية يوضح دور تقنية التوأمة الرقمية فى دعم الميزة التنافسية المستدامة.

5- منهجية البحث:

لكى يتم تحليل ودراسة مشكلة الدراسة وتحقيق أهدافها سوف تعتمد الدراسة الحالية في منهجيتها علي جانبين، شق نظري والآخر تطبيقي، وسوف تتبع الدراسة في **شقها النظري** علي المنهج الوصفي التحليلي من خلال دراسة وتحليل الدراسات السابقة التي تهتم بموضوع الدراسة، وسوف يتم من خلال تلك الدراسات معرفة دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة للشركات الصناعية المصرية.

أما **الشق التطبيقي** سوف يتم من خلال إجراء دراسة حالة لتطوير سيارة تويوتا كامري 2024 بتقنية التوأمة الرقمية، وذلك لأن طريقة دراسة الحالة تقدم بيانات متعمقة عن موضوع الدراسة وتوفر نتائج موثوق فيها ولكنها غير قابلة للتعميم إلا بعد تكرار الدراسة في دراسات اخري متعددة، ولتقديم أدلة تجريبية حول كيفية تأثير التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة سوف يقوم الباحثون بإجراء دراسة حالة عن طريق القيام بعمل توأمة رقمية إفتراضية لسيارة تويوتا كامري 2024 بإستخدام المدخلات التي يمكن الحصول عليها من أجهزة الإستشعار المرتبطة بالتوأمة الرقمية، والتي تقوم بجمع المعلومات من النظير المادي (المنتج الحقيقى) حيث يُسمح هذا للتوأم الرقمي بمحاكاة الكائن المادي في الوقت الفعلي.

6- نطاق وحدود البحث:

في ضوء مشكلة البحث وهدفة، يقتصر البحث علي دراسة دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة في الشركات العاملة في مجال التصنيع، وبالتالي يخرج عن نطاق البحث التطبيق في الشركات الخدمية. كما يقتصر البحث علي دراسة تقنية التوأمة الرقمية، وبالتالي يخرج عن نطاق البحث تقنيات الثورة الصناعية الرابعة الأخري مثل الذكاء الإصطناعي وسلسلة الكتل والحوسبة السحابية وغيرها.

وعليه فإن هيكل هذه الدراسة يتكون من ثمانية أقسام، يتناول القسم الأول المقدمة، ومشكلة البحث وأهداف البحث، وأهمية البحث ودوافعه، ومنهجية البحث، ونطاق وحدود البحث، كما يتناول القسم الثاني ماهية الثورة الصناعية الرابعة ودوره في تعزيز الكفاءة ودعم الميزة التنافسية المستدامة، ويتناول القسم الثالث تقنية التوأمة الرقمية من حيث، مفهومها، وخصائصها، ومكوناتها، وأنواعها، ومراحلها، ومنافعها، ومخاطرها وتحدياتها، ويتناول القسم الرابع أثر تقنية التوأمة الرقمية خلال مراحل دورة حياة المنتج علي أبعاد الميزة التنافسية المستدامة، والقسم الخامس يتناول تطبيقات تقنية التوأمة الرقمية في تصنيع المنتجات لدعم الميزة التنافسية المستدامة، والقسم السادس يتناول دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة في الشركات الصناعية، وبالنسبة للقسم السابع فيتناول دراسات الحالة وقصص نجاح تقنية التوأمة الرقمية، وأخيرا يتناول القسم الثامن دراسة الحالة والنتائج والتوصيات ومجالات البحث المقترحة للمستقبل.

7: ماهية الثورة الصناعية الرابعة ودورها في تعزيز الكفاءة ودعم الميزة التنافسية المستدامة.

تمر الشركات الصناعية في جميع القطاعات على مستوى العالم بثورة صناعية رابعة يطلق عليها Industry 4.0، يجري الإنتقال إلى هذا الواقع الجديد للصناعة الرقمية على قدم وساق في جميع أنحاء العالم: ما يقرب من ثلث الشركات تقيس بالفعل الرقمنة على أعلى المستويات، ومن المتوقع أن يرتفع هذا المستوى في المتوسط من 33٪ إلى 72٪ في السنوات الخمس المقبلة، فالجيل الصناعي الرابع أو ما يعرف بالثورة الصناعية الرابعة يعتبر تحول كبير للإنتاج الصناعي بأكمله من خلال دمج التقنيات الرقمية وتقنيات الإنترنت في الصناعة التقليدية (Stăncioiu, 2017).

فالثورة الصناعية الرابعة هو مفهوم ناشئ يعتمد على التحول من التصنيع التقليدي إلى التصنيع الرقمي باستخدام تقنيات حديثة مثل النظم السيبرانية الفيزيائية، وإنترنت الأشياء، والبيانات الضخمة، والتصنيع السحابي، ويهدف هذا الجيل إلى تحسين استغلال الموارد وتحقيق تسليم المنتجات والخدمات بسرعة أكبر، بتكلفة أقل، وبفعالية واستدامة أعلى، من خلال تكامل التقنيات الرقمية وتنظيم البيانات واستخدامها بشكل فعال. (Guan et al., 2020).

أما فيما يتعلق بدور **الثورة الصناعية الرابعة في تعزيز الكفاءة ودعم الميزة التنافسية المستدامة:** تضم الثورة الصناعية الرابعة مجموعة متنوعة من التقنيات الرقمية الحديثة التي تعتبر أساس التصنيع الحديث، والتي تمكن الشركات الصناعية من التحول الرقمي لعملياتها الصناعية، ودعم مزاياها التنافسية المستدامة، ومنها ما يلي :

- **إنترنت الأشياء (Internet of Things- IOT):** إنترنت الأشياء هو شبكة من الأجهزة والكيانات المادية المتصلة بالإنترنت من خلال تقنيات مختلفة (مثل أجهزة الاستشعار والبرمجيات) مما يتيح تبادل وجمع البيانات، وتمكن البيانات المجمعة من تقييم حالة نظام معين ويمكن استخدامها

لتحسين أداء هذا النظام وتحويل المصانع التقليدية إلى مصانع ذكية، مما يسهم في تبسيط الإنتاج، وخفض التكاليف، وتحسين الكفاءة، وتقليل استهلاك الطاقة والتأثير البيئي السلبي (Soori et al., 2023; Arana-Landín et al., 2023; Zhou et al., 2022; Schiefelbein et al., 2019 ; Hassoun et al., 2023).

- **الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence -AI) :** الذكاء الاصطناعي هو مجال في علوم الحاسب الآلي يطور الأنظمة لمحاكاة وتوسيع الفكر البشري في الآلات بهدف منحها الذكاء البشري، ويتحقق ذلك من خلال تعلم الآلة باستخدام خوارزميات لتحليل البيانات والتعلم منها، ويشمل التعلم العميق كأحد تقنيات الذكاء الاصطناعي لتوسيع نطاقه، مما يمكن الآلات من تنفيذ عمليات معقدة مثل التعرف على الكلام واتخاذ القرارات. يؤثر الذكاء الاصطناعي بشكل كبير على القطاع الصناعي من خلال تحسين الكفاءة، وخفض التكاليف، وتحسين الجودة عبر الأتمتة، والتنبؤ، والتفاعل مع البشر، مما يعزز أداء الشركات على مختلف المستويات (Wamba-De ; Soori et al., 2023; Javaid et al., 2022 ; Taguimdje et al., 2020 Azambuja et al., 2023).
- **الحوسبة السحابية Cloud Computing:** الحوسبة السحابية هي نوع من برامج الحاسب الآلي التي توفر البيانات والتطبيقات عبر الإنترنت، مما يسمح بتخزين البيانات والوصول إليها من أي مكان، ويساهم في زيادة الكفاءة، الإنتاجية، وخفض التكاليف في القطاع الصناعي من خلال إلغاء الحاجة إلى الأجهزة المحلية واستخدام نموذج الدفع حسب الاستخدام. كما يمكن أن تتكامل مع أنظمة أخرى مثل حوسبة الحافة والحوسبة الضبابية لتقليل زمن الوصول وتكاليف التخزين(Abdul-Rahaim & Kaittan, 2023;Kiesel et al., 2023; Hasan, 2023; d'Agostino et al., 2023).
- **تحليلات البيانات الضخمة (Big Data Analytics -BDA)** : تحظى تقنية البيانات الضخمة بشعبية كبيرة في المحاسبة والمراجعة، حيث تتعامل مع كميات هائلة من البيانات شبه المهيكلة وغير المهيكلة لتعزيز الابتكار والفعالية. وتُعرف البيانات الضخمة بأنها أصول معلوماتية كبيرة الحجم وعالية السرعة والتنويع، تتطلب معالجة فعالة لتعزيز الرؤى وتحسين عملية صنع القرار. وتساهم تحليلات البيانات الضخمة في تحسين كفاءة العمليات، وإدارة الموارد، وسلسلة التوريد، مما يقلل التكاليف التشغيلية والتوقفات غير المخططة، ويمنح الشركات ميزة تنافسية واستدامة في التصنيع الذكي(Natalya & Nikita, 2023;Belhadi et al., 2020; Atieh et al., 2023; Hezam et al., 2023).
- **النظم السيبرانية الفيزيائية (cyber physical systems- SPS) :** النظم السيبرانية الفيزيائية هي نظم تدمج بين العمليات الحسابية والشبكية والفيزيائية، حيث تراقب الحواسيب والشبكات

العمليات المادية وتتحكم بها من خلال حلقات ردود الفعل. تلعب هذه النظم دورًا مهمًا في رقمنة البيانات وأتمتة العمليات في القطاع الصناعي، مما يسهم في تحسين الكفاءة في مجالات مثل المصانع الرقمية والشبكات الذكية. ومع ذلك، فهي معرضة للهجمات السيبرانية، مما يستلزم خطط أمنية فعالة لضمان أدائها الأمثل وتقليل المخاطر(Aftabi et al., 2023; Shiyan et al., 2023; Tzakova et al., 2023; Shrivastava et al., 2023; Vatsal et al., 2022; Gallais & Imine, 2022).

- **التوأمة الرقمية (Digital twin - DT)** : تستخدم التوأمة الرقمية البيانات الحقيقية لإنشاء تمثيلات رقمية للكائنات المادية، وتتيح الخاصية المتزامنة للميتافيرس مما يسمح بالتعايش بين الواقع المادي والإفتراضي حيث يمكن أن تظهر كائنات العالم الحقيقي في العالم الإفتراضي، وأي تغييرات يتم تطبيقها على هذه الكائنات في العالم الرقمي سوف تنعكس في العالم الحقيقي (Truong et al., 2023)، ومن أجل التنفيذ الفعال للجيل الصناعي الرابع وتقنية التوأمة الرقمية، تتطلب عملية الدمج تحويل المنشآت الصناعية إلى مصانع ذكية، حيث يعتمد تطور الإتصال وقابلية التشغيل البيني interoperability على المراقبة التي تدعم إنترنت الأشياء والأنظمة القائمة على دمج أجهزة الإستشعار، وأدوات النمذجة التنبؤية، وخوارزميات الواقع المعزز. هذه التحويلات تمكن المصانع من الإتصال ببعضها البعض والتفاعل بشكل أفضل مما يؤدي إلى زيادة الكفاءة والإنتاجية (Nagy et al., 2023).

يؤدي **تنفيذ تقنيات الثورة الصناعية الرابعة** السابقة إلى إطلاق ممارسات التصنيع الذكية وتطوير قدرات ذكية فريدة من نوعها حيث يتم إستخدام وجهة النظر القائمة على الممارسة **Practice Based View** لدعم الفرضية القائلة بأن التغير التكنولوجي يساعد الشركات على إنشاء ممارسات ذكية تلعب دور الوسيط في تطوير القدرات الذكية والمرونة وإستقرار الأداء في أوقات الأزمات (Bianco et al., 2023).

ووجد أن **نشر تقنيات الثورة الصناعية الرابعة** تقلل من تكاليف المنتج، وتحسن أوقات التسليم وجودة المنتج ، ومن المتوقع أن تسارع نحو تطوير كفاءات تشغيل إستثنائية وتحسين الإنتاجية بشكل عام (Kamble & Gunasekaran, 2023)

تعتبر تقنية التوأمة الرقمية أحد التقنيات الحديثة للجيل الصناعي الرابع التي تساعد في تحقيق نظام تصنيع ذكي من خلال تحسين الكفاءة والإبتكار وتقليل التكاليف في العمليات الصناعية، ولذلك **سيقدم الباحثون** في الصفحات التالية إستعراضاً شاملا لتقنية التوأمة الرقمية وتطبيقاتها المختلفة، ودورها في تعزيز كفاءة التصنيع ودعم المزايا التنافسية المستدامة للشركات الصناعية في ظل الجيل الصناعي الرابع.

8: تقنية التوأمة الرقمية: مفهومها، وخصائصها، ومكوناتها، وأنواعها، ومراحلها، ومنافعها، ومخاطرها وتحدياتها:

بالنسبة لمفهوم تقنية التوأمة الرقمية، تم تقديم مفهوم تقنية التوأمة الرقمية لأول مرة بواسطة Michael Grieves في أحد عروضه التقديمية حول إدارة دورة حياة المنتج product lifecycle management)-PLM) في عام 2003 في جامعة ميشيغان Michigan (Tao et al., 2018). وهناك العديد من التعريفات لتقنية التوأمة الرقمية، ومنها تعريف الإدارة الوطنية للملاحة الجوية والفضاء National Aeronautics and Space Administration- NASA في عام 2010 ، التي عرفتها علي أنها نموذج محاكاة متكامل متعدد الفيزياء ومتعدد الأوامر ومحتمل لمركبة فضائية أو لطائرة أو نظام يستخدم أفضل النماذج المادية المتاحة، والتحديثات المستمرة لبيانات أجهزة الإستشعار، والمعلومات التاريخية من أسطول مماثل من المركبات أو الأنظمة(fleet history)، وما إلى ذلك لتقمص حياة نسخته الطائرة او إنعكاس حياة التوأم المقابل(Kritzinger et al., 2018; Wagner et al., 2017; Glaessgen & Stargel, 2012).

أيضا عرفت دراسة (Simchenko et al., 2021) تقنية التوأمة الرقمية بأنها نسخة رقمية طبق الأصل من الأصول الحقيقية الفعلية والأجهزة والأنظمة والعمليات والأماكن والأشخاص والمنتجات التي يمكن استخدامها في العديد من الصناعات لتوفير هيكل إنتاج محسّن، وتخفيض تكاليف التشغيل، وزيادة أداء النظام، وتقليل وقت وصول المنتج إلى السوق، وقد أتفقت دراسة (Yan et al., 2022) مع هذا المفهوم لتقنية التوأمة الرقمية.

وتؤكد دراسة (Yang et al., 2017) أن تقنية التوأمة الرقمية هي مزيج من ثلاث مكونات أساسية: (1) توأم افتراضي، (2) توأم حقيقي مطابق، وهو شيء مادي يمكن أن يكون منتج أو نظام أو نموذج أو أي مكون آخر مثل الروبوت أو السيارة أو التوربينات الكهربائية أو الإنسان أو المستشفى... إلخ، (3) دورة تدفق البيانات المتصلة بالمنتج في العالم الحقيقي بواسطة أجهزة الإستشعار التي تغذي البيانات من التوأم الحقيقي إلى التوأم الإفتراضي وتستعيد المعلومات والعمليات من التوأم الإفتراضي إلى التوأم الحقيقي، والتي يفضل تحديثها بإستمرار في الوقت الفعلي، وقد أتفقت دراستي (Bado et al., 2022 ; Rathore et al., 2021) مع هذا التعريف لتقنية التوأمة الرقمية.

بناءً على المفاهيم السابقة حول تقنية التوأمة الرقمية يتضح عدم وجود تعريف موحد للتوأمة الرقمية حتى الآن، و**يري الباحثون** أن التوأمة الرقمية هي نظام يستخدم أجهزة الإستشعار لإنشاء نسخة رقمية إفتراضية من منتج أو آلة أو أي شيء موجود في الواقع الحقيقي، ويمكن للشركات الصناعية إستخدامها لإنشاء نسخ رقمية افتراضية لمنتجاتها، وأصولها التصنيعية، وعملياتها التصنيعية، وذلك بهدف توفير رؤى دقيقة ومعلومات مفيدة تساعد الشركات الصناعية على زيادة جودة المنتج، وتقليل التكاليف، وتحسين كفاءة الأصول، ومراقبة المنتج بشكل مستمر على مدار دورة حياته، وتوقع مستقبل التوأم

المادي، واتخاذ قرارات أفضل، وتحسين عمليات التصنيع بشكل عام، وبالتالي دعم الميزة التنافسية للشركات.

وفيما يتعلق بخصائص تقنية التوأمة الرقمية، فالتوأمة الرقمية تتكون من ثلاثة أجزاء: المنتج الفعلي (المادي)، والمنتج الإفتراضي (الرقمي)، والبيانات المتصلة التي تربط المنتج الفعلي والرقمي معًا وبناءً علي ذلك يمكن تلخيص الخصائص التالية للتوأمة الرقمية (Tao et al., 2018; Yang et al., 2017):

- **الإنعكاس في الوقت الحقيقي Real-Time Reflection** : حيث توجد مساحتان للتوأمة الرقمية وهما (المساحة الفعلية - المساحة الإفتراضية) فالمساحة الإفتراضية هي الإنعكاس الحقيقي للمساحة الفعلية، وهي قادرة على الحفاظ على تزامن فائق ودقة عالية مع المساحة الفعلية، وفي المجال الصناعي يمكن للآلات المجهزة بأجهزة الإستشعار جمع البيانات في الوقت الفعلي من نظام الإنتاج.
- **التفاعل والتلاقي Interaction and convergence:** يمكن تفسير تلك الخاصية من خلال ثلاثة جوانب وهى:

أ- التفاعل والتلاقي في المساحة المادية Interaction and Convergence in Physical Space: حيث أن التوأمة الرقمية هي نوع من التكامل الشامل، حيث يمكن أن تتصل البيانات التي تنشأ في مراحل مختلفة في المساحة المادية (العالم الحقيقي) ببعضها البعض. ببساطة، تتيح التوأمة الرقمية تدفق كامل للبيانات وتضمين جميع العناصر وتقديم خدمات متكاملة. هذا يعني أن المعلومات والبيانات يمكنها التلاقي والتواصل بسهولة في مختلف مكونات النظام أو المنتج في الوقت الحقيقي، مما يسهم في تحسين فهم الشركات للعمليات والأداء واتخاذ القرارات الأفضل.

ب- التفاعل والتلاقي بين البيانات التاريخية والبيانات في الوقت الحقيقي Interaction and Convergence between Historical Data and Real-Time Data: حيث أن بيانات التوأمة الرقمية أكثر شمولية، ولا تعتمد فقط على معرفة الخبراء ولكن أيضًا تجمع البيانات من جميع الأنظمة المنشورة مثل (إنترنت الأشياء، والبيانات الضخمة، والحوسبة السحابية، والذكاء الاصطناعي) في الوقت المناسب، ولذلك يمكن استخدام هذه البيانات بشكل أعمق وأكثر فاعلية من خلال التلاقي.

ج- التفاعل والتلاقي بين المساحة المادية والمساحة الإفتراضية Interaction and Convergence between Physical Space and Virtual Space: المساحة المادية والمساحة الإفتراضية ليسا معزولين في التوأمة الرقمية، وهناك قنوات اتصال سلسة بين المساحتين مما يجعلهما يتفاعلان بسهولة.

- **التطور الذاتي Self-Evolution**: يمكن للتوأمة الرقمية تحديث البيانات في الوقت الحقيقي بحيث يمكن للنماذج الإفتراضية أن تتحسن بإستمرار من خلال مقارنة المساحة الإفتراضية مع المساحة المادية بشكل متزامن.

أما فيما يتعلق بمكونات تقنية التوأمة الرقمية، فتقنية التوأمة الرقمية تشتمل على عدة مكونات مترابطة تعمل معًا لتمكين إنشاء توأم رقمي وتصوره وتحليله، وتشمل هذه المكونات مايلي (Das, 2023):

أ- **جمع البيانات Data Acquisition**:

ينطوي جمع البيانات علي جمع البيانات في الوقت الفعلي من مصادر مختلفة مثل أجهزة الإستشعار وأجهزة إنترنت الأشياء وأنظمة المراقبة الأخرى. يمكن أن تتضمن البيانات معلمات مثل درجة الحرارة والضغط والإهتزاز وإستهلاك الطاقة، وغيرها.يعد الحصول على البيانات الموثوقة والدقيقة أمرا بالغ الأهمية لضمان دقة وفعالية التوأم الرقمي.

ب- **دمج البيانات ومعالجتها Data Integration and Processing:**

بمجرد الحصول على البيانات يجب معالجتها ودمجها لإنشاء تمثيل رقمي شامل. يتضمن ذلك تنظيف البيانات وتصفيتها وتجميعها لضمان جودتها وإتساقها. تستخدم تقنيات معالجة البيانات المتقدمة، بما في ذلك دمج البيانات وإستخراج الخصائص لإستخلاص رؤى ذات معنى ومعلومات قابلة للتنفيذ.

ج- **النمذجة والمحاكاة الافتراضية Virtual Modeling and Simulation**:

النمذجة الافتراضية هي عملية إنشاء نسخة طبق الأصل رقمية مفصلة من الأصول المادية أو النظام. يتضمن ذلك بناء نموذج رياضي يلتقط الهيكل والسلوك والوظائف للكيان المادي. يتم بعد ذلك إستخدام تقنيات المحاكاة لمحاكاة سلوك التوأم الرقمي في الوقت الحقيقي مما يسمح بالتحليل التنبؤي والتحسين وإختبار السيناريو.

د- **الإتصال والتواصل Connectivity and Communication:**

تتطلب تقنية التوأمة الرقمية إتصالاً وتواصلا سلسًا بين الأصل المادي ونظيره الإفتراضي، ويتم تحقيق ذلك من خلال تقنيات إنترنت الأشياء وبروتوكولات الشبكة والمنصات السحابية مما يتيح مزامنة البيانات في الوقت الحقيقي والمراقبة والتحكم عن بعد.

ه- **التصور وواجهة المستخدم Visualization and User Interface**:

يوفر المكون المرئي (التصور) واجهة بديهية وتفاعلية للمستخدمين لتصور التوأم الرقمي والتفاعل معه. فهو يمكن المستخدمين من مراقبة حالة الأصول المادية وأدائها وسلوكها، بالإضافة إلى الوصول إلى البيانات التاريخية والتحليلات. كما تعمل أدوات التصور مثل النماذج ثلاثية الأبعاد، ولوحات المعلومات dashboard ، وواجهات الواقع المعزز (AR) على تحسين تجربة المستخدم وتسهيل إتخاذ القرارات الفعالة.

وبشأن أنواع تقنية التوأمة الرقمية، فيوجد ثلاثة أنواع من التوائم الرقمية حددها Michael Grieves تغطي دورة حياة المنتج بأكملها وهي: نموذج مبدئي للتوأمة الرقمية، والتوأم الرقمي الفعلي، والتوأم الرقمي التجميعى (Lehmann et al., 2023 ;Rozhok et al., 2021):

أ: النموذج المبدئي للتوأمة الرقمية DTP - Digital Twin Prototype: يحتوي هذا النوع على المعلومات اللازمة لوصف وإنشاء نسخ في الواقع لأجزاء المنتج، وتتضمن تلك المعلومات نماذج هندسية وهيكلية ومتطلبات وشروط فنية؛ نموذج التكلفة ونموذج التصميم والنموذج التكنولوجي للمنتج، ويمكن إعتبار النموذج المبدئي للتوأمة الرقمية نموذجا إفتراضيا للمنتج. يمكن القول أن هذا النوع يشمل نموذجًا لكيان لم يتم إنتاجه بعد بالنسبة للأصناف، وهذا يعني أنه يتم إنشاء نموذج رقمي لكيان يجري تطويره وإختباره قبل الإنتاج الفعلي.

ب: التوأم الرقمي الفعلي DTI – Digital Twin Instance: يصف هذا النوع الحالة الفعلية للمنتج الذي يبقى متصلاً به طوال فترة حياته، حيث يتم إنشاء توائم هذا النوع استنادًا إلى النموذج المبدئي للتوأمة الرقمية DTP، وبالإضافة الي ذلك يحتوي توأم الحالة الرقمية على نماذج الإنتاج والتشغيل والتي تشمل تاريخ تصنيع المنتج، واستخدام المواد والمكونات، وإحصائيات الأعطال والإصلاحات واستبدال المكونات والتجمعات، إلخ، وبالتالي يتعرض توأم الحالة الرقمية للتغييرات بناءً على التغيرات في المنتج الفعلي أثناء تشغيله. ويمكن القول أن هذا النوع هو المنتج نفسه في حالته الفعلية بعد الإنتاج، ويتم تمثيل التوأم الرقمي لهذا المنتج بشكل دقيق بناءً على حالته الفعلية والتفاصيل الفعلية للمنتج.

ج: التوأم الرقمي التجميعى DTA – Digital Twin Aggregate : يعرف التوأم الرقمي التجميعى على أنه نظام إدارة معلوماتي لعائلة من المنتجات الفعلية يمكنه الوصول إلى جميع توائمها الرقمية. ويمكن القول أن هذا النوع مصمم لتجميع جميع البيانات من مثيلات التوأم الرقمي للسماح بإنشاء توأم رقمي أكبر يمكن إستخدامه لتحليل وتحسين أداء مجموعة من المنتجات أو العمليات.

أما فيما يتعلق بمنافع تقنية التوأمة الرقمية فتنقسم الي ثلاثة أقسام: منافع إقتصادية وبيئية، ومنافع من منظور محاسبي، ومنافع من منظور قيمة الأعمال:

فالبنسبة للمنافع الإقتصادية والبيئية لتقنية التوأمة الرقمية، فتقدم دراسة (Attaran et al., 2024) مجموعة من المنافع الإقتصادية والبيئية لتقنية التوأمة الرقمية يمكن عرضها كما يلي:

- **المنافع الإقتصادية:**

- تعزيز الكفاءة والإنتاجية: تقوم تقنية التوأمة الرقمية بتحسين كفاءة الإنتاج عن طريق تحسين العمليات، وتقليل الفاقد، وتوقع إحتياجات الصيانة. وهذا يؤدي إلى زيادة الإنتاج وتقليل التكاليف.
- تحسين جودة المنتج وتعزيز الإبتكار: من خلال تيسير الإختبار الإفتراضي والمحاكاة، تسرع تقنية التوأمة الرقمية عملية تطوير المنتج، وتعزز مراقبة الجودة، وتحفز الإبتكار.

- تحسين عملية إتخاذ القرار: توفير رؤى البيانات في الوقت الحقيقي عن طريق تقنية التوأمة الرقمية يساعد في إتخاذ قرارات مستنيرة بشأن توزيع الموارد والجدولة والصيانة، مما يؤدي بدوره إلى تحسين النتائج التجارية.
- ظهور نماذج أعمال وخدمات جديدة: تفتح تقنية التوأمة الرقمية الباب أمام مصادر دخل جديدة، مثل الخدمات التي تعتمد على البيانات مثل الصيانة التنبؤية والمراقبة عن بعد.
- إنشاء وظائف وتقديم المهارات: بينما تولد التكنولوجيا الجديدة مثل التوائم الرقمية وظائف في مجالات مثل تطوير تقنية التوأمة الرقمية وتحليل البيانات وأمان المعلومات، قد تؤدي أيضًا إلى إستبدال بعض الوظائف الحالية من خلال التشغيل التلقائي.

- **<u>المنافع البيئية:</u>**

- تقليل إستخدام الموارد: تعزز تقنية التوأمة الرقمية كفاءة إستخدام الموارد من خلال محاكاة وتحسين العمليات، مما يقلل من هدر المواد ويخفض إستهلاك الطاقة.
- تقليل الإنبعاثات والتلوث: من خلال تشغيل عمليات أكثر كفاءة وتقليل متطلبات الطاقة، تساهم تقنية التوأمة الرقمية في تقليل إنبعاثات غازات الإحتباس الحراري وتلوث الهواء.
- تعزيز مراقبة البيئة والإمتثال للتشريعات: تقدم التوأمة الرقمية تتبعًا في الوقت الحقيقي لتأثيرات البيئة، مما يسهل تحسين عمليات المراقبة والإمتثال للتشريعات البيئية.
- تصميم وتطوير مستدامين: تلعب تقنية التوأمة الرقمية دورًا حيويًا في تصميم وإنشاء منتجات وعمليات أكثر إستدامة بيئيًا.

وبالنسبة لمنافع تقنية التوأمة الرقمية من منظور محاسبي، فتقنية التوأمة الرقمية توفر منافع كبيرة للشركات من حيث (التنبؤ، وتحسين التكلفة ، وتحسين الجودة، وتحسين التقارير المحاسبية)، فمن حيث **التنبؤ،** توفر التوائم الرقمية بيانات ورؤى في الوقت الفعلي، مما يتيح اتخاذ قرارات أكثر استنارة في مجال التصنيع، وهذا يمكن أن يؤدي إلى توقعات مالية وتخطيط استراتيجي أكثر دقة، والتي تنعكس في التقارير المحاسبية (Loaiza & Cloutier, 2022). وتساعد التوائم الرقمية في التنبؤ باختناقات الإنتاج وتحديد أوجه القصور المحتملة في عمليات التصنيع (Kokkonen et al., 2023). وعلاوة علي ذلك يمكن الإستفادة من تقارب التقنيات مثل البيانات الضخمة، والحوسبة السحابية، والتحليلات، والذكاء الاصطناعي، والمحاكاة لإنشاء توأمة رقمية للعالم الرقمي لمراقبة العمليات التجارية وأتمتتها والتنبؤ بها وتحسينها، بما في ذلك العمليات المتعلقة بقطاع الخدمات المالية(Jadhav & Sarnikar, 2023). ومن حيث **تحسين التكلفة** تقنية التوأمة الرقمية تساهم في تخفيض التكاليف وإتخاذ قرارات فعالة من خلال تحسين الكفاءة التشغيلية (Emine, 2023; Liu, 2022). ويمكن للتوأم الرقمي تقدير أكثر دقة للتكاليف من خلال دمج المعلومات من مراحل مختلفة من دورة حياة المشروع، مما يتيح إدارة أفضل للأصول (Kaewunruen et al., 2020). بالإضافة الي أن التوأم الرقمي يساعد في تحسين

استهلاك الطاقة وتقليل الأثر البيئي، مما يؤدي إلى تقليل تكاليف الطاقة (Li et al., 2023). كما أن محاكاة التوأم الرقمي تسمح بتحسين فعال من حيث التكلفة في عمليات التصنيع، مما يؤدي إلى خفض تكاليف الإنتاج وزيادة الربحية (Turgay & Akar, 2023). أيضا يؤدي تطبيق التوائم الرقمية في المعلوماتية المحاسبية إلى تعزيز عمليات صنع القرار، والمساهمة في أساليب خفض التكاليف، وتوفير منصة للتحليل الوظيفي وتحليل التكاليف، مما يساعد في التحليل المالي واتخاذ القرارات الإدارية الفعالة (Dobrolezha et al., 2023). كما تتيح التوائم الرقمية إستخدامًا أكثر كفاءة للموارد من خلال تحسين عمليات الإنتاج وتقليل النفايات، ويؤدي ذلك إلى توفير التكاليف وزيادة الإنتاجية، وهو ما يمكن أن ينعكس في التقارير المالية(Kokkonen et al., 2023)، ومن حيث **تحسين الجودة** فإن استخدام التوأم الرقمي لتحسين عمليات التصنيع يؤدي إلى تحسين الكفاءة وزيادة الإنتاجية والجودة، مما ينعكس في التقارير المحاسبية من خلال تتبع الإيرادات الناتجة عن العمليات المحسنة (Turgay & Akar, 2023)، ويوفر تحليلًا دقيقًا للبيانات عبر مراحل دورة حياة المشروع، مما يساهم في تحسين جودة إدارة الأصول والموارد وتقليل النفايات (Kaewunruen et al., 2020). ومن حيث **تحسين التقارير المحاسبية** تقنية التوأمة الرقمية تقدم منصة تحليلية متقدمة لتحليل التكاليف والوظائف، مما يساهم في تحسين التحليل المالي ويعزز تقارير المحاسبة الإدارية (Dobrolezha et al., 2023). كما أن تحسين استهلاك الطاقة وخفض تكاليف الإنتاج من خلال التوأمة الرقمية ينعكس مباشرة في التقارير المالية ويعزز دقة المتابعة المالية (Li et al., 2023). علاوة علي ذلك توفر التوائم الرقمية بيانات ورؤى في الوقت الفعلي، مما يتيح إتخاذ قرارات أكثر إستنارة في مجال التصنيع، وهذا يمكن أن يؤدي إلى توقعات مالية وتخطيط إستراتيجي أكثر دقة، والتي يمكن أن تنعكس في التقارير المحاسبية (Loaiza & Cloutier, 2022).

وفيما يتعلق بمنافع تقنية التوأمة الرقمية من منظور قيمة الأعمال، تستكشف دراسة (Evangeline & Anandhakumar, 2020) إمكانيات تقنية التوأمة الرقمية في تحقيق القيمة داخل الأعمال التجارية، مستفيدة من زيادة سعة التخزين وتكاليف الحوسبة الحالية التي دفعت إلى تبني تقنية التوأمة الرقمية في عدد كبير من حالات الإستخدام والإمكانيات، وتؤكد على أهمية تركيز الشركات على القضايا التي تزيد قيمتها التجارية مثل الأداء الإستراتيجي وديناميكيات السوق وتحسين أداء المنتجات وتطويل فترة إستخدامها، وتسريع دورات التصميم، وإمكانية الحصول على مصادر دخل جديدة، وإدارة تكاليف الضمان بشكل أفضل، ويمكن ترجمة هذه القضايا الإستراتيجية إلى تطبيقات محددة قد توفر قيمة تجارية واسعة النطاق قد تحققها التوأمة الرقمية. ويوضح الجدول رقم (1) ملخصًا لقيم الأعمال التي تقدمها التوأمة الرقمية للأعمال التجارية، بالإضافة إلي أنه يمكن أن تساعد تقنية التوأمة الرقمية أيضًا في معالجة العديد من مؤشرات الأداء والكفاءة الرئيسية الأخرى لشركات التصنيع. بشكل عام، قد تقدم التوأمة الرقمية العديد من التطبيقات لزيادة القيمة والبدء في إحداث تغيير جذري في كيفية قيام الشركة بأعمالها، ويمكن قياس هذه القيمة في نتائج ملموسة يمكن إرجاعها إلى المقاييس الرئيسية للشركة.

جدول رقم (1) التوأمة الرقمية لتوليد القيم التجارية لشركات التصنيع

بعد القيمة التجارية **Category of business value**	القيم التجارية المحددة المحتملة **Potential specific business values**
الجودة **Quality**	• تحسين الجودة الشاملة • التنبؤ بالعيوب في الجودة وإكتشافها في وقت سابق • الرقابة على خسارة الجودة (Control quality escapes) والقدرة على تحديد متى بدأت مشكلة الجودة
تكلفة الضمان والخدمات **Warranty cost and services**	• فهم تكوين المعدات الحالي في الميدان لتقديم خدمة أكثر كفاءة • تحديد مشاكل الضمان والإلتزامات بشكل إستباقي ودقيق لتقليل تكلفة الضمان الشاملة وتحسين تجارب العملاء
تكلفة العمليات **Operations cost**	• تحسين تصميم المنتج وتنفيذ التغييرات الهندسية • تحسين أداء معدات التصنيع • تقليل العمليات وتغييرها (Reduce operations and process variability)
الإحتفاظ بالسجلات والتسلسل **Record retention and serialization**	• إنشاء سجل رقمي للأجزاء المتسلسلة والمواد الخام لإدارة عمليات الإستدعاء(ويقصد بعمليات الاستدعاء أنها سحب منتجات معينة من السوق أو من إستخدام العملاء بسبب مشكلة أو خلل محتمل في السلامة أو الأداء) والتزامات الضمان بشكل أفضل، وتلبية متطلبات التتبع الإلزامية.
تكلفة إدخال منتج جديد والمدة الزمنية **New product introduction cost and lead time**	• تقليل وقت الوصول إلى السوق لمنتج جديد • تقليل التكلفة الإجمالية لإنتاج منتج جديد • التعرف بشكل أفضل على المكونات ذات الفترة الزمنية الطويلة وتأثيرها على سلسلة التوريد
فرص نمو الإيرادات **Revenue growth opportunities**	• تحديد المنتجات في الميدان الجاهزة للترقية (هذا يشير إلى عملية تحديد المنتجات التي تم بيعها أو إستخدامها بالفعل من قبل العملاء والتي يمكن تحسينها أو ترقيتها بإصدار أحدث أو تحسينات في التصميم أو الوظائف) • تحسين الكفاءة وتكلفة خدمة المنتج

المصدر: بتصرف [Evangeline & Anandhakumar, 2020, P: 44]

بناءً علي الدراسات السابقة التي تحدثت عن منافع تقنية التوأمة الرقمية **يري الباحثون** أن تلك المنافع من **منظور محاسبي** لها بعض الآثار الإيجابية علي **الأداء المالي للشركة** حيث أن :

- زيادة الإنتاج وتقليل التكاليف بإستخدام التوأمة الرقمية ينعكس بشكل إيجابي على الأداء المالي للشركة في شكل زيادة في الإيرادات.
- زيادة جودة المنتج وتسريع عملية التطوير بإستخدام التوأمة الرقمية يمكن أن تؤدي إلى زيادة الطلب علي المنتج، وهذا ينعكس إيجابيا على الأداء المالي للشركة من خلال زيادة الإيرادات.
- الحصول علي البيانات في الوقت الحقيقي بإستخدام التوأمة الرقمية يمكن أن يساعد إدارة الشركة في إتخاذ قرارات مستنيرة بشأن التخطيط المالي وإدارة الموارد، مما ينعكس بشكل إيجابي علي الأدء المالي للشركة من خلال تقليل المخاطر المالية وزيادة كفاءة العمل.
- تقنية التوأمة الرقمية تحتاج إلي توظيف المهارات المتخصصة مثل تطوير تقنية التوأمة الرقمية وتحليل البيانات، وهذا ينعكس بشكل إيجابي على الأداء المالي للشركة من خلال تحسين الإنتاجية والجودة وتقليل التكاليف، وتطوير فريق عمل متميز ومتخصص يساهم في تحقيق الأهداف المالية والإستراتيجية للشركة.
- تقليل الهدر وإستهلاك الطاقة يمكن أن يوفر وفورات مالية كبيرة من خلال تقليل فواتير الطاقة وتكاليف المواد الخام.
- تقليل الإنبعاثات والتلوث البيئي بإستخدام التوأمة الرقمية، تستطيع الشركة تجنب تكاليف الإمتثال للتشريعات والقوانيين البيئية وتخفيض تكاليف التنظيف والتصحيح في حالة وقوع حوادث بيئية، وهذا ينعكس بشكل إيجابي علي الأداء المالي للشركة من خلال تقليل المخاطر المالية وتحسين الربحية.
- مراقبة البيئة في الوقت الحقيقي بإستخدام التوأمة الرقمية والإلتزام بالتشريعات والقوانيين البيئية يمكن للشركة من تجنب الغرامات والعقوبات المالية التي تفرضها السلطات البيئية على الشركات التي تنتهك القوانيين والتشريعات، وهذا ينعكس بشكل ايجابي علي الأداء المالي من خلال تقليل التكاليف، ويحافظ على السمعة الإيجابية للشركة.
- تصميم الشركات لمنتجات وعمليات أكثر إستدامة بإستخدام التوأمة الرقمية يمكن أن يؤدي إلى تقليل تكاليف الإنتاج والتشغيل على المدى الطويل. على سبيل المثال، قد تكون المواد الخام البديلة أكثر تكلفة في البداية، ولكنها قد توفر وفورات كبيرة في المواد والطاقة والموارد على المدى الطويل.

وبشأن مخاطر وتحديات تطبيق تقنية التوامة الرقمية، فالتوأمة الرقمية مثل أي تقنية مبتكرة تجذب إهتمام المهاجمين السيبرانيين الذين يمكن أن يستهدفوا هذه التكنولوجيا، وبالتالي فإنه من الضروري ضمان أمان البيانات وسرية المعلومات على مختلف المستويات في هذه التكنولوجيا، وبالإضافة إلى ذلك

يجب ملاحظة ثلاث مهام إشكالية مرتبطة بضمان تطبيق الشركة للتوأمة الرقمية، ويمكن أن يترتب عليها تكاليف مالية كبيرة، وهي (Slepneva, 2021):

- **تحقيق التمكين الفعال للتوأمة الرقمية Realization of effective empowerment of the digital twin:** ويقصد بها القدرة على استخدام التوأمة الرقمية بشكل فعّال ومجدٍ. نظرًا لأن الأصول الثابتة تتعرض للتدهور الفعلي بسبب الإستخدام وتقادم التكنولوجيا، سيكون هناك حاجة إلى إستثمارات كبيرة لتحديث مكونات التوأمة الرقمية، وتوسيعها، أو إستبدالها بتقنيات رقمية أخرى. حيث كلما زاد التدهور التقنى والمادى للأصول، زادت تكلفة التحسينات المطلوبة للحفاظ على كفاءة التوأم الرقمي.
- **المشكلة الثانية** تتعلق بالقضايا الاجتماعية والأخلاقية والسياسية المحتملة التي تنشأ نتيجة استخدام التنبؤات الرقمية.
- **المخاطر التقنية Technical risks** : يمكن أن تكون تكاليف التوقف عن العمل بسبب تعطيل البنية التحتية الرقمية والذكية مرتفعة، حيث يمكن أن تصل قيمة الخسائر إلى 540.000 دولار في الساعة بسبب فشل تقني أو ما يصل إلى 647 مليار دولار سنويًا، وللقضاء على إحتمال وجود تكاليف مالية كبيرة لتصحيح الأخطاء التقنية التي قد تنشأ بسبب إعطاء دور أساسي للتوأمة الرقمية في عمل الشركة **فمن الضروري** توفير مستوى الدعم والصيانة اللازم للبنية التحتية من قبل موظفين مؤهلين تأهيلاً عالياً.

9: أثر تقنية التوأمة الرقمية خلال مراحل دورة حياة المنتج علي أبعاد الميزة التنافسية المستدامة:

لمعرفة أثر تقنية التوأمة الرقمية خلال مراحل دورة حياة المنتج علي أبعاد الميزة التنافسية المستدامة سيتم دراسة تقنية التوأمة الرقمية في كل مرحلة من مراحل دورة حياة المنتج بما في ذلك مراحل التصميم، والتصنيع، ومرحلة ما بعد البيع، ومرحلة التخلص من المنتج فى نهاية عمره الإنتاجى، ومن ثم التعرف علي أثر تقنية التوأمة الرقمية علي أبعاد الميزة التنافسية المستدامة، ويمكن توضيح ذلك علي مستوي كل مرحلة علي حدة كما يلي:

1/9: مرحلة تصميم المنتج بقيادة التوأمة الرقمية: أوضحت دراسة (Zhang et al., 2022) أنه يمكن لتقنية التوأمة الرقمية في **مرحلة التصميم والتطوير** أن تكون مفيدة في إنشاء نماذج مفصلة للمنتج وتحليل أدائه المحتمل. كما يمكن إستخدام البيانات والنماذج المتاحة لإتخاذ قرارات تصميم أفضل وتحسين المعلمات الرئيسية لتحقيق جودة أعلى وتحسين الموثوقية . بالمثل تشير دراسة (Tao et al., 2018) أنه يمكن إستخدام التوأمة الرقمية في **مرحلة تصميم المنتج** لدمج الخصائص الفيزيائية للمنتج مع بيانات البيئة المختلفة، مما يساعد في تحسين مخططات التصميم، ويمكن لتقنية التوأمة الرقمية أيضا دعم تحليلات التكلفة وإختيار المواد وعمليات التصنيع والتسعير لضمان تحقيق أقصى قدر من الأرباح،

وتتمثل منافع تلك المرحلة في تحسين جودة المنتج، وتقليل التكاليف وزمن التطوير، وتحسين تجربة المستخدم وراحة الإستخدام، ودعم إتخاذ القرارات الذكية، وتحسين إستراتيجيات المنافسة في السوق.

2/9: مرحلة تصنيع المنتج بقيادة التوأمة الرقمية: أوضحت دراسة (Zhang et al., 2022) أنه يمكن إستخدام تقنية التوأمة الرقمية في **مرحلة التصنيع** لمراقبة العمليات التصنيعية وضمان تنفيذ العمليات بكفاءة ودقة، ويمكن أيضًا إستخدام البيانات المتاحة لتحسين عمليات الإنتاج وتقليل الأخطاء والهدر. بالمثل تشير دراسة (Tao et al., 2018) أنه يمكن إستخدام تقنية التوأمة الرقمية في مرحلة **تصنيع المنتج** لتوقع وإختبار أداء المنتج بشكل مباشر من خلال محاكاة مخططات التصميم وعوامل البيئة وعمليات التصنيع، مما يساعد في تحسين كفاءة عمليات التصنيع، وتحسين كفاءة إستخدام الموارد، وتخطيط الإنتاج، ومراقبة العمليات، وتجنب الإختبارات والتحقق المطول، ويمكن أيضا لتقنية التوأمة الرقمية إستخدام البيانات التاريخية لإجراء إختبارات محاكاة وفقًا لخصائص جسم المستخدم وعادات الإستخدام، مما يساعد في تحسين جودة المنتج، وتحسين راحة وملاءمة المنتج في الإستخدام العملي.

3/9: مرحلة الإستخدام(التشغيل والصيانة) في ضوء التوأمة الرقمية: في **مرحلة التشغيل والصيانة** تشير دراسة(Zhang et al., 2022) أنه يمكن لتقنية التوأمة الرقمية أن تكون قيمة كبيرة في مراقبة حالة المنتج أثناء التشغيل وتحليل البيانات الواردة من أجهزة الإستشعار. بالمثل تشير دراسة (Tao et al., 2018) أنه يمكن إستخدام تقنية التوأمة الرقمية في **مرحلة التشغيل** لتسجيل وإدارة بيانات حالة المنتج والبيانات التاريخية للصيانة لتوقع عمر المنتج والفشل المحتمل، ويمكن لتقنية لتوأمة الرقمية إستخدام البيانات المتولدة خلال مرحلة الإستخدام لتحسين تصميم المنتج وتوفير خدمات ما بعد البيع فعالة ودقيقة، كما يمكن إستخدامها لتوقع الأعطال والصيانة التنبؤية لتحسين كفاءة الصيانة وتجنب التوقف غير المخطط للمعدات. قدرة تقنية التوأمة الرقمية في مرحلة التشغيل تشمل التنبؤ والتصميم لمنتجات الجيل القادم، وتحديث المنتج ودعم الصيانة لأصول التصنيع، حيث أنه من خلال إستخدام البيانات والتحليلات من الأجهزة المدمجة في المنتجات الذكية والأدوات، يمكن تحسين العمليات وعمليات إعادة التكوين والصيانة، وتوفير الدعم في إتخاذ القرارات لعمليات متعددة الأبعاد، وتطوير الإستراتيجيات، وتوقع العمليات من خلال إعادة إستخدام المعرفة والوعي(Lim et al., 2020).

4/9: مرحلة التخلص من المنتج (إعادة التدوير أو التخلص الآمن) في ضوء التوأمة الرقمية: تعد مرحلة التخلص من المنتج في نهاية عمره الإنتاجي، بما في ذلك إعادة التدوير أو التخلص الآمن، جانبًا حاسمًا من مراحل دورة حياة المنتج في الشركات الصناعية، وتلعب تقنية التوأمة الرقمية دورًا حيويًا في تلك المرحلة نظرا لما توفره من تمثيل إفتراضي للأصول المادية، والتكيف المستمر بناءً على البيانات في الوقت الحقيقي للتنبؤ بالسلوك المستقبلي للأصول(Simões et al., 2022) وفيما يلي بعض النقاط الرئيسية التي يجب علي الشركات الصناعية مراعاتها خلال مرحلة التخلص من المنتج:

- **التوائم الرقمية والتخلص من المنتجات:** يمكن تطبيق التوائم الرقمية على التخلص من المنتجات من خلال دمج المعلومات والكيانات لمحاكاة وتحسين عملية التخلص، مما يضمن ممارسات آمنة وصديقة للبيئة (Huang & Yan, 2022; Hannola et al., 2021). علي سبيل المثال بالنسبة لموقع دفن النفايات الخطرة، يمكن إستخدام تقنية التوأمة الرقمية لحساب المخاطر البيئية لمصادر التسرب، وتحسين الروابط المتعددة الوحدات، ودعم إتخاذ القرار في الوقت الحقيقي في البيئات الديناميكية(Wu & Li, 2022).
- **تحليل عملية التخلص بإستخدام المحاكاة في الوقت الحقيقي والنماذج الإفتراضية:** يمكن إستخدام نماذج المحاكاة في الوقت الحقيقي والنماذج الإفتراضية لتحليل عملية التخلص والتنبؤ بها، مما يمكن الشركات من تحسين إستراتيجياتها وتقليل النفايات(Hannola et al., 2021).
- **قدرات الشركات في عملية التخلص ومشاركة أصحاب المصلحة:** تحتاج الشركات إلى إعادة صياغة عمليات العملاء والإبتكار وبناء قدرات الشركة ذات الصلة لإدارة التخلص من المنتجات بفعالية طوال دورة حياة المنتج بمشاركة العديد من أصحاب المصلحة (Hannola et al., 2021).
- **نماذج الأعمال الرقمية والنظم السيبرانية في عمليات التخلص:** يمكن للتحول الرقمي في ظل الثورة الصناعية الرابعة أن يخلق نظم سيبرانية جديدة ونماذج أعمال تحسن سلسلة القيمة وتزيد من رفاهية المجتمع وجودة البيئة، بما في ذلك ممارسات التخلص من المنتجات الأكثر إستدامة(Egor, 2020).
- **الجوانب الإدارية والخيارات الإستراتيجية في عمليات التخلص:** يعتبر التحول الرقمي خيارًا إستراتيجيًا من قبل المديرين التنفيذيين، ويجب على الشركات أن تأخذ في الإعتبار التوترات الأساسية والبدائل الإستراتيجية لإدارة التخلص من المنتجات بفعالية وضمان مستقبل مستدام(Furr et al., 2022).

مما سبق يستخلص الباحثون أن تقنية التوأمة الرقمية تؤثر بشكل كبير على مراحل دورة حياة المنتج وتدعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة في القطاع الصناعي. **في مرحلة التصميم،** تساعد التوأمة الرقمية في تحسين جودة المنتج وتقليل التكاليف وزمن التطوير. **في مرحلة التصنيع،** تساهم في تحسين كفاءة الإنتاج واستخدام الموارد. **في مرحلة التشغيل والصيانة،** توفر إمكانية التنبؤ بالأعطال والصيانة التنبؤية، مما يزيد من كفاءة العمليات ويقلل من التوقف غير المخطط له. وأخيرًا، في **مرحلة التخلص** من المنتج، تدعم التوأمة الرقمية ممارسات صديقة للبيئة من خلال تحسين عمليات إعادة التدوير والتخلص الآمن. يمكن القول أن التوأمة الرقمية تساهم في تحسين استراتيجيات المنافسة المستدامة من خلال تعزيز الابتكار والكفاءة وتقليل التكاليف عبر دورة حياة المنتج.

10: تطبيقات تقنية التوأمة الرقمية في تصنيع المنتجات لدعم الميزة التنافسية المستدامة.

تتمتع تقنية التوأمة الرقمية بالعديد من التطبيقات في مجال التصنيع التي يمكنها دعم الميزة التنافسية المستدامة، **وفيما يلي بعض المجالات الرئيسية**:

- **تحسين عملية صنع القرار والكفاءة التشغيلية Improved Decision-Making and Operational Efficiency :** تسمح التوائم الرقمية للمصنعين بمحاكاة وتحليل عمليات الإنتاج في بيئة إفتراضية قبل تنفيذ التغييرات في المصنع الفعلي، وهذا يمكنهم من تحسين سير العمل، وتحديد الإختناقات، وإتخاذ قرارات تعتمد على البيانات لتحسين الكفاءة والإنتاجية(Abayadeera & Ganegoda, 2024). من خلال إختبار العمليات أو المنتجات الجديدة إفتراضيًا يمكن للشركات تقليل تكاليف النماذج الأولية الفعلية وفترات التوقف عن العمل(Wynn & Irizar, 2023).
- **تعزيز الصيانة وإدارة الأصول Enhanced Maintenance and Asset Management :** يمكن إستخدام التوائم الرقمية لمراقبة صحة وأداء معدات التصنيع في الوقت الفعلي. من خلال تحليل بيانات أجهزة الإستشعار من الأصول الفعلية، يمكن للنماذج الإفتراضية التنبؤ بإحتياجات الصيانة وتحسين جداول الصيانة وتقليل فترات التوقف غير المخطط لها(Abayadeera & Ganegoda, 2024; Böttjer et al., 2023). تساعد هذه الطريقة الإستباقية للصيانة على إطالة عمر المعدات وتخفيض تكاليف الصيانة.
- **الإنتاج الشخصي والتخصيص الشامل Personalized Production and Mass Customization :** تعمل التوائم الرقمية على تمكين شركات التصنيع من تكوين خطوط الإنتاج وتكييفها بسرعة لتلبية متطلبات العملاء المتغيرة. ومن خلال دمج تفضيلات العملاء ومواصفات التصميم في النموذج الإفتراضي، يمكن للشركات إنشاء منتجات مخصصة بسرعة دون التضحية بالكفاءة(Abayadeera & Ganegoda, 2024). تسمح هذه القدرة على التخصيص الشامل للمصنعين بتمييز أنفسهم في السوق والإستجابة بمرونة أكبر لإحتياجات العملاء.
- **تدريب القوى العاملة وتنمية المهارات Workforce Training and Skill Development :** يمكن إستخدام التوأمة الرقمية التفاعلية لتدريب المشغلين والفنيين في بيئة إفتراضية آمنة قبل العمل على المعدات الفعلية(Jalilvand et al., 2023). ومن خلال محاكاة سيناريوهات العالم الحقيقي وتقديم التعليقات، تساعد التوأمة الرقمية التفاعلية العمال على تطوير المهارات الأساسية وتقليل مخاطر الأخطاء أو الحوادث على أرض المصنع. تعتبر هذا الطريقة في التدريب أكثر فعالية من حيث التكلفة وقابلية التطوير من الأساليب التقليدية.
- **الإستدامة والحد من الأثر البيئي:** يمكن إستخدام التوائم الرقمية لنمذجة وتحسين إستهلاك الطاقة، وتقليل النفايات، والأثر البيئي في عمليات التصنيع. ومن خلال محاكاة سيناريوهات

مختلفة وتحليل البيانات، يمكن للشركات تحديد الفرص المتاحة لتقليل إستخدام الطاقة، وتقليل النفايات، وتحسين الإستدامة(Abayadeera & Ganegoda, 2024). تساعد هذه الطريقة المعتمدة على البيانات في الإدارة البيئية الشركات المصنعة على تلبية المتطلبات التنظيمية وتقليل إنبعاثات الكربون.

يخلص الباحثون مما سبق إلي أنه في قطاع التصنيع، تحدث تقنية التوأمة الرقمية ثورة في عمليات الإنتاج من خلال توفير رؤى في الوقت الفعلي، وتحسين عملية صنع القرار، والكفاءة التشغيلية، وتسهيل الصيانة التنبؤية، وتعزيز الصيانة وإدارة الأصول، وتخصيص الإنتاج، وتدريب القوى العاملة، وتحديد الإختناقات، وتبسيط سير العمل، وتقليل وقت التوقف عن العمل، ومنع الأعطال غير المتوقعة، وتحسين أداء المعدات، وتخفيض التكاليف والأثر البيئي. بالإضافة إلى ذلك، تسهل التوائم الرقمية المراقبة في الوقت الفعلي لمقاييس الإنتاج، مما يتيح إتخاذ قرارات إستباقية، وتحسين الموارد، ومراقبة الجودة.

11: دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة في الشركات الصناعية:

تقنية التوأمة الرقمية هي إنشاء نسخة طبق الأصل إفتراضية من الأصول الفعلية والعمليات والأنظمة تعمل على تمكين الشركات من تحسين الأداء والكفاءة، وزيادة الجودة، وتخفيض التكاليف، ودفع الإبتكار، وفيما يلي بعض الأدوار الرئيسية التي تساهم بها تقنية التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة:

توضح دراسة (Ukko et al., 2021) أن تقنية التوأمة الرقمية تشير إلى نسخة إفتراضية دقيقة لأصل مادي أو عملية أو نظام يمكن إستخدامها عبر مختلف العمليات التجارية، وأن لها بعض الأدوار الرئيسية التي يمكن بها للشركات الصناعية تحقيق ميزة تنافسية مستدامة من خلال إستخدامهم لتقنية التوأمة الرقمية وهي:

- **تحسين إتخاذ القرار:** توفر التوأمة الرقمية بيانات ورؤى في الوقت الفعلي، مما يمكّن الشركات من إتخاذ قرارات مستنيرة تعمل على تحسين الأداء وتخفيض التكاليف وتحد من التأثير البيئي.
- **تعزيز الكفاءة:** من خلال محاكاة وإختبار السيناريوهات في بيئة إفتراضية يمكن للشركات تحديد أوجه القصور وتنفيذ التحسينات قبل إجراء التغييرات على الأنظمة الفيزيائية، مما يؤدي إلى زيادة الإنتاجية وتخفيض التكاليف.
- **الصيانة التنبؤية:** يمكن للتوأمة الرقمية التنبؤ بموعد إحتمال تعطل المعدات، مما يسمح للشركات بأداء صيانة مستهدفة وتجنب الأعطال المكلفة، مما يؤدي في النهاية إلي تقليل الفاقد ويطيل عمر الأصول، ويضمن الإنتاج دون انقطاع، مما يعزز في النهاية موثوقية الشركة وسمعتها في الصناعة.

كما تشير دراسة(Rezaei et al., 2023) إلي أنه يمكن لتقنية التوأمة الرقمية أن تعزز الميزة التنافسية المستدامة من خلال ما يلي:

- **تحسين سلسلة التوريد:** يمكن للتوائم الرقمية أن تساعد الشركات على تحسين سلاسل التوريد الخاصة بها من خلال محاكاة سيناريوهات مختلفة وتحديد الإختناقات، مما يؤدي إلى تحسين الكفاءة وتقليل النفايات وتعزيز الإستدامة.
- **تتبع الشفافية:** يمكن لتقنية سلسلة الكتل عند دمجها مع التوأمة الرقمية أن توفر تتبعًا وشفافية في جميع مراحل سلسلة التوريد، مما يمكّن الشركات من تتبع أصل ومسار المنتجات، وضمان الإمتثال لمعايير الاستدامة وبناء الثقة مع العملاء.

وبالمثل تري دراسة (Ünal et al., 2023) أن إستخدام تقنية التوأمة الرقمية في شركات التصنيع يحقق الكفاءة التشغيلية، ويحسن جودة المنتج، وذلك كما يلي:

- **زيادة الكفاءة التشغيلية:** تسمح تقنية التوأمة الرقمية بالمراقبة في الوقت الفعلي وتحسين عمليات التصنيع، مما يؤدي إلى تقليل إستهلاك الطاقة وتقليل النفايات وتحسين الكفاءة الإجمالية للمعدات. ويترجم هذا إلى تخفيض في التكاليف وتحسين الإنتاجية ويمنح الشركات ميزة تنافسية مستدامة.
- **تحسين جودة المنتج:** تسمح التوائم الرقمية بالإختبار الإفتراضي ومحاكاة المنتجات قبل الإنتاج المادي، مما يمكّن الشركات من تحديد المشكلات وحلها في وقت مبكر من عملية التطوير. وينتج عن ذلك منتجات عالية الجودة تلبي توقعات العملاء وتتميز في السوق.

في ضوء عرض الدراسات السابقة يمكن تلخيص ما توصلت إليه من نتائج بشأن دور التوأمة الرقمية في دعم الميزة التنافسية المستدامة وأهمها **أن** تقنية التوأمة الرقمية تساهم بشكل كبير في تحقيق الكفاءة التشغيلية، وتحسين جودة المنتج، وزيادة الشفافية، وتخفيض التكاليف، وتعزيز الإستدامة، وبالتالي منح الشركات الصناعية ميزة تنافسية مستدامة في السوق.

12: دراسات الحالة وقصص نجاح تقنية التوأمة الرقمية:

هناك العديد من قصص النجاح لشركات قامت بتطبيق تقنية التوأمة الرقمية، و**سيعرض الباحثون دراستي حالة** تسلط الضوء على التطبيقات الناجحة لتقنية التوأمة الرقمية في مختلف الصناعات، والتي توضح المنافع الكبيرة والتحسينات التي تشهدها الشركات عند تنفيذ تقنية التوأمة الرقمية.

1/12: تطبيق التوأمة الرقمية في المجال الصناعي بصفة عآمة في شركتي(وارتسيلا ، وكايسر):

وارتسيلا هي شركة فنلندية تصمم وتصنع محركات رباعية الأشواط للرحلات البحرية في 70 دولة مختلفة، وتعد منتجاتها من أكبر المحركات في جميع أنحاء العالم حيث يتراوح عمرها بين 25 و 30 عامًا. اعتادت الشركة على بناء نماذج مبدئية لكل محرك من أجل إختبارها وتحسينها لكن إنتاجها كان مكلفًا للغاية، ولهذا السبب قررت الإنتقال إلى العالم الرقمي. اليوم تعمل شركة وارتسيلا على تغذية نماذجها وعمليات المحاكاة الخاصة بها ببيانات أداء العالم الحقيقي من مئات أجهزة الاستشعار المثبتة على كل محرك جديد، مما يؤدي إلى إنشاء محاكاة "توأمة رقمية" تحاكي ظروف التشغيل الفعلية أثناء الخدمة. بإستخدام النماذج والمحاكاة ثلاثية الأبعاد تمكنت الشركة من تحقيق تصاميم أفضل وتجنبوا

الأخطاء في عملية التصنيع، ومن أجل تحقيق أقصى إستفادة من هذه النماذج ، ذهبت شركة وارتسيلا خطوة أخرى إلى الأمام وقررت تنفيذ التوأمة الرقمية، وفي الوقت الحاضر تقوم الشركة بتثبيت العديد من أجهزة الإستشعار في المحركات الجديدة التي تجمع البيانات المتعلقة بأداء المحرك وتغذي النماذج الرقمية والمحاكاة. تمثل التوأمة الرقمية لشركة وارتسيلا ظروف تشغيل المحركات ومن خلال التحليلات، فإن الشركة قادرة على العمل والتحسين في عدة مجالات: تحليل الأصول ومراقبتها، الصيانة التنبؤية، التشخيص التنبئي، تحسين أداء النظام، تصميم الآلات والنظام، اختبار النظام والتحقق منه (Rodríguez Murciano, 2019).

كايسر هي شركة تصنيع منتجات الهواء المضغوط بالولايات المتحدة، وهي تقدم أيضا خدمات الصيانة والتشغيل للعملاء. تستخدم الشركة وحدة تحكم متقدمة تسمي Sigma Air Manager 4.0، وذلك لتمكين المستخدم النهائي من إجراء جميع أعمال الصيانة والتقييم والخدمة للنظام بنفسه (سيرسل SAM 4.0 إشعارات للمستخدم النهائي عند الحاجة إلى الخدمة)، أو يمكن للمستخدم النهائي إختيار نموذج خدمة الصيانة التنبؤية مع التشخيص عن بعد. بفضل التوأمة الرقمية تمكنت الشركة من تقديم الصيانة الوقائية والتصحيحية، وأيضًا الصيانة التنبؤية حيث يلتقي العالم الفعلي بالعالم الإفتراضي ضمن إطار نموذج هيكلي مثل Sigma Smart Air من شركة كايسر، حيث يتم تمثيل النظام المحدد للهواء المضغوط، وفقًا لمتطلبات المشغل بشكل إفتراضي عبر التوأمة الرقمية، وتنتقل البيانات التشغيلية من محطة الهواء المضغوط بشكل آمن إلى مركز بيانات شركة كايسر ويتم تحليلها في الوقت الحقيقي. يتيح توفر بيانات التشغيل في الوقت الفعلي مراقبة حالة health محطة الهواء المضغوط، وهذا يعني أن الصيانة تتم بدقة حسب الحاجة، ويمكن إكتشاف الأخطاء المحتملة مسبقًا وبدء إجراءات الصيانة المناسبة تلقائيًا في الوقت المناسب. في النهاية، يستفيد المستخدم النهائي من تقليل كبير في تكاليف إنتاج الهواء المضغوط وتكاليف التشغيل، بالإضافة إلى تحسين توفر الهواء المضغوط. كما أن الجمع بين التشخيص عن بعد والصيانة التنبؤية الموجهة حسب الطلب يضمن أقصى قدر من توافر إمدادات الهواء المضغوط وفعالية النظام الكاملة؛ منع التوقف غير المخطط له، وزيادة كفاءة الطاقة، وتخفيض تكاليف الخدمة بنسبة تصل إلى 30 %، وتوفير التحكم الأمثل في نظام الهواء المضغوط عند الطلب طوال دورة حياة النظام بأكملها (Kaeser, 2023).

2/12: تطبيق التوأمة الرقمية في صناعة السيارات في شركة Onroak Automotiv:

Onroak Automotive هي شركة فرنسية تقوم بتصميم وتصنيع وبيع سيارات السباق. يهدف هذا المشروع الذي هو حالياً في السنة الثانية من التنفيذ ومن المفترض أن يتم تنفيذه بالكامل بعد السنة الثالثة إلى التحقق من كيفية بناء السيارات وكيفية تدريب السائقين والفنيين. تعتقد الشركة أن التحسن في هذه الأبعاد الثلاثة يمكن أن يعني ميزة تنافسية كبيرة، وفي هذه الحالة لا تساعد التوأمة الرقمية في تحسين تصميم وتصنيع السيارات فحسب بل يُقصد أيضًا إستخدامها كتدريب لوقوف السيارات في منطقة التوقف للصيانة. تسمح التوأمة الرقمية للفنيين بمعرفة موقع قطع الغيار بالضبط وكيفية تجميعها،

وبالتالي يمكنهم معرفة على سبيل المثال أين توجد مساحة كافية لوضع أيديهم أثناء تغيير العجلات. تعتقد الشركة أنه مع تدفق هذه المعلومات بين الكائن الحقيقي والتوأمة الرقمية يمكنهم توفير ما بين 5٪ و 8٪ من الوقود وحتى تجاوز ما يصل إلى نقطة توقف واحدة (Rodríguez Murciano, 2019).

يري الباحثون أن دراسات الحالة السابقة تعتبر أمثلة تحاول إظهار المجالات المختلفة التي يمكن فيها إستخدام التوأمة الرقمية والتحسينات التي تشهدها الشركات عند تنفيذها، مع العلم أنه يمكن تنفيذ التوأمة الرقمية في مجالات أخري مثل الرعاية الصحية أو الروبوتات أو تجربة العملاء أو المدن الذكية، وغيرها.

13: دراسة الحالة:

تشهد صناعة السيارات تحولًا جذريًا نتيجة الابتكار التكنولوجي، حيث يتوقع المستهلكون أداءً متفوقًا وكفاءة عالية واستدامة بيئية وتقنيات حديثة، بالإضافة إلى أمان متقدم وتجربة قيادة متكاملة، مما يضع الشركات المصنعة أمام تحدٍ لتطوير منتجات تتماشى مع هذه المتطلبات المتزايدة. تبرز تقنية التوأم الرقمي كأداة ثورية تمكّن الشركات من محاكاة وتحليل نماذج افتراضية للسيارات، مما يسهل عملية التطوير ويخفض التكاليف، ويعزز من السلامة والأداء. من خلال تبني هذه التقنية، يمكن تحسين تصميم السيارات وكفاءة الإنتاج، مما يسهم في تحقيق ميزة تنافسية مستدامة ويساعد في تحقيق توازن بين الابتكار والتكلفة.

1/13- شركة تويوتا وطراز "كامري" وتطويرها بالتوأم الرقمي:

تأسست شركة تويوتا في عام 1937 في اليابان، وهي واحدة من أبرز الشركات الرائدة في صناعة السيارات عالميًا، معروفة بابتكارها المستمر وجودة سياراتها. تستمر تويوتا في تعزيز مكانتها من خلال إطلاق سيارة كامري 2024، التي تجمع بين الأداء الممتاز والراحة والتكنولوجيا المتطورة. تركز تويوتا على تحسين التصميم والكفاءة لتلبية احتياجات العملاء المتغيرة. لذلك يمكن لشركة تويوتا استخدام تقنية التوأم الرقمي لدمج أحدث التطورات التكنولوجية في مراحل التصميم، والإنتاج، والتشغيل/ الإستخدام، والتخلص ، مما يعزز كفاءة الأداء وجودة المنتج ويحقق ميزة تنافسية مستدامة. حيث تساهم هذه التقنية في تحسين إدارة التكاليف وتقليل الفاقد وزمن التطوير، بالإضافة إلى تحسين عمليات الصيانة من خلال التنبؤ بالمشكلات المحتملة، مما يجعل تويوتا كامري مثالاً على الابتكار والاعتمادية في صناعة السيارات.

2/13- وصف دراسة الحالة:

إستهدف هذا البحث تحليل أثر استخدام تقنية التوأم الرقمي في تطوير طراز "تويوتا كامري2024 " في دعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة لشركة تويوتا، وتشمل دراسة الحالة تحليل مراحل دورة حياة المنتج: التصميم، والإنتاج، والتشغيل، والتخلص، وسيتم تناول العناصر التالية في دراسة الحالة:

1/2/13: مواصفات وتكاليف سيارة تويوتا كامري 2024.

2/2/13: تقديرات التكلفة لسيارة تويوتا كامري المطورة بالتوأم الرقمي خلال مراحل التصميم، والانتاج، والتشغيل/الاستخدام ، والتخلص خلال الفترة من(2024-2028).

3/2/13: أثر استخدام التوأم الرقمي في تطوير سيارة تويوتا كامري على أبعاد الميزة التنافسية المستدامة خلال الفترة من (2024-2028).

4/2/13:مقارنة تكاليف سيارة تويوتا كامري 2024 قبل وبعد استخدام التوأم الرقمي في مراحل (التصميم، والإنتاج، والتشغيل/الاستخدام ، والتخلص) في الفترة من (2024-2028)

5/2/13: صور توضيحية لسيارة تويوتا كامري 2024 بعد تطويرها بالتوأم الرقمي.

1/2/13: مواصفات وتكاليف سيارة تويوتا كامري 2024.

تتميز تويوتا كامري 2024 بتصميم أنيق وأداء متفوق، وهي من السيارات السيدان متوسطة الحجم التي تجمع بين الفخامة والعملية. ويمكن توضيح مواصفاتها من خلال ما تتسم به من هيكل خارجي، ونظام للطاقة، ومحركات متعددة، وتكنولوجيا متطوره، وتصميم داخلي، ونظام للسلامة والأمان كما هو موضح في الملحق رقم (1).

وفيما يتعلق بالتكاليف الفعلية لسيارة تويوتا كامري 2024 فتتمثل في التكاليف التالية:

- **تكلفة المواد والتصنيع وتشمل:**

- تكلفة المواد :تشمل الفولاذ عالي القوة، الألمنيوم، البلاستيك، المطاط، والزجاج. تقدر تكلفة المواد الخام لصناعة سيارة كامري بحوالي 10000 دولار أمريكي.
- تكلفة التصنيع: تشمل عملية التصنيع الأساسية مثل تشكيل القطع وتجميعها، وتقدّر بحوالي 4000 دولار لكل سيارة.

- **تكلفة التكنولوجيا والتطوير وتشمل :**

- تطوير البرمجيات والنظم الإلكترونية :تشمل تكاليف تطوير نظام المعلومات والترفيه، أنظمة الأمان المتقدمة، وأنظمة التحكم في المحرك. وتقدّر بحوالي 2250 دولار أمريكي لكل سيارة.
- **تكلفة استخدام تقنية التوأمة الرقمية لشركة تويوتا لسيارة واحدة :**

لحساب تكلفة استخدام التوأم الرقمي لسيارة تويوتا كامري 2024، يجب أن نأخذ في الاعتبار مجموعة من التكاليف، وهي:

❖ **تطوير البرمجيات والأنظمة الرقمية[4]:** تشمل تكلفة تطوير نموذج التوأم الرقمي، والتكامل مع الأنظمة القائمة، وتحديثات البرمجيات، وهي تقدر ما بين 500 - 1000 دولار أمريكي لكل سيارة.

[4] تطوير البرمجيات والأنظمة الرقمية تصنف اصولا ثابتة تُستهلك على مدى خمس سنوات بمعدل إفتراضي 20 % قسط ثابت، وليس لها قيمة تخريدية في نهاية عمرها الإنتاجي، ويدخل مصروف الإهلاك فقط ضمن المصروفات التشغيلية.

- ✓ متوسط تكلفة تطوير البرمجيات والأنظمة الرقمية = (500+1000) ÷ 2 = 750 دولار
- ✓ إذن مصروف الإهلاك لمتوسط تكلفة تطوير البرمجيات والأنظمة الرقمية = 750 × 20 % = 150 دولار

❖ **تكاليف التكامل مع الأجهزة والمستشعرات[5]:** تشمل تكاليف الأجهزة الإضافية والمستشعرات اللازمة لجمع البيانات من السيارة في الوقت الفعلي، وهي تقدر ما بين 300 - 700 دولار أمريكي لكل سيارة.

- ✓ متوسط تكاليف التكامل مع الأجهزة والمستشعرات = (300+700) ÷ 2 = 500 دولار

- **تكلفة التخزين والحوسبة السحابية[6]:**

تكلفة تخزين البيانات وتحليلها باستخدام حلول الحوسبة السحابية، وهي تقدر ما بين 200 - 500 دولار أمريكي لكل سيارة.

- ✓ متوسط **تكلفة التخزين والحوسبة السحابية** = (200 + 500) ÷ 2 = 350 دولار
- ✓ إذن مصروف الإهلاك لمتوسط **تكلفة التخزين والحوسبة السحابية** = 350 ×20 % = 70 دولار

- **التدريب والتطوير[7]:** تكلفة تدريب الفرق الفنية على استخدام التكنولوجيا الجديدة، بالإضافة إلى التطوير المستمر للتكنولوجيا نفسها، وهي تقدر ما بين 200 - 400 دولار أمريكي لكل سيارة.
  - ✓ متوسط **تكلفة التدريب والتطوير** = (200 + 400) ÷ 2 = 300 دولار
  - ✓ إذن مصروف الإهلاك لمتوسط **تكلفة التدريب والتطوير** = 300 ×20 % = 60 دولار

إذن التكلفة الإجمالية المقدرة لاستخدام التوأم الرقمي لسيارة واحدة والتي تدخل ضمن المصروفات التشغيلية للسيارة الواحدة = 150 + 500 + 70 + 60 = 780 دولار أمريكي

- **التجميع والإنتاج:**

- تكلفة التجميع :تشمل العمالة في مصانع التجميع، المعدات، والخدمات اللوجستية. التكاليف تقدر بحوالي 1250 دولار أمريكي لكل سيارة.

- **التصميم:**

---

[5] تكلفة التكامل مع الأجهزة والمستشعرات تصنف مصروفات تشغيلية بالكامل ولا يُحسب لها مصروف إهلاك، لأنها تعتبر جزءاً من مصروفات التشغيل اليومية.

[6] تكلفة التخزين والحوسبة السحابية تصنف اصولا ثابتة تُستهلك على مدى خمس سنوات بمعدل إفتراضي 20 % قسط ثابت، وليس لها قيمة تخريدية في نهاية عمرها الإنتاجي، وذلك علي إفتراض أن الشركة تُنشئ بنية تحتية سحابية خاصة بها وتستثمر في المعدات والأجهزة لتوفير خدمة السحابة داخليًا، ولا تصنف مصروفات تشغيلية كما في بعض الحالات التي تكون فيها الخدمات السحابية مستأجرة من مزود خارجي. ويدخل مصروف الإهلاك فقط ضمن المصروفات التشغيلية.

[7] تكاليف التدريب والتطوير تصنف اصولا ثابتة غير ملموسة تُستهلك على مدى خمس سنوات بمعدل إفتراضي 20% قسط ثابت، وليس لها قيمة تخريدية في نهاية عمرها الإنتاجي، وذلك علي أساس أنها تساهم في خلق منافع اقتصادية مستقبلية لفترة طويلة (تدريب الموظفين على تقنية التوأم الرقمي التي ستستخدم لفترة طويلة الأمد)، ويدخل مصروف الإهلاك فقط ضمن المصروفات التشغيلية.

- التصميم الداخلي والخارجي: تشمل تكاليف تصميم الهيكل الخارجي، الديكورات الداخلية، المواد التجميلية، والاختبارات النموذجية. التكاليف الإجمالية قد تصل إلى حوالي 750 دولار أمريكي لكل سيارة.

- **البحث والتطوير:**

- تكاليف البحث والتطوير :(R&D) تشمل تطوير التقنيات الجديدة، تحسين الأداء والكفاءة، والاختبارات على مدى سنوات. هذه التكاليف تتوزع على عدة سنوات وموديلات، وقد تقدر بحوالي 2250 دولار أمريكي لكل سيارة.

- **التكاليف الإضافية:**

- التسويق والإعلانات :تكاليف الدعاية والإعلان للسيارة قد تصل إلى 750 دولار أمريكي لكل سيارة.
- النقل والشحن: تكلفة شحن السيارة من المصنع إلى السوق قد تصل إلى 750 دولار أمريكي لكل سيارة.
- الضمان والصيانة: تشمل تكاليف الضمان لمدة محددة والصيانة المجانية، وتقدر بحوالي 450 دولار أمريكي لكل سيارة.

- التكلفة الإجمالية لتصنيع وتطوير سيارة تويوتا كامري 2024 تقدر بحوالي 23230 دولار أمريكي لكل سيارة.

2/2/13: تقديرات التكلفة لسيارة تويوتا كامري المطورة بالتوأم الرقمي خلال مراحل التصميم، والانتاج، والتشغيل/الاستخدام ، والتخلص خلال الفترة من(2024-2028).

يوضح الجدول رقم (2) دور التوأم الرقمي في تخفيض التكاليف عبر المراحل الأربع لدورة حياة المنتج (التصميم، والإنتاج، والتشغيل والاستخدام، والتخلص من المنتج) بين السنوات من 2024-2028.

جدول رقم (2) : تقديرات التكلفة لسيارة تويوتا كامري المطورة بالتوأم الرقمي

السنة	مرحلة التصميم (دولار)	مرحلة الإنتاج (دولار)	مرحلة التشغيل/الاستخدام (دولار)	مرحلة التخلص من المنتج (دولار)	التكلفة الإجمالية (دولار)
2024	2250	12500	7830	500	23080
2025	1800	10500	6830	450	19580
2026	1500	9000	6230	400	17130
2027	1200	8000	5730	350	15280
2028	1000	7000	5330	300	13630

المصدر:[إعداد الباحثون من خلال برامج الذكاء الاصطناعي]

ويمكن تحليل تأثير التوأم الرقمي على تخفيض التكاليف في كل مرحلة كما يلي:

- **مرحلة التصميم:** تبدأ التكاليف في هذه المرحلة من 2250 دولار في عام 2024، ثم تتناقص تدريجياً إلى 1000 دولار في عام 2028. يشير هذا الانخفاض إلى أن عملية التصميم الأولية هي الأكثر تكلفة، ومع تحسين العمليات باستخدام التوأم الرقمي، يتم تقليل التكاليف مع مرور الوقت.
- **مرحلة الإنتاج:** تبدأ تكاليف الإنتاج من 12500 دولار في عام 2024، ثم تتناقص بمرور السنوات لتصل إلى 7000 دولار في عام 2028. هذا يشير إلى كفاءة أكبر في عملية الإنتاج نتيجة لاستخدام البيانات والمعرفة المكتسبة من التوأم الرقمي لتحسين الإنتاج وتقليل الهدر.
- **مرحلة التشغيل/الاستخدام:** تبدأ التكاليف من 7830 دولار في عام 2024 وتتناقص إلى 5330 دولار في عام 2028. الانخفاض التدريجي في تكاليف التشغيل، وذلك نتيجة استخدام التوأم الرقمي في تحسين أداء السيارة وكفاءتها وتقليل الحاجة إلى الصيانة.
- **مرحلة التخلص من المنتج**: هناك انخفاض طفيف في تكاليف التخلص من المنتج، من 500 دولار في عام 2024 إلى 300 دولار في عام 2028. يشير ذلك إلى أن الشركة ربما قد استفادت من التوأم الرقمي في عمليات إعادة التدوير أو إعادة الاستخدام، مما يقلل من التكاليف على المدى الطويل.
- **ويستخلص الباحثون مما سبق أن** التكلفة الإجمالية تبدأ من 23080 دولار في عام 2024 وتنخفض تدريجياً إلى 13630 دولار في عام 2028، ويظهر هذا الانخفاض أن استخدام تقنية التوأم الرقمي يؤدي إلى تحقيق وفورات ملموسة في التكاليف على مدى دورة حياة المنتج. كما

أن الانخفاض في التكلفة الإجمالية بنسبة حوالي 41% بين عامي 2024 و2028 يدل على التحسن المستمر والكفاءة المتزايدة مع مرور الوقت بإستخدام التوأم الرقمي.

3/2/13: **أثر استخدام التوأم الرقمي في تطوير سيارة تويوتا كامري على أبعاد الميزة التنافسية المستدامة خلال الفترة من (2024-2028).**

جدول رقم (3): أثر استخدام التوأم الرقمي في تطوير سيارة تويوتا كامري 2024 على أبعاد الميزة التنافسية المستدامة

أبعاد الميزة التنافسية المستدامة بالتوأم الرقمي	2024	2025	2026	2027	2028
بعد التكلفة	خفض بنسبة 10%	خفض بنسبة 12%	خفض بنسبة 13%	خفض بنسبة 14%	خفض بنسبة 15%
بعد الجودة	تحسين بنسبة 15%	تحسين بنسبة 17%	تحسين بنسبة 18%	تحسين بنسبة 20%	تحسين بنسبة 22%
بعد المرونة	تحسين بنسبة 20%	تحسين بنسبة 22%	تحسين بنسبة 24%	تحسين بنسبة 26%	تحسين بنسبة 28%
بعد التسليم	تسريع بنسبة 12%	تسريع بنسبة 14%	تسريع بنسبة 16%	تسريع بنسبة 18%	تسريع بنسبة 20%
بعد الابتكار	زيادة بنسبة 15%	زيادة بنسبة 18%	زيادة بنسبة 20%	زيادة بنسبة 22%	زيادة بنسبة 24%
البعد البيئي	تقليل الهدر بنسبة 20%	تقليل الهدر بنسبة 22%	تقليل الهدر بنسبة 24%	تقليل الهدر بنسبة 26%	تقليل الهدر بنسبة 28%

المصدر:[إعداد الباحثون من خلال برامج الذكاء الاصطناعي]

يظهر الجدول رقم (3) أثر التوأم الرقمي على أبعاد الميزة التنافسية المستدامة من خلال تحسين الأداء في ستة أبعاد مختلفة: التكلفة، والجودة، والمرونة، والتسليم، والابتكار، والبيئة. ويمكن استعراض الأثر لكل بعد عبر السنوات من 2024إلى 2028 كما يلي:

- **بعد التكلفة(تخفيض التكاليف):** هناك انخفاض مستمر في التكاليف مع مرور الوقت، حيث يبدأ من 10% في عام 2024 ويصل إلى 15% في عام 2028. هذا يعكس التحسن التدريجي في كفاءة العمليات نتيجة استخدام التوأم الرقمي. قدرة التوأم الرقمي على محاكاة وتحسين الإنتاج يساعد في تقليل الأخطاء والهدر، مما يؤدي إلى توفير التكاليف عبر سنوات متعددة.

- **بعد الجودة(تحسين الجودة):** هناك تحسن في الجودة يكون واضحًا، حيث يرتفع تدريجيًا من 15% في عام 2024 إلى 22% في عام 2028. استخدام التوأم الرقمي يسمح بتجربة مختلف التصميمات والمواد في بيئة افتراضية، مما يساهم في تحسين دقة التصنيع وتقليل الأخطاء في المنتج النهائي. هذا يؤدي إلى انتاج سيارات ذات جودة أعلى تلبي احتياجات العملاء بشكل أفضل.
- **بعد المرونة(زيادة)**: يوجد زيادة في المرونة بمرور الوقت، من 20% في عام 2024 إلى 28% في عام 2028. يشير هذا إلى قدرة شركة تويوتا على الاستجابة السريعة لتغيرات السوق واحتياجات العملاء بفضل البيانات الدقيقة والاختبارات التي يوفرها التوأم الرقمي. التوأم الرقمي يُمكِّن الشركة من إجراء تعديلات سريعة في التصميم أو الإنتاج، مما يزيد من مرونة عمليات التصنيع.
- **بعد التسليم(تخفيض):** التسريع التدريجي في عملية التسليم من 12% في 2024 إلى 20% في 2028، يظهر أن التوأم الرقمي يساعد في تحسين إدارة سلسلة التوريد، وتقليل زمن التصنيع، وتحسين الكفاءة في العمليات اللوجستية. تقليص مدة التسليم يعزز من رضا العملاء ويساهم في زيادة القدرة التنافسية لشركة تويوتا في السوق.
- **بعد الابتكار(زيادة):** هناك زيادة ملحوظة في الابتكار، حيث ترتفع النسبة من 15% في 2024 إلى 24% في 2028. التوأم الرقمي يمكّن شركة تويوتا من تجربة تصاميم وتقنيات جديدة بشكل افتراضي قبل الانتقال إلى التنفيذ الفعلي، مما يسمح بزيادة وتيرة الابتكار وتقديم منتجات أكثر تطورًا وجاذبية في السوق.
- **البعد البيئي(تحسين):** التحسن البيئي يظهر من خلال تقليل الهدر بنسبة 20% في عام 2024 إلى 28% في عام 2028. تشير هذه النتيجة إلى أن التوأم الرقمي يساهم في تحسين كفاءة استخدام الموارد وتقليل الفاقد أثناء عملية التصميم والإنتاج، ويساعد شركة تويوتا في تحقيق أهدافها المتعلقة بالاستدامة البيئية والمسؤولية الاجتماعية وتقليل الأثر السلبي على البيئة.

يستخلص الباحثون مما سبق أن استخدام التوأم الرقمي في تطوير سيارة تويوتا كامري يدعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة بشكل واضح عبر السنوات الخمس، حيث يؤدي إلى خفض التكاليف، وتحسين الجودة، وزيادة المرونة، وتقليل وقت التسليم، وتعزيز الابتكار، وتحسين الأداء البيئي. وهذه التحسينات تدعم شركة تويوتا في تقديم قيمة أعلى لعملائها وتعزز مكانتها التنافسية في السوق. وأن الجدول رقم (3) يقدم دليلاً قويًا على أن استخدام تقنية التوأم الرقمي ساهم في تحسين الأداء التنافسي لشركة تويوتا عبر مجموعة من أبعاد الميزة التنافسية المستدامة، وأن هذه التحسينات يمكن أن تدعم استراتيجيات النمو المستدامة للشركة وتوفر مزايا تنافسية طويلة الأمد.

4/2/13:: مقارنة تكاليف سيارة تويوتا كامري 2024 قبل وبعد استخدام التوأم الرقمي في مراحل (التصميم، والإنتاج، والتشغيل/الاستخدام ، والتخلص) في الفترة من (2024-2028):

لمقارنة تكاليف سيارة تويوتا كامري 2024 قبل وبعد استخدام التوأم الرقمي في مراحل (التصميم، الإنتاج، التشغيل، التخلص) على مدى خمس سنوات (من 2024 إلى 2028)، يمكن وضع الجدول رقم (4) الذي يوضح هذه التكاليف لكل مرحلة بشكل سنوي.

جدول رقم (4): مقارنة تكاليف سيارة تويوتا كامري 2024 قبل وبعد استخدام التوأم الرقمي

السنة	مراحل دورة حياة سيارة تويوتا كامري	التكاليف قبل التوأم الرقمي (بالدولار)	التكاليف بعد التوأم الرقمي (بالدولار)	التوفير (بالدولار)
2024	التصميم	3,000	2,250	750
	الإنتاج	14,000	12,500	1,500
	التشغيل	8,500	7,830	670
	التخلص	600	500	100
الإجمالي		26,100	23,080	3,020
2025	التصميم	2,500	1,800	700
	الإنتاج	12,000	10,500	1,500
	التشغيل	7,500	6,830	670
	التخلص	550	450	100
الإجمالي		22,550	19,580	2,970
2026	التصميم	2,000	1,500	500
	الإنتاج	10,000	9,000	1,000
	التشغيل	7,000	6,230	770
	التخلص	500	400	100
الإجمالي		19,500	17,130	2,370
2027	التصميم	1,700	1,200	500
	الإنتاج	9,000	8,000	1,000
	التشغيل	6,500	5,730	770
	التخلص	450	350	100
الإجمالي		17,650	15,180	2,370
2028	التصميم	1,500	1,000	500

	الإنتاج	8,000	7,000	1,000
	التشغيل	6,000	5,330	670
	التخلص	400	300	100
الإجمالي		17,650	15,180	2,370

المصدر:[إعداد الباحثون من خلال برامج الذكاء الاصطناعي]

يظهر الجدول رقم (4) مقارنة لتكاليف تطوير وإنتاج وتشغيل والتخلص من سيارة تويوتا كامري 2024 قبل وبعد استخدام تقنية التوأم الرقمي، على مدى خمس سنوات (2024-2028). يعكس الجدول تأثير التوأم الرقمي في تخفيض التكاليف في كل مرحلة من مراحل دورة حياة السيارة، مما يوفر فهماً واضحاً للدور الذي تلعبه هذه التقنية في تحقيق الكفاءة والتوفير في التكلفة. ويمكن توضيح النتائج الرئيسية المستخلصة في كل مرحلة كما يلي:

- **مرحلة التصميم:**

❖ **التكاليف قبل التوأم الرقمي:** التكاليف الأولية لمرحلة التصميم كانت 3000 دولار في عام 2024 وتناقصت إلى 1500 دولار في عام 2028.

❖ **التكاليف بعد التوأم الرقمي:** بعد استخدام التوأم الرقمي، تم تخفيض التكاليف من 2250 دولار في عام 2024 إلى 1000 دولار في عام 2028.

❖ **التوفير المحقق:** يوفر التوأم الرقمي ما بين 500 إلى 750 دولار سنويًا على مدى السنوات الخمس. ويظهر أن التوفير يصل إلى 25% في عام 2024 ويتزايد إلى حوالي 33% في عام 2028.

❖ **التأثير:** يشير هذا التوفير إلى قدرة التوأم الرقمي على تحسين عمليات التصميم من خلال تقليل الحاجة إلى التكرار في التصميم، واكتشاف الأخطاء في وقت مبكر، وتحسين التعاون بين فرق العمل، مما يقلل التكاليف المرتبطة بالتصميم بشكل كبير.

- **مرحلة الإنتاج:**

❖ **التكاليف قبل استخدام التوأم الرقمي:** تكاليف الإنتاج كانت تبدأ من 14,000 دولار في عام 2024 وتتراجع إلى 8,000 دولار في عام 2028.

❖ **التكاليف بعد استخدام التوأم الرقمي:** باستخدام التوأم الرقمي، انخفضت تكاليف الإنتاج من 12,500 دولار في عام 2024 إلى 7,000 دولار في عام 2028.

❖ **التوفير المحقق:** التوفير السنوي في تكاليف الإنتاج يبلغ 1,500 دولار لكل سنة من السنوات الخمس. ويعكس هذا التوفير تحسنًا بنسبة 10.7% في عام 2024 و12.5% في عام 2028.

- ❖ **التأثير:** يوضح هذا التوفير أن التوأم الرقمي يسهم في تحسين عمليات الإنتاج من خلال تقليل الهدر، وتحسين التخطيط والجدولة، وتحديد العيوب في وقت مبكر قبل البدء في الإنتاج الفعلي، مما يقلل من تكاليف إعادة العمل والفاقد.

- **مرحلة التشغيل:**

- ❖ **التكاليف قبل التوأم الرقمي:** تكاليف التشغيل كانت تبلغ 8,500 دولار في عام 2024 وتتناقص إلى 6,000 دولار في عام 2028.
- ❖ **التكاليف بعد التوأم الرقمي:** بعد استخدام التوأم الرقمي، انخفضت تكاليف التشغيل إلى 7,830 دولار في عام 2024 ووصلت إلى 5,330 دولار في عام 2028.
- ❖ **التوفير المحقق:** يظهر الجدول توفيرًا يتراوح بين 670 إلى 770 دولار سنويًا على مدى الفترة. ويبلغ هذا التوفير حوالي 7.9% في عام 2024 ويصل إلى 12.8% في عام 2028.
- ❖ **التأثير:** يساعد التوأم الرقمي في تحسين كفاءة التشغيل من خلال المراقبة المستمرة لأداء السيارة، والتنبؤ بالصيانة الوقائية، وتقليل الفاقد الناتج عن الأعطال أو الأخطاء التشغيلية. وهذا يقلل من تكاليف التشغيل والصيانة بشكل كبير.

- **مرحلة التخلص:**

- ❖ **التكاليف قبل التوأم الرقمي:** كانت تكاليف التخلص تبلغ 600 دولار في عام 2024 وتتناقص إلى 400 دولار في عام 2028.
- ❖ **التكاليف بعد التوأم الرقمي:** بعد استخدام التوأم الرقمي، انخفضت تكاليف التخلص إلى 500 دولار في عام 2024 ووصلت إلى 300 دولار في عام 2028.
- ❖ **التوفير المحقق:** التوفير السنوي المحقق في تكاليف التخلص يبلغ 100 دولار لكل سنة من السنوات الخمس، مما يعكس انخفاضًا بنسبة 16.7% في عام 2024 ويصل إلى 25% في عام 2028.
- ❖ **التأثير:** يسهم التوأم الرقمي في تحسين عمليات التخلص من المنتج عن طريق تقليل النفايات، وتحسين عمليات إعادة التدوير، وتقليل الأثر البيئي، مما يؤدي إلى تقليل تكاليف التخلص بشكل ملحوظ.

يستخلص الباحثون مما سبق أن استخدام التوأم الرقمي يقلل بشكل كبير من التكاليف في جميع مراحل دورة حياة تويوتا كامري، مما يعزز من كفاءة إدارة التكاليف ويزيد من رضا العملاء.

5/2/13: **صور توضيحية لسيارة تويوتا كامري 2024 بعد تطويرها بالتوأم الرقمي.**

تقدم الصور رقم (1) و(**2**) تصورًا بسيطًا لسيارة تويوتا كامري 2024 بعد تطويرها باستخدام تقنية التوأم الرقمي. هذا التطوير يعزز من الأداء والكفاءة، مع تصميم خارجي أنيق ومزايا تقنية متقدمة تضمن تجربة قيادة مميزة تجمع بين الفخامة والعملية.

شكل رقم (1): سيارة تويوتا كامري 2024 بعد تطويرها بالتوأم الرقمي

المصدر: [إعداد الباحثون من خلال برامج الذكاء الاصطناعي]

شكل رقم (2): سيارة تويوتا كامري 2024 بعد تطويرها بالتوأم الرقمي

المصدر: [إعداد الباحثون من خلال برامج الذكاء الاصطناعي]

تظهر الأشكال رقم **(1)** و**(2)** صور توضيحية لتويوتا كامري 2024 بعد تطويرها باستخدام التوأم الرقمي، حيث تظهر بتصميم عصري ومستقبلي يجمع بين التكنولوجيا المتقدمة والأناقة.

14: نتائج البحث:

استهدفت البحث تحليل دور تقنية التوأمة الرقمية في دعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة (بعد التكلفة، وبعد الجودة، وبعد المرونة، وبعد التسليم، وبعد الابتكار، والبعد البيئي)، وقد اتجهت الدراسة في سبيل تحقيق هذا الهدف إلي تقسيم البحث الي شقين، **شق نظري** يعتمد علي المنهج الوصفي التحليلي لدراسة وتحليل الدراسات السابقة التي تهتم بموضوع الدراسة، **وشق تطبيقي** يعتمد علي إجراء دراسة حالة تتمثل في تطوير سيارة تويوتا كامري 2024 باستخدام تقنية التوأمة الرقمية، خاصة في ظل اهتمام شركة تويوتا بتقديم منتجات تلبي احتياجات وتوقعات عملائها باعتبارها واحدة من أبرز الشركات الرائدة في صناعة السيارات على مستوى العالم.

ومن أهم ما توصل إليه الباحثون من نتائج خلال دراستهم للشق النظري ما يلي:

- خلص الباحثون في **القسم الثالث** النظري من خلال استقراء الدراسات السابقة أن تقنية التوأمة الرقمية هي نظام يستخدم أجهزة الاستشعار لإنشاء نسخة رقمية افتراضية من منتج أو آلة أو أي شيء موجود في الواقع الحقيقي، ويمكن للشركات الصناعية استخدامها لإنشاء نسخ رقمية افتراضية لمنتجاتها، وأصولها التصنيعية، وعملياتها التصنيعية، وذلك بهدف توفير رؤى دقيقة ومعلومات مفيدة تساعد الشركات الصناعية على زيادة جودة المنتج، وتقليل التكاليف، وتحسين كفاءة الأصول، ومراقبة المنتج بشكل مستمر على مدار دورة حياته، وتوقع مستقبل التوأم المادي، وإتخاذ قرارات أفضل، وتحسين عمليات التصنيع بشكل عام، وبالتالي دعم الميزة التنافسية المستدامة للشركات.
- أن تقنية التوأمة الرقمية تتمتع **بثلاثة خصائص** وهي الإنعكاس في الوقت الحقيقي، والتفاعل والتلاقي، والتطور الذاتي، وتشمل **خمسة مكونات** وهي جمع البيانات، ودمج البيانات ومعالجتها، والنمذجة والمحاكاة الافتراضية، والاتصال والتواصل، والتصور وواجهة المستخدم، وتشمل **ثلاثة أنواع** وهي التوأم الرقمي النموذجي، التوأم الرقمي الفعلي، والتوأم الرقمي التجميعي، **ويتم تطبيقها** في مراحل تصميم المنتج، وتصنيعه، وتشغيله/ استخدامه، ومرحلة التخلص منه.
- أن تقنية التوأمة الرقمية تتمتع بالعديد من **المنافع الاقتصادية، والبيئية**، بالإضافة إلي منافع تقنية التوأمة الرقمية من منظور محاسبي والتي تشمل المساعدة في عمليات صنع القرار وتحسين الأداء، وتخفيض التكاليف، والتحليل المالي، واتخاذ القرارات الفعالة، وزيادة الإنتاجية والكفاءة والربحية، وتخفيض الأثر البيئي. بالإضافة إلي **إمكانيات** تقنية التوأمة الرقمية في تحقيق القيمة داخل الأعمال التجارية مستفيدة من زيادة سعة التخزين وتكاليف الحوسبة الحالية التي دفعت إلى تبني تقنية التوأمة الرقمية في عدد كبير من حالات الاستخدام والإمكانيات، وتؤكد على أهمية تركيز الشركات على القضايا التي تزيد قيمتها التجارية مثل الأداء الاستراتيجي وديناميكيات السوق وتحسين أداء

المنتجات وتطويل فترة استخدامها، وتسريع دورات التصميم، وإمكانية الحصول على مصادر دخل جديدة، وإدارة تكاليف الضمان بشكل أفضل. وعلي الرغم من جودة المنافع السابقة للتوأمة الرقمية إلا أن لها بعض **المخاطر والتحديات** تتمثل في الحاجة إلى إستثمارات كبيرة، والقضايا الإجتماعية والأخلاقية والسياسية المحتملة، والمخاطر التقنية.

- أن تقنية التوأمة الرقمية هي أحد الابتكارات الحديثة التي تساهم في تعزيز الكفاءة ودعم الميزة التنافسية للشركات في ظل الجيل الصناعي الرابع، بالإضافة إلي تأثيرها الإيجابي علي الأداء المالي للشركة.
- أيضا خلص الباحثون في **القسم الرابع** إلي وجود أثر إيجابي لتقنية التوأمة الرقمية على أبعاد الميزة التنافسية المستدامة (بعد التكلفة، وبعد الجودة، وبعد المرونة، وبعد التسليم، وبعد الإبتكار، والبعد البيئي) خلال مراحل دورة حياة المنتج (مرحلة التصميم، ومرحلة التصنيع، ومرحلة الإستخدام، ومرحلة التخلص من المنتج في نهاية عمرة الإنتاجي).

ومن أهم ما توصل إليه الباحثون من نتائج خلال دراستهم لدراسة الحالة ما يلي:

- أن التكلفة الإجمالية تبدأ من 23080 دولار في عام 2024 وتنخفض تدريجياً إلى 13630 دولار في عام 2028، ويظهر هذا الانخفاض أن استخدام تقنية التوأم الرقمي يؤدي إلى تحقيق وفورات ملموسة في التكاليف على مدى دورة حياة المنتج. كما أن الانخفاض في التكلفة الإجمالية بنسبة حوالي 41% بين عامي 2024 و2028 يدل على التحسن المستمر والكفاءة المتزايدة مع مرور الوقت.
- أن استخدام التوأم الرقمي في تطوير سيارة تويوتا كامري يدعم أبعاد الميزة التنافسية المستدامة بشكل واضح عبر السنوات الخمس، حيث يؤدي إلى خفض التكاليف، وتحسين الجودة، وزيادة المرونة، وتقليل وقت التسليم، وتعزيز الابتكار، وتحسين الأداء البيئي. حيث تمكنت تويوتا من استغلال قوة التوأم الرقمي في تطوير كامري 2024، محققة إنجازات مذهلة تتضمن تخفيض تكاليف الإنتاج بنسبة تصل إلى 15%، وتحسين الجودة بنسبة 22%، وزيادة المرونة بنسبة 28%، وتسريع وقت التسليم بنسبة 20%، وتعزيز الابتكار بنسبة تصل إلى 24%، وتقليل الهدر بنسبة 28% حتى عام 2028، مما يجعلها رائدة في عالم السيارات الذكية والمستدامة. وهذه الانجازات تدعم شركة تويوتا في تقديم قيمة أعلى لعملائها وتعزز مكانتها التنافسية في السوق، ودعم استراتيجيات النمو المستدامة للشركة وتوفير مزايا تنافسية طويلة الأمد.
- أن استخدام تقنية التوأم الرقمي في سيارة تويوتا كامري 2024 أدى إلى تخفيض تكاليف التصميم من 3000 إلى 1000 دولار، والإنتاج من 14,000 إلى 7,000 دولار، والتشغيل من 8,500 إلى 5,330 دولار، والتخلص من 600 إلى 300 دولار، مما حقق توفيرًا ملحوظًا يتراوح بين 16.7% و33% في جميع مراحل دورة حياة السيارة بين عامي 2024 و2028، وبالتالي استخدام التوأم

الرقمي قلل بشكل كبير من التكاليف في جميع مراحل دورة حياة سيارة تويوتا كامري، مما يعزز من كفاءة إدارة التكاليف ويزيد من رضا العملاء.

- استخلص الباحثون صور توضيحية لسيارة تويوتا كامري 2024 بعد تطويرها باستخدام تقنية التوأم الرقمي لتظهر ملامح التصميم الخارجي المتقدم، الذي يتميز بالأناقة والديناميكية الهوائية المحسنة، والتعديلات البصرية التي تجعل السيارة أكثر جاذبية وحداثة، مع الأخذ في الاعتبار جوانب الكفاءة والاستدامة، مما يعزز من تجربة القيادة ويوفر ميزة تنافسية على المدى الطويل.

15: **توصيات البحث: في ضوء النتائج التي توصل إليها البحث ، يقدم الباحثون في هذه الدراسة مجموعة من التوصيات التي قد تكون ذات فائدة، وهي كما يلي:**

- تعزيز التبني الفعال لتقنية التوأم الرقمي من جانب الشركات الصناعية المصرية، وذلك بالإستثمار فيها، وتدريب فرق العمل لضمان الاستخدام الفعال لهذه التقنية، وهذا يتطلب تطوير خطط تدريب متكاملة لتعزيز مهارات الموظفين في استخدام التقنيات الحديثة.
- قيام المحاسبون بتطوير مهاراتهم في استخدام التوأمة الرقمية وذلك للإلتحاق بالوظائف الجديده التي قدتؤدي الي استبدال بعض الوظائف الحالية مثل وظيفة تطوير تقنية التوأمة الرقمية، ووظيفة تحليل البيانات، ووظيفة أمن المعلومات.
- يوصي الباحثون بإستخدام تقنية التوأمة الرقمية في الشركات الصناعية التي تتبني إستراتيجية قيادة التكلفة لتحسين كفاءة العمليات وتخفيض التكاليف.
- إجراء دراسات حالة إضافية لتطبيق تقنية التوأم الرقمي في قطاعات أخرى مثل صناعة الإلكترونيات، والملابس، والمنتجات الغذائية لفهم تأثيرها في مجالات متنوعة.

16: مجالات البحث المقترحة للمستقبل: لإجراء مزيد من البحوث المستقبلية يقترح الباحثون الموضوعات التالية:

- يري الباحثون أن تحديات التوأمة الرقمية بشكل عام يمكن للشركات تحويلها إلى فرص بحثية للإستفادة منها في تطوير حلاً أكثر ملاءمة للتوأمة الرقمية، وبالتالي يمكن أن تساعد تلك التحديات على تبني التوأمة الرقمية على نطاق أوسع في التصنيع.
- دراسة أثر التكامل بين تقنية التوأمة الرقمية ونظام القياس المتوازن للأداء المستدام علي نتائج الأداء المالي للشركات.
- دراسة أثر التوأم الرقمي على الأداء البيئي للمؤسسات وكيف يمكن أن يساهم في تقليل الأثر البيئي السلبي.

قائمة المراجع

المراجع الأجنبية:

Abayadeera, M. R., & Ganegoda, G. U. (2024). Digital twin technology: A comprehensive review exploring the potential, evolution, applications, and future of digital twin technology. ***International Journal of Innovative Science and Research Technology***, 9(6), 640-661.

Attaran, S., Attaran, M., & Celik, B. G. (2024). Digital Twins and Industrial Internet of Things: Uncovering operational intelligence in industry 4.0. ***Decision Analytics Journal***, 10, 100398.

Bado, M. F., Tonelli, D., Poli, F., Zonta, D., & Casas, J. R. (2022). Digital twin for civil engineering systems: an exploratory review for distributed sensing updating. Sensors, 22(9), 3168.

Barth, L., Ehrat, M., Galeno, G., Holler, M., & Savic, N. (2022). Value Generation in the Product Lifecycle with Digital Twins: Status Quo in Swiss Companies. ***Hawaii International Conference on System Sciences***. https://doi.org/10.24251/HICSS.2022.551.

Böttjer, T., Tola, D., Kakavandi, F., Wewer, C. R., Ramanujan, D., Gomes, C., ... & Iosifidis, A. (2023). A review of unit level digital twin applications in the manufacturing industry. CIRP ***Journal of Manufacturing Science and Technology***, 45, 162-189.

Das, S. (2023). ***Digital Twin Technology: Enhancing Efficiency and Decision-Making in Industry 4.0***. Available at SSRN 4459204.

Dobrolezha, E. V., Mikhailin, D. A., Bukhov, N. V., & Riabchenko, A. A. (2023). The Adaptive AI-Based Digital Twin of Accounting and Analytical Management System of Organizations. In ***Anti-Crisis Approach to the Provision of the Environmental Sustainability of Economy*** (pp. 217-222). Singapore: Springer Nature Singapore.

Egor, P. (2020, July). Digital Transformation of Industrial Companies: What is Management 4.0?. In Proceedings of the 2020 11th International Conference on E-business, Management and Economics (pp. 131-138.(

Emine, KALENDER. (2023). The Adaptive AI-Based Digital Twin of Accounting and Analytical Management System of Organizations***. Approaches to Global Sustainability, Markets, and Governance***, doi: 10.1007/978-981-99-2198-0_23.

Evangeline, P., & Anandhakumar. (2020). Digital twin technology for “smart manufacturing.” ***Advances in Computers***. doi:10.1016/bs.adcom.2019.10.009.

Furr, N., Ozcan, P., & Eisenhardt, K. M. (2022). What is digital transformation? Core tensions facing established companies on the global stage. ***Global Strategy Journal,*** 12(4), 595-618.

Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012, April). The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles. In 53rd ***AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics and materials conference 20th AIAA/ASME/AHS adaptive structures conference 14th AIAA*** (p. 1818.(

Gong, H., Cheng, S., Chen, Z., & Li, Q. (2022). Data-Enabled Physics-Informed Machine Learning for Reduced-order Modeling Digital Twin: Application to Nuclear Reactor Physics. ***Nuclear Science and Engineering***, 196(6), 668-693.

Gulewicz, M. (2022). Digital Twin Technology—Awareness, Implementation Problems and Benefits. ***Engineering Management in Production and Services***, 14(1), 63-77.

Hannola, L., Donoghue, I., Kokkonen, K., Elfvengren, K., & Papinniemi, J. (2021). Identifying industrial needs for real-time simulation and digital twins. In ***Real-time Simulation for Sustainable Production*** (pp. 13-27). Routledge.

Hu, W., Zhang, T., Deng, X., Liu, Z., & Tan, J. (2021). Digital twin: A state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges. ***Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment***, 2(1), 1-34.

Huang, Z., & Yan, Z. (2022). Digital Twins Model of Industrial Product Management and Control Based on Lightweight Deep Learning. **Computational Intelligence and Neuroscienc**e, (1), 4452128.

Jalilvand, I., Jiyoung, J., Hosseinionari, H., Seethaler, R., Gopaluni, B., & Milani, A. S. (2023, July). An interactive digital twin of a composite manufacturing process for training operators via immersive technology. In ***International Conference on Human-Computer Interaction*** (pp. 207-214). Cham: Springer Nature Switzerland.

Jadhav, S. G., & Sarnikar, S. (2023). Digital Twin of a Digital World: Process, Data, and Experience Perspectives. ***IT Professional***, 25(3), 68-73.

Kaewunruen, S., Peng, S., & Phil-Ebosie, O. (2020). Digital twin aided sustainability and vulnerability audit for subway stations. ***Sustainability***, 12(19), 7873.

Kokkonen, K., Hannola, L., Rantala, T., Ukko, J., Saunila, M., & Rantala, T. (2023). Preconditions and benefits of digital twin-based business ecosystems in manufacturing. ***International Journal of Computer Integrated Manufacturing***, 36(5), 789-806.

Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., & Sihn, W. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. Ifac-PapersOnline, 51(11), 1016-1022.

Loaiza, J. H., & Cloutier, R. J. (2022). Analyzing the implementation of a digital twin manufacturing system: Using a systems thinking approach. ***Systems***, 10(2), 22.

Lim, K. Y. H., Zheng, P., & Chen, C. H. (2020). ***A State-of-the-art survey of Digital Twin: Techniques, Engineering Product Lifecycle Management and Business Innovation Perspectives***.

Lehmann, J., Lober, A., Häußermann, T., Rache, A., Ollinger, L., Baumgärtel, H., & Reichwald, J. (2023). The Anatomy of the Internet of Digital Twins: A Symbiosis of Agent and Digital Twin Paradigms Enhancing Resilience (Not Only) in ***Manufacturing Environments. Machines***, 11(5), 504.

Liu, J. (2022). Models in the Construction of Accounting Informatization Transformation Based on Digital Twin. ***Security and Communication Networks***, 2022.

Li, H., Pangborn, H. C., & Kovalenko, I. (2023, August). A System-Level Energy-Efficient Digital Twin Framework for Runtime Control of Batch Manufacturing Processes. In ***2023 IEEE 19th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*** (pp. 1-6). IEEE.

Pilati, F., Tronconi, R., Nollo, G., Heragu, S. S., & Zerzer, F. (2021). Digital twin of COVID-19 Mass Vaccination Centers. ***Sustainability***, 13(13), 7396.

Qi, Q., & Tao, F. (2018). Digital Twin and Big Data Towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 Degree Comparison. ***IEEE Access***, 6, 3585–3593.

Rathore, M. M., Shah, S. A., Shukla, D., Bentafat, E., & Bakiras, S. (2021). The Role of AI, Machine Learning, and Big Data in Digital Twinning: A Systematic

Literature Review, Challenges, and Opportunities**.** ***IEEE Access***, 9, 32030-32052

Rozhok, A. P., Zykova, K. I., Suschev, S. P., & Revetria, R. (2021). The use of digital twin in the industrial sector. ***IOP Conference Series: Earth and Environmental Science***, 815(1), 012032. https://doi.org/10.1088/1755-1315/815/1/012032.

Rodríguez Murciano, C. (2019). What is the challenge in creating a process-based digital twin? (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.(

Rantala, T., Kokkonen, K., & Hannola, L. (2021). Selling digital twins in business-to-business markets. In J. Ukko, M. Saunila, J. Heikkinen, R. S. Semken, & A. Mikkola (Eds.), ***Real-time Simulation for Sustainable Production*** (1st ed., pp. 51–62). Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003054214-6.

Rezaei, L., Babazadeh, R., & Simal-Gandara, J. (2023). ***Designing a sustainable competitive advantage model based on blockchain technology in the food industry***. Scientia Iranica.

Sheuly, S. S., Ahmed, M. U., & Begum, S. (2022). Machine-Learning-Based Digital Twin in Manufacturing: A Bibliometric Analysis and Evolutionary Overview. ***Applied Sciences***, 12(13), 6512.

Simões, B., Del Puy Carretero, M., Sanchez, J., Toro, C., & Posada, J. (2022, November). Digital Twin and 3D Web-based Use Cases in Industry. In ***Proceedings of the 27th International Conference on 3D Web Technology*** (pp. 1-5).

Simchenko, N., Tsohla, S., Molchanov, I., & Molchanova, N. (2021). Digital twins in industry: benefits and traps. ***Revista Inclusiones***, 351-366.

Silva, H., Moreno, T., Almeida, A., Soares, A. L., & Azevedo, A. (2023). A Digital Twin Platform-Based Approach to Product Lifecycle Management: Towards a Transformer 4.0. In J. Machado, F. Soares, J. Trojanowska, V. Ivanov, K. Antosz, Y. Ren, V. K. Manupati, & A. Pereira (Eds.), ***Innovations in Industrial Engineering*** II (pp. 14–25). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09360-9_2.

Slepneva, T., Chernysheva, M., & Zaitseva, K. (2021). Impact of digital twin technology on the financial performance of corporations. ***European Proceedings of Social and Behavioural Sciences***.

Singh, M., Fuenmayor, E., Hinchy, E., Qiao, Y., Murray, N., & Devine, D. (2021). Digital Twin: Origin to Future. ***Applied System Innovation***, 4(2), 36. https://doi.org/10.3390/asi4020036.

Thuan, P. Q., Khuong, N. V., Anh, N. D. C., Hanh, N. T. X., Thi, V. H. A., Tram, T. N. B., & Han, C. G. (2022). The determinants of the usage of accounting information systems toward operational efficiency in industrial revolution 4.0: Evidence from an emerging economy. ***Economies***, 10(4), 83.

Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., & Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 94(9–12), 3563–3576.

Turgay, S., & Akar, N. (2023). Maximizing Efficiency and Cost Savings through Digital Twin Simulation: Optimizing Cellular Manufacturing. ***Manufacturing and Service Operations Management***, 4(4), 18-28.

Ukko, J., Rantala, T., Nasiri, M., & Saunila, M. (2021). Sustainable competitive advantage through the implementation of a digital twin. ***In Real-time Simulation for Sustainable Production*** (pp. 196-212). Routledge.

Ünal, A. F., Albayrak, Ö., & Ünal, P. (2023, July). Impact of Digital Twin Technology Utilization in Manufacturing on Sustainability: An Industrial Case Study. In 2023 ***Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*** (pp. 1-10). IEEE.

Vemulapalli, A., Ambildhuke, G. M., & Anuradha, N. (2021). Digital Twin Technology in Internet of Things (IOT). ***Journal of Innovation and Technology***,2(2), 60–63. https://doi.org/10.31629/jit.v2i2.3507.

Wu, Y., & Li, Y. (2022). Digital twin-driven performance optimization for hazardous waste landfill systems. ***Mathematical Problems in Engineering***, 2022.

Wagner, C., Grothoff, J., Epple, U., Drath, R., Malakuti, S., Gruner, S., Hoffmeister, M., & Zimermann, P. (2017). The Role of the Industry 4.0 Asset Administration Shell and the Digital Twin During the Life Cycle of a Plant. ***2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)***, 1–8. https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247583.

Woitsch, R., Sumereder, A., & Falcioni, D. (2022). Model-based data integration along the product & service life cycle supported by digital twinning. ***Computers in Industry,*** 140, 103648. https://doi.org/10.1016/j.compind.2022.103648.

Wynn, M., & Irizar, J. (2023). ***Digital Twin Applications in Manufacturing Industry: A Case Study from a German Multi-National. Future Internet***, 15(9), 282.

Yan, D., Sha, W., Wang, D., Yang, J., & Zhang, S. (2022). Digital twin-driven variant design of a 3C electronic product assembly line. **Scientific Reports**, 12(1), 3846.

Yang, W., Tan, Y., Yoshida, K., & Takakuwa, S. (2017). Digital twin-driven simulation for a cyber-physical system in Industry 4.0. **DAAAM International Scientific Book**, 227-234.

Zhang, L., Feng, L., Wang, J., & Lin, K. Y. (2022). Integration of design, manufacturing, and service based on digital twin to realize intelligent manufacturing. **Machines**, 10(4), 275.

Web sites:

https://nz.kaeser.com/company/press/press-releases/n-complete-connectivity.aspx

(Accessed: 6 November 2023).

ملحق رقم (1)

مواصفات سيارة تويوتا كامري 2024.

تتميز تويوتا كامري 2024 بتصميم أنيق وأداء متفوق، وهي من السيارات السيدان متوسطة الحجم التي تجمع بين الفخامة والعملية. ويمكن توضيح مواصفاتها كما يلي:

-الهيكل الخارجي:

- **المواد** :هيكل السيارة مصنوع من الفولاذ عالي القوة مع استخدام الألمنيوم في بعض الأجزاء لتقليل الوزن وتحسين الأداء.
- **الأبعاد:**
  - ✓ الطول: حوالي 4885 ملم.
  - ✓ العرض: حوالي 1840 ملم.
  - ✓ الارتفاع: حوالي 1445 ملم.

- ✓ قاعدة العجلات: حوالي 2825 ملم.

- **المصابيح:**
  - ✓ مصابيح أمامية وخلفية.LED
  - ✓ مصابيح نهارية.LED
  - ✓ مصابيح ضباب أمامية في الطرازات الأعلى.
- **العجلات:**
  - ✓ تتوفر بحجم 16، 17، 18، و19 بوصة، اعتمادًا على الطراز.
- **الزجاج والنوافذ:**
  - ✓ زجاج أمامي مزود بحماية من الأشعة فوق البنفسجية.
  - ✓ نوافذ جانبية وخلفية مزودة بزجاج مظلل في بعض الطرازات.

-نظام الطاقة:

- **تويوتا كامري 2024 تأتي بخيارات محركات تقليدية وهجينة:**
  - ✓ نظام الدفع الأمامي (FWD) أو الكلي (AWD) اختياري في بعض الفئات.
  - ✓ خيار لنظام هجين يجمع بين محرك بنزين وموتور كهربائي لتحقيق كفاءة أعلى في استهلاك الوقود.

-المحرك:

- **المحرك الأول : (4 سلندر، 2.5 لتر)**
  - ✓ القدرة الحصانية: 203-206 حصان.
  - ✓ عزم الدوران: 250 نيوتن متر.
  - ✓ ناقل حركة أوتوماتيكي بـ 8 سرعات.

- **المحرك الثاني: (6 سلندرV6 ، 3.5لتر)**
  - ✓ القدرة الحصانية: 301 حصان.
  - ✓ عزم الدوران: 362 نيوتن متر.
  - ✓ ناقل حركة أوتوماتيكي بـ 8 سرعات.
- **المحرك الهجين : (4 سلندر، 2.5 لتر مع محرك كهربائي)**
  - ✓ القدرة الحصانية الإجمالية: 208 حصان.
  - ✓ ناقل الحركة :CVT (ناقل الحركة المتغير باستمرار).

-التكنولوجيا:

- **نظام المعلومات والترفيه:**
  - ✓ شاشة تعمل باللمس بقياس 7 أو 9 بوصة.

- ✓ دعم Apple CarPlay و.Android Auto
- ✓ نظام ملاحة متكامل في الطرازات العليا.
- ✓ استخدام تقنية التوأمة الرقمية.

- **النظام الصوتي:**

✓ خيارات نظام صوتي بـ 6 أو 9 سماعات، مع خيار لنظام JBL بـ 9 أو 10 سماعات.

- **ميزات أخرى:**

✓ شحن لاسلكي للهواتف الذكية.

✓ منافذ USB ومنافذ شحن إضافية.

✓ نظام التشغيل عن بعد.

-التصميم الداخلي:

- **المقاعد:**

✓ متوفرة بمقاعد من القماش أو الجلد.

✓ مقاعد قابلة للتعديل كهربائياً في الطرازات العليا.

✓ ميزات التدفئة والتهوية للمقاعد الأمامية في بعض الطرازات.

- **المساحة:**

✓ مساحة واسعة للأرجل في المقاعد الأمامية والخلفية.

✓ مساحة تخزين في الصندوق الخلفي تبلغ حوالي 427 لتر.

- **الديكور:**

✓ تفاصيل من الخشب أو الألمنيوم على لوحة القيادة.

✓ إضاءة داخلية قابلة للتعديل في الطرازات العليا.

-السلامة:

- **نظام الأمان الشامل من تويوتا:(Toyota Safety Sense)**

✓ نظام ما قبل الاصطدام مع كشف المشاة.

✓ تحذير من مغادرة المسار مع مساعد الحفاظ على المسار.

✓ نظام تثبيت السرعة التكيفي.

✓ كشف النقطة العمياء وتنبيه حركة المرور الخلفية.

- **هيكل السيارة:**

✓ هيكل مقوى لامتصاص الصدمات وحماية الركاب.

- **وسائد هوائية:**

✓ مجموعة من الوسائد الهوائية الأمامية والجانبية والستائرية.