منظومة مقترحة لاستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى (Digital Twin) فى تحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة تصميم المنتج

A Proposed System for Using Digital Twin Technology to Enhance the Effectiveness of Strategic Cost Management Techniques for Product Design

إعـــــداد

د/ آية محمد سيد محمد
مدرس المحاسبة بكلية التجارة
جامعة الأزهر– فرع البنات بالقاهرة

أ.د/ صفاء محمد سرور
أستاذ المحاسبة المتفرغ بكلية التجارة
جامعة الأزهر– فرع البنات بالقاهرة

أ.د/ نشوى أحمد الجندى
أستاذ المحاسبة بكلية التجارة
جامعة الأزهر– فرع البنات بالقاهرة

د/ هيام محمد صلاح
مدرس المحاسبة بكلية التجارة
جامعة الأزهر– فرع البنات بالقاهرة

المستخلص

يستهدف هذا البحث تحقيق هدف رئيسى وهو إرساء منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة المنتج بمرحلة التصميم– التكلفة المستهدفة وهندسة القيمة ومصفوفة نشر وظيفة الجودة– باستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى Digital Twin. ولقد تم تحقيق هذا الهدف من خلال التعرف تفصيلاً على التحديات التى تواجه تطبيق كل أسلوب ومن ثم الوقوف على مدى إمكانية التغلب عليها، وذلك تمهيداً لإرساء المنظومة المقترحة عبر دراسة أثر استخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى على فعالية تلك الأساليب والحد من تحديات تطبيقها. وفى إطار اتباع المنهج التطبيقى، تم تطبيق المنظومة المقترحة على إحدى الشركات اليابانية بقطاع صناعة السيارات. ونظراً لطبيعة الدراسة، فقد تم إجراؤها على أحد أجزاء السيارة وهو محرك بدء التشغيل Starter Motor. وذلك عبر التعرف على الوضع الحالى لتطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل، وتقديم اقتراح بتطبيق تلك الأساليب فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى للتحقق من التأثير على فعاليتها.

وقد كانت أهم النتائج التى تم التوصل إليها أن العمل فى إطار المنظومة المقترحة يساهم فى تحسين قدرة أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل على تحقيق الهدف من تطبيقها. وذلك من خلال امكانية إجراء محاكاة لمسببات حدوث التكلفة عبر محاكاة أداء مكونات المحرك وتكلفة كل مكون خلال مراحل دورة حياة الجيل الأخير فى ظل ظروف الاستخدام الفعلية الناتجة عن رصد لتفاعل العملاء مع المحرك عبر أجهزة الاستشعار. وفى ضوء نتائج تلك المحاكاة، تم تحديد دقيق لهدف خفض التكلفة القابل للتحقق عند تصميم الجيل الجديد من محرك بدء التشغل، وتحقيق رؤى شاملة حول الاحتياجات الضمنية للعملاء، بالإضافة إلى تقديم توصيات لتوجيه عملية تحسين القيمة فى اتجاه تلبية هذه الاحتياجات. وعلى ذلك تم قبول الفرض الرئيسى للبحث، والذى ينص على: توجد علاقة بين استخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى وتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة المنتج بمرحلة التصميم.

الكلمات الأساسية: أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة– التكلفة المستهدفة –هندسة القيمة – مصفوفة نشر وظيفة الجودة – تكنولوجيا التوأم الرقمى.

Abstract

This research aimes to achieve a primary purpose, which is to establish a proposed system to enhance the effectiveness of strategic cost management techniques during the design phase– Target Costing, Value Engineering and Quality Function Deployment –, using Digital Twin technology. This purpose was accomplished through identifying the criticisms facing the implementation of each technique to assess the extent to which they can be overcame. This was in preparation for establishing the proposed system by studying the impact of using Digital Twin technology on achieving the objectives of those techniques and reducing the challenges of its implementation. In the context of the applied methodology, the proposed system was implemented in one of the Japanese companies in the automotive industry sector. Regarding the nature of the study, it was conducted on one component of the car, specifically the Starter Motor. This was done by initially assessing the current state of applying strategic cost management techniques in the design phase of a Starter Motor and proposing the implementation of these techniques within the framework of digital twin technology to examine their effectiveness.

The most significant findings indicated that using the proposed system contributes to enhancing the capability of strategic cost management techniques during the design phase of a Starter Motor in achieving its objectives. This was achieved by providing the capabilities to simulate causes of cost by conducting a simulation of component performance and the cost of each component throughout the last-generation life cycle under actual operating conditions resulting from monitoring customer interactions with the motor through sensor devices. Based on the simulation results, a specific achievable cost reduction target was determined for the design of the new generation of Starter Motor, along with comprehensive insights into customer implicit needs. Additionally, recommendations were provided to guide the value improvement process towards meeting these needs. Accordingly, the primary hypothesis was accepted, which states: "There is a correlation between the use of digital twin technology and the improvement of the effectiveness of strategic product cost management techniques during the design phase".

Key words

Strategic Cost Management Techniques – Target Costing – Value Engineering – Quality Function Deployment – Digital Twin Technology.

أولاً: مشكلة البحث

تعتبر الإدارة الاستراتيجية للتكلفة حجر الزاوية للتنفيذ الناجح للفكر الاستراتيجى، حيث تهدف إلى تحليل سلوك التكلفة وتحقيق فهم شامل لها ومن ثم التحكم بها وتحسينها خلال كافة مراحل دورة حياة المنتج. وتعد مرحلة التصميم أحد أهم المراحل الحيوية والهامة لإدارة التكلفة، وتكتسب هذه المرحلة أهميتها من كونها أكثر مراحل دورة الحياة تأثيراً على المراحل التالية لها، حيث أنه يتم الالتزام بنسبة ٨٠٪ على الأقل من تكلفة المنتج فى هذه المرحلة، وتصبح هذه التكاليف مصاحبة له بمجرد إقرار التصميم واعتماده. فالتعديلات التى قد تطرأ على تصميم المنتج خلال مراحل متقدمة من دورة حياته قد تكلف المنظمة أضعاف ما يمكن أن تتكلفه إذا ما أجريت هذه التعديلات فى المراحل الأولية للتصميم (Suteja et al., 2017: 2; Saravi et al., 2019: 2).

وفى إطار ذلك، تعتبر مرحلة التصميم واحدة من الفرص الرئيسية لتطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة. وبالرغم من تعدد هذه الأساليب، إلا أن أسلوب التكلفة المستهدفة والأساليب الداعمة له –هندسة القيمة ومصفوفة نشر وظيفة الجودة QFD[1]– تعد من أهمها وأكثرها انتشاراً على المستويين النظرى والتطبيقى (Alawaed, 2022: 51; Egbuhuzor et al., 2019: 18; Ishak et al., 2020: 6). وبالرغم من هذه الأهمية، إلا أنها تواجه عدداً من التحديات أثناء تطبيقها. فتطبيق أسلوب التكلفة المستهدفة يواجه تحديات تتعلق بالتمييز الدقيق بين هدف خفض التكلفة القابل للتحقق وغير القابل للتحقق، حيث يتطلب هذا التمييز إجراء فحص دقيق لجميع استراتيجيات خفض التكلفة، وهو ما يصعب تحقيقه نظراً لصعوبة الحصول على معلومات تكاليفية تفصيلية فى تلك المرحلة المبكرة من دورة حياة المنتج. هذا فضلاً عن صعوبة وصول فريق التصميم متعدد التخصصات إلى توافق فى الآراء بشأن التصميم الذى يلبى اعتبارات التكلفة المستهدفة ويوفر خصائص المنتج التى تلبى احتياجات العملاء، مما قد يؤثر سلباً على وصول المنتج للسوق فى الوقت المناسب (Ahn et al., 2018: 328; The Institute of Chartered Accountants of India, 2019: 177).

كما توصل الباحثون(Park et al., 2017: 700; Danso & Kwadwo, 2020: 16) إلى أن تطبيق أسلوب هندسة القيمة يواجه تحديات تتعلق بافتقارها إلى آليات مبتكرة لدعم التفكير

[1] *Quality Function Deployment*

الإبداعى نحو ايجاد طرقاً بديلة لأداء وظائف المنتج بغرض تحسين القيمة. كما يفتقر هذا الأسلوب إلى وجود قواعد بيانات منتظمة يمكن من خلالها تخزين وإدارة وتجميع الأفكار الإبداعية السابقة بشكل منهجى لاسترادها والاستفادة منها بكفاءة. وأضاف الباحثون (Rodado et al., 2020: 4; Wolniak, 2018: 14) أن تطبيق مصفوفة QFD يواجه تحديات تتعلق بتحديد الاحتياجات الحقيقية للعملاء، حيث أن هذه الاحتياجات عادة ما تتسم بالتغير السريع وغير المتوقع. كما أن الاعتماد على التقدير الذاتى والأحكام اللغوية ذات الطابع الوصفى فى تحديد درجة أهمية احتياجات العملاء ورغباتهم قد يؤدى إلى صعوبات فى تحليل النتائج بصورة دقيقة من ناحية، بالإضافة إلى صعوبة ترجمتها وتحويلها إلى متطلبات فنية قابلة للقياس من ناحية أخرى.

وفى سياقٍ أخر، فقد مهد الإعتماد المتزايد على تقنيات الثورة الصناعية الرابعة مؤخراً وظهور جيل جديد من تكنولوجيا المعلومات الطريق أمام تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى التى تعتبر اتجاهاً تقنياً هاماً كونها تعبر عن تمثيل رقمى واقعى وديناميكى لمنتج مادى، ينتج هذا التمثيل عن مراقبة فورية لهذا المنتج من مرحلة تصميمه حتى مرحلة التخلص الآمن منه من خلال مجموعة من المستشعرات الملحقة به(Lee et al., 2020: 1; Zheng et al., 2019: 1142). حيث تساهم هذه المستشعرات بشكل أساسى فى تحقيق تواصل وتفاعل ديناميكى بين المنتج المادى ونظيره الافتراضى فى الوقت الفعلى. ويتجاوز ذلك التمثيل الرقمى خلق صورة ثلاثية الأبعاد للكيان المادى فى العالم الافتراضى، وإنما تتوافر امكانية إجراء محاكاة تفصيلية للعديد من المتغيرات من بينها التكلفة والأداء الوظيفى فى ظل سيناريوهات متعددة(Liu et al., 2019: 621).

وفى إطار ذلك، اعتبرت تكنولوجيا التوأم الرقمى أداة دعم رئيسية لتصميم الجيل التالى Next generation من المنتج المادى(Farsi et al., 2021: 507; Lo et al., 2021: 8). فالتوأم الرقمى يُمكّن من مراقبة التغييرات التى تجرى على أداء الجيل الأخير من المنتج طوال دورة حياته باستمرار، الأمر الذى يساعد على تقديم اقتراحات أكثر إبداعاً لبدائل التصميم التى تحسن هذا الأداء بالجيل التالى من ذلك المنتج. هذا فضلاً عن امكانية محاكاة تكلفة كل مكون من مكوناته فى ضوء تلك البدائل المقترحة، مما يتيح تحقيق دقة أعلى فى التقدير الأولى للتكلفة بمرحلة التصميم. كما يساهم التوأم الرقمى فى تعميق فهم المصممين لاحتياجات العملاء المستهدفين والتنبؤ بها من خلال محاكاة ظروف استخدام الجيل الأخير من المنتج فى ظل بيئات عمل مختلفة

لاختبار كفاءة مكوناته أثناء الاستخدام، ومن ثم اكتساب رؤى جديدة حول كيفية تلبية الجيل الجديد من هذا المنتج لتلك الاحتياجات بشكل أفضل (Farsi et al., 2021: 507-508; Xia et al., 2021: 11; Lim et al., 2020: 6).

وبناءً على ما سبق، سيحاول البحث الإجابة على التساؤل التالى:

إلى أى مدى يمكن أن يساهم تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى فى تحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم المنتج؟

ثانياً: هدف البحث

يتمثل الهدف الرئيسى من هذا البحث فى إرساء منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة المنتج بمرحلة التصميم باستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى.

ثالثاً: أهمية البحث

من خلال طبيعة مشكلة البحث والهدف منه، تنبع أهمية هذا البحث من النقاط التالية:

١- فى بيئة التصنيع الحديثة شديدة التنافسية، تعتبر مرحلة التصميم واحدة من الفرص الرئيسية لإدارة تكلفة المنتج وتطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية، وذلك لما لتلك المرحلة من تأثير كبير على تحديد تكاليف المراحل التالية لدورة حياة هذا المنتج، فمعظم تكاليف هذه المراحل يتم تحديدها فى ضوء قرارات التكلفة التى يتم اتخاذها بمرحلة التصميم.

٢- يوفر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى آلية مثالية لتصميم الأجيال التالية من المنتج الحالى. فهى تعتمد على إجراء محاكاة لنسخة رقمية مماثلة للمنتج الفعلى تستطيع توفير صورة مفصلة لأداء الجيل الأخير وتكلفة مكوناته على مدار دورة الحياة. كما تتوافر امكانية إجراء هذه المحاكاة فى ضوء سيناريوهات متعددة.

٣- ندرة الدراسات والأبحاث العربية – فى حدود علم الباحثين– التى استهدفت إرساء منظومة مقترحة لاستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى فى تحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة تصميم المنتج، وبذلك تعتبر هذه الدراسة خطوة على الطريق فى توجيه الاهتمام للاستفادة من مزايا هذه التكنولوجيا على مستوى الدول النامية ومنها مصر.

رابعاً: فرض البحث

لتحقيق الهدف من البحث سيتم اختبار الفرض الرئيسى التالى:

توجد علاقة بين استخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى وتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة المنتج بمرحلة التصميم.

خامساً: منهج البحث

لتحقيق هدف البحث سيتم اتباع المنهجين التاليين:

١- **المنهج النظرى:** وذلك بالإطلاع على ما ورد بالأدب المحاسبى من مراجع عربية وأجنبية، بالإضافة إلى ما تم نشره على شبكة المعلومات الدولية وذلك فيما يتعلق بمشكلة البحث.

٢- **المنهج التطبيقى:** وذلك من خلال تطبيق المنظومة المقترحة على إحدى شركات قطاع صناعة السيارات. حيث يتم دراسة الوضع الحالى لتطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل Starter motor –المنتج قيد الدراسة، مع تقديم اقتراح لتطبيق هذه الأساليب فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى.

سادساً: خطة البحث

سيتم تناول موضوع البحث من خلال أربع محاور رئيسية، وذلك على النحو التالى:

المبحث الأول: الدراسات المحاسبية السابقة

المبحث الثانى: تحديات تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم المنتج

المبحث الثالث: منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم باستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى

المبحث الرابع: تطبيق المنظومة المقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم على إحدى شركات قطاع صناعة السيارات

المبحث الأول
الدراسات المحاسبية السابقة

تمهيد

يهدف هذا المبحث إلى عرض أهم الجهود البحثية السابقة التى تمت فى مجال البحث وذلك بهدف التعرف على أهم ما توصلت إليه هذه الجهود، ومن ثَم تحديد الفجوة البحثية. وفى إطار ذلك يتم تقسيم الدراسات السابقة إلى مجموعتين رئيسيتين تتمثل أولهما فى الدراسات المختصة بالتحديات التى تواجه تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة تصميم المنتج، أما المجموعة الثانية فتشمل الدراسات المختصة بالتعرف على دور تكنولوجيا التوأم الرقمى فى دعم مرحلة التصميم.

١/١الدراسات المختصة بالتحديات التى تواجه تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة تصميم المنتج

من خلال إجراء مسح شامل لمعظم الدراسات التى اهتمت بالتعرف على التحديات التى تواجه تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة تصميم المنتج محاولةً تقديم حلول لمواجهتها، فقد تم التوصل إلى محدودية عدد الدراسات التى استهدفت توجيه الاهتمام لدراسة تلك التحديات بشكل رئيسى. وفى إطار هذا المسح، تم تقسيم الدراسات التى تنتمى إلى هذه المجموعة من خلال مدخلين رئيسيين، أولهما يعرض الدراسات التى اهتمت بدراسة التحديات التى تواجه تطبيق التكلفة المستهدفة. أما المدخل الثانى فيضم الدراسات التى اهتمت بدراسة التحديات التى تواجه تطبيق الأساليب الداعمة –هندسة القيمة ومصفوفة QFD.

ويضم **المدخل الأول** دراسة كل من Becker & Gaivoronski (2017) وهى دراسة حالة استهدفت تقديم نموذج مقترح يسعى لايجاد نهج أفضل لتطبيق أسلوب التكلفة المستهدفة عبر إدارة المخاطر التى تواجه هذا التطبيق ونمذجة حالة عدم التأكد التى تصاحبه، حيث يتم دمج تأثير التغير فى محركات السعر والتكلفة وكذلك التغير فى احتياجات العملاء فى كافة مراحل التطبيق.

وقد تم تحقيق هذا الهدف من خلال الاعتماد على نهج البرمجة العشوائية [1] Stochastic Programming Approach لتطبيق النموذج المقترح على إحدى شركات الاتصالات النرويجية Telenor ASA Trondheim. ولقد خلصت الدراسة إلى أن تطوير نموذج من شأنه تخفيض حالة عدم التأكد المتأصلة فى مراحل تطبيق التكلفة المستهدفة من خلال تزويد المصمم بالاتجاهات الأكثر فعالية لتقدير المخاطر المصاحبة لها، سيساعد مصممى المنتج على الوصول إلى تصميم مثالى يحقق رقم التكلفة المستهدف مع الحفاظ على المستوى الوظيفى الذى يلبى احتياجات العميل من ناحية وفى ظل الحفاظ على السعر المناسب والمستعد لدفعه من ناحية أخرى.

أما دراسة Ahn وآخرون (2018) فهى State of the art استهدفت مراجعة الأدبيات المتعلقة بأسلوب التكلفة المستهدفة للتعرف على تحديات وصعوبات التطبيق ومدى التقدم الذى تم إحرازه من قبل الباحثين لمواجهتها، وذلك تمهيداً لاقتراح اتجاهات مستقبلية تحقق مزيداً من التطوير لهذا الأسلوب. وقد توصلت الدراسة –من خلال استقراء الأدبيات السابقة– إلى أن تقليص تحديات تطبيق التكلفة المستهدفة تم فى إطار ثلاث نطاقات بحثية، الأول هو معالجة أوجه القصور المنهجية والمتمثلة فى حالة عدم التأكد فيما يتعلق بمعلومات مرحلة التصميم. والثانى هو توسيع نطاق التكلفة المستهدفة ليشمل تكلفة دورة الحياة الكاملة للمنتج. أما الثالث والأخير فيتمثل فى توسيع النطاق التنظيمى للتطبيق من خلال ما يسمى بإدارة التكلفة المشتركة بين المنظمات Inter-Organisational Cost Management. وبناءً على هذا الرصد للتقدم المحرز بكل نطاق بحثى حددت الدراسة الفجوات البحثية اللازم تغطيتها لتعزيز التطبيق المنهجى للتكلفة المستهدفة وتحسين فعاليته. وقد اقترحت عدداً من المسارات البحثية التى تدعم الوصول إلى ذلك الهدف، من بينها الاعتماد على نظم تكنولوجيا المعلومات لتسهيل الشفافية وتقليل التعقيد عند تحديد التكلفة

[1] يستخدم نهج البرمجة العشوائية لحل مشاكل صنع القرار التى تنطوى على حالة من عدم التأكد ناتجة عن أن قيم بعض المتغيرات غير معروفة بصورة مؤكدة وتتبع التوزيع الاحتمالى، وذلك عبر السماح لصانعى القرار بصياغة خطط مرنة وقابلة للتكيف تأخذ فى الاعتبار عدد من السيناريوهات المستقبلية المحتملة (Becker & Gaivoronski, 2017: 1910).

المستهدفة، وكذلك دمج عمليات التخطيط الاستراتيجى فى تحديد التكلفة المستهدفة لتخفيض حالة عدم التأكد فى المعلومات اللازمة لاجتياز هذه المرحلة بصورة أكثر دقة.

وتعد الدراسة السابقة على درجة كبيرة من الأهمية، فهى من الدراسات الهامة التى اعتمدت بصورة كبيرة على الأدب المحاسبى الألمانى فى استقراء الأدبيات السابقة لدراسة تحديات تطبيق أسلوب التكلفة المستهدفة بشكل منهجى وتفصيلى. وقد كان ذلك دافعاً رئيسياً لإجراء مزيد من البحث لإثراء المكتبة العربية بمزيد من الدراسات التى تخصص لرصد ومناقشة هذه التحديات بهدف إيجاد نهجاً مناسباً للحد منها، وليكون هذا البحث خطوة على الطريق لسد الفجوات البحثية التى تم التوصل إليها.

أما **المدخل الثانى** والذى يهتم بعرض الدراسات التى استهدفت دراسة التحديات التى تواجه تطبيق الأساليب الداعمة والمتمثلة فى هندسة القيمة ومصفوفة QFD. فيضم دراسة Wao (2015) والتى نشرت فى مؤتمر SAVE International[1] السنوى فى الولايات المتحدة الأمريكية، وهى دراسة نظرية استهدفت تقديم تحليل انتقادى لأسلوب هندسة القيمة من خلال تحديد تحديات التطبيق لإيجاد أفضل الحلول الممكنة التى تحقق نتائج أكثر فعالية. وقد توصلت الدراسة إلى عدة نتائج من بينها: أن هندسة القيمة عادة ما تفتقر إلى آليات مبتكرة لدعم التفكير الإبداعى. وقد اقترحت الدراسة الاعتماد على البرمجة اللغوية العصبية Neuro-Linguistic Programming كواحدة من الاستراتيجيات الداعمة لتحسين التواصل بين أعضاء فريق القيمة، ومن ثم توجيه الجهود المبذولة نحو خلق مزيد من الأفكار المبتكرة. كما توصلت الدراسة إلى أن هندسة القيمة تواجه تحديات تتعلق بوضع معايير مناسبة لتقييم البدائل وتحديد الأهمية النسبية لكل بديل، حيث يتم تحديد المعايير فى ضوء مزايا وعيوب كل بديل، وهو ما قد يسفر عن نتائج تقييم غير دقيقة، فميزة أحد البدائل قد تكون عيباً فى بديل آخر والعكس صحيح. وقد اقترحت الدراسة الاعتماد على نظام Choosing By Advantages (CBA) وهو أحد أنظمة دعم اتخاذ القرار

[1] تعد SAVE International هى الجهة الدولية الأولى الهادفة لتطوير منهجية القيمة وتعزيزها. حيث توفر برامج تدريبية معتمدة لأعضائها لدعم ممارسة منهجية القيمة فى أكثر من ٣٥ دولة (SAVE, 2020: 1).

التى تستند إلى التقييم بناء على مقارنة مزايا كل بديل، وهو ما يجنب الحساب المزدوج ويدعم الوصول إلى نتائج محسنة.

وترجع أهمية الدراسة السابقة إلى أنها لم تكتفى بمناقشة التحديات التى تواجه تطبيق هندسة القيمة فحسب، ولكنها قدمت حلولاً للحد منها. فقد استهدفت الدراسة تضمين أساليب إبداعية متفوقة وتقنيات تقييم محسّنة مدعومة بنظم دعم القرار والبرمجة اللغوية العصبية فى خطة عمل هندسة القيمة، بهدف إعادة توجيهها لتشمل معايير الأداء بدلاً من التركيز المفرط على هدف خفض التكلفة. **وعلى الرغم من تلك الأهمية** إلا أن الدراسة لم تقدم دليلاً عملياً على نتائجها، الأمر الذى يتطلب المزيد من البحث وإجراء دراسات حالة لاختبار موثوقية وصلاحية تأثير الحلول المقترحة على تطبيق هندسة القيمة.

أما دراسة Kissi وآخرون (2016) فهى دراسة ميدانية استهدفت مناقشة التحديات التى تواجه التطبيق الناجح لهندسة القيمة بشركات المقاولات وشركات تقديم الخدمات الإستشارية بمجال صناعة البناء والتشييد التى تتبع القطاع العام بدولة غانا. وقد اعتمدت الدراسة الميدانية على توزيع قوائم استقصاء على عينة من المهندسين والمحاسبين ومديرى المشروعات بالشركات محل الدراسة لتقييم اثنان وعشرون تحدياً تم تحديدها من خلال مراجعة الأدبيات السابقة. وقد تم تحليل بيانات هذه الدراسة بالاعتماد على التحليل العاملى Factor analysis لتقليل عدد المتغيرات الخاضعة للدراسة. وفى إطار ذلك توصلت الدراسة إلى أن التطبيق الناجح لهندسة القيمة يتطلب الحد من التحديات التى تواجهه. وفى ظل الاعتماد على التحليل العاملى، تم تجميع تحديات تطبيق هندسة القيمة فى خمس مجموعات رئيسية تتمثل فى: تحديات تتعلق بفريق القيمة، ومن بينها الإفتقار إلى روح العمل الجماعى. وكذلك تحديات تتعلق بدراسة القيمة، ومنها نقص المهنيون المؤهلون بالمجال. وتحديات تتعلق بتنفيذ هندسة القيمة، ومن بينها عدم وجود دعم من الإدارة العليا لتطبيقها. بالإضافة إلى التحديات المفاهيمية، ومن بينها تعقيد مفهوم هندسة القيمة وتعدد مراحله. وأخيراً تحديات تتعلق بالتطبيق فى الاقتصاديات النامية.

وفى نفس العام، قام Yang وآخرون (2016) بإجراء دراسة تطبيقية استهدفت اقتراح منهجية عمل لتطوير مصفوفة QFD بهدف دعم عملية اختيار الإجراءات الاستراتيجية الأكثر فعالية لتلبية احتياجات العملاء خلال إدارة الخدمات اللوجستية. وقد كان الدافع وراء إجراء هذه المنهجية أن

تطبيق مصفوفة QFD غالباً ما يواجه حالة عدم تأكد ناتجة عن الاعتماد على التقدير الذاتى والأحكام اللغوية ذات الطابع الوصفى فى تحديد احتياجات العملاء ورغباتهم. وقد استعانت الدراسة بدمج نظرية عدم التأكدUncertainty theory– وهى أداة فعالة للتعامل مع المعلومات غير الموثوقة وخاصة تلك الناتجة عن التقديرات الذاتية للخبراء– فى منهجية عمل QFD لتخفيض تلك الحالة من عدم التأكد. وأجريت الدراسة التطبيقية عبر مجموعة من الأمثلة الرقمية Numerical examples لتوضيح تطبيق المنهجية. وأثبتت النتائج أن تطوير أسلوب QFD بواسطة نظرية عدم التأكد يساعد على التعامل مع المعلومات غير الدقيقة، وخاصة تلك المتعلقة بالتقديرات الذاتية للخبراء، وعلى ذلك تساعد منهجية العمل المقترحة مقدمى الخدمات اللوجستية على اختيار المتطلبات الأكثر فعالية فى تحقيق رضاء العملاء.

وعلى الرغم من أهمية الدراسة السابقة النابعة من استهدافها تطوير مصفوفة QFD عبر تخفيض حالة عدم التأكد التى تواجه التطبيق، إلا أنه قد يوجه لها انتقاد يتعلق باختبار نتائج منهجية العمل المقترحة بالاعتماد على مثال رقمى افتراضى وليس بناء على بيانات حقيقية من الواقع الفعلى للشركات.

كما أجرى Wolniak (2018) دراسة State of the art استهدفت تحليل ما ورد بالأدب الدولى International literature حول مزايا وتحديات تطبيق مصفوفة QFD. وقد توصلت الدراسة إلى أن مزايا مصفوفة QFD تتمحور حول كونها تحقق فهماً أفضل لمتطلبات العملاء وتفضيلاتهم وتوفر فرصة حقيقية لدمج هذه التفضيلات فى إستراتيجيات تصميم المنتج، بالإضافة إلى مساهمتها فى تقليص الوقت اللازم لإصدار المنتج ووصوله إلى السوق، الأمر الذى ينعكس ايجابا على رضاء العملاء. وعلى الجانب الآخر توصلت الدراسة إلى أن تطبيق المصفوفة يواجه عدداً من التحديات من بينها اعتمادها بشكل أساسى على تحديد متطلبات العملاء، والتى عادة ما تتم عن طريق توزيع قوائم الاستقصاء وإجراء المقابلات الشخصية مع العملاء ومن ثم الحصول على كم كبير من البيانات ذات الطابع الوصفى التى يصعب تحليلها بصورة دقيقة مما قد يترتب عليه الوصول إلى نتائج مضللة. كما يواجه تطبيق المصفوفة أيضاً صعوبة التكيف مع احتياجات ومتطلبات العملاء بنفس السرعة التى تتغير بها هذه الاحتياجات، الأمر الذى قد يوثر تأثيراً سلبياً على النتائج المتوقعة للمنتج الذى يتم تصميمه.

٢/١ الدراسات المختصة بالتعرف على دور تكنولوجيا التوأم الرقمى فى دعم مرحلة التصميم

تضم هذه المجموعة العديد من الدراسات من بينها دراسة Tao وآخرون (2018) حيث قاموا بإجراء دراسة حالة استهدفت اقتراح إطاراً لتصميم المنتجات موجه بالتوأم الرقمى[1] DTPD، يدمج هذا الإطار نظرية التصميم ومنهجيته DTM[2] وإدارة دورة حياة البيانات DLM[3] والتوأم الرقمى DT[4]. وقد أجريت دراسة الحالة على تصميم الدراجات بمشروع "مشاركة الدراجات" "Bicycle-sharing" بالصين. وتوصلت الدراسة إلى أن الاعتماد على التوأم الرقمى فى ضوء إطار DTPD المقترح يساهم فى توفير معرفة موثوقة حول أداء المنتج الحالى وملاحظات العملاء وتوقعاتهم وما إلى ذلك، ومن ثم تعميق فهم المصممين لاحتياجات العملاء المستهدفين. كما يساعد على إجراء اختبار التصميم ومحاكاته افتراضياً ليحل محل الاختبار المادى، وبناءً على تحليل نتائج الاختبار يتم تلقائياً اقتراح تغييرات التصميم المطلوبة. الأمر الذى يساعد على تخفيض عمليات التعديلات المتكررة على التصميم وتجنب الاختبارات المطولة المتعلقة بالتقييم.

وتتميز الدراسة السابقة بكونها لم تكتفى بتقديم إطاراً نظرياً للتعرف على دور تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى فى دعم مرحلة التصميم، بل دعمت النتائج التى توصلت إليها من خلال إجراء دراسة الحالة، إلا أنه يعاب عليها أن دراسة الحالة المقدمة اكتفت بعرض وصفاً لتطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى بمراحل تصميم مشروع "مشاركة الدراجات" دون محاولة التحقق من هذا التأثير بصورة عملية –وهى السمة الغالبة على دراسات الحالة التى تم إجراؤها فى مجال التوأم الرقمى–، وهذا ما سوف يتم القيام به فى هذا البحث للتغلب على هذا القصور.

كما أجرى كل من Zheng & Lim (2020) دراسة استهدفت اقتراح نهجاً عاماً لدعم عملية تصميم عائلة المنتج Product Family[٥] عبر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى. وقد تم تحقيق هذا الهدف من خلال القيام بدراسة حالة على إحدى شركات تصميم وتنفيذ عائلة الرافعات البرجية

---

[1] *Digital Twin-Driven Product Design.*
[2] *Design Theory and Methodology.*
[3] *Data Lifecycle Management.*
[4] *Digital Twin.*
[٥] عائلة المنتج هى مجموعة المنتجات ذات الصلة فيما بينها تنتجها شركة واحدة ومرتبطة بمنصة مشتركة، وتكون ذات خصائص مادية متشابهة وعمليات إنتاج متقاربة (Zheng & Lim, 2020: 247).

Tower Crane Familyفى هونج كونج بالصين. وقد توصلت الدراسة إلى أن التوأم الرقمى يوفر دعماً لمرحلة تصميم عائلة المنتج عبر محاكاة نموذج افتراضى يوفر نمذجة عالية الدقة للمنتجات المادية ويوضح الترابط بين مكوناتها المختلفة، ومن ثم إجراء تقييمات أكثر واقعية لتلك المنتجات. وفى إطار ذلك توصلت دراسة الحالة إلى أن التوأم الرقمى يحقق مراقبة الرافعة البرجية والتحكم فيها عن بعد من خلال الاستفادة من بيانات الاستشعار فى الوقت الفعلى التى لا توفر بيانات حول الرافعة فحسب، بل توفر أيضًا بيانات حول العوامل البيئية التى تؤثر على أدائها كسرعة الرياح. الأمر الذى يساهم فى تقصير دورات تصميم الأجيال التالية من ناحية ويضمن العمل فى إطار معايير السلامة من ناحية أخرى.

أما Lo وآخرون (2021) فقد قاموا بإجراء دراسة State of Arts استهدفت مراجعة للأبحاث والدراسات التى ركزت على دراسة تأثير تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على مرحلة تصميم المنتج وتطويره. وقد توصلت الدراسة إلى أن تكنولوجيا التوأم الرقمى تساهم فى تحسين مرحلة تصميم المنتج بشكل فعال. حيث يلعب التوأم الرقمى للمنتج أدواراً مختلفة على مدار مرحلة التصميم من خلال وضع تصور مرئى لتقييم التصميم بشكل أكثر فعالية. كما يساهم فى إثراء مصممى المنتجات بالبيانات الناتجة عن تتبع دورة حياة الجيل الأخير فى الوقت الفعلى باستخدام المستشعرات، ودمجها بالنموذج ثلاثى الأبعاد للتصميم وإجراء محاكاة دقيقة لتقليل وقت الاختبارات التى عادة ما تستغرق وقتًا طويلاً.

وتنبع أهمية الدراسة السابقة من مناقشتها لأحدث ما توصلت إليه الأدبيات العلمية والممارسات العملية فى تأثير التوأم الرقمى على مرحلة التصميم، وقد أثبتت الدراسة أن عدد الدراسات التى قامت بالتحقق من هذا التأثير يتزايد تدريجياً فى السنوات الأخيرة، وأن المؤسسات العلمية بالصين وألمانيا أول المساهمين الرئيسيين فى هذا المجال البحثى.

كما أجرى Bellalouna (2022) دراسة حالة استهدفت التعرف على دور تكنولوجيا التوأم الرقمى فى تحسين عملية التصميم. تناولت دراسة الحالة اختبار هذا الدور فى إطار دراسة أثر تضمين مستشعرات قوية ذات دقة عالية بأحد أنواع المكابس الهيدروليكية Hydraulic presses بهدف وضع تمثيل رقمى واقعى لها على تحسين عملية تصميم الأجيال الجديدة منها. وقد تم تنفيذ الدراسة بإحدى مختبرات الهندسة الرقمية بجامعة العلوم التطبيقية The Digital Engineering

Lab of the University of Applied Science فى ألمانيا. وقد توصلت الداراسة إلى أن تكنولوجيا التوأم الرقمى تساعد على تحسين أداء المنتجات الحالية وذلك عبر إنشاء نموذج تصورى متكامل ومحدث لأداء المنتج الحالى فى الواقع العملى. كما توصلت إلى أن محاكاة هذا النموذج عند تصميم الأجيال التالية من تلك المنتجات، يساهم فى فتح آفاقًا جديدة للتصميم عبر الاعتماد على البيانات الفعلية والمجمعة من المستشعرات –بدلاً من تلك المعتمدة على البيانات المقدرة أو بيانات الخبرة وهو ما يدعم كفاءة عملية التصميم ويزيد من فعاليتها.

وفى عام ٢٠٢٣ أجرى Arnemann وآخرون (2023) دراسة استهدفت تقديم نموذج معلومات منظم لدعم إعادة بيانات التوأم الرقمى إلى مرحلة تصميم الجيل التالى من المنتج. وقد تم تقديم وصفاً لتطبيق هذا النموذج فى الواقع العملى عبر إجراء دراسة حالة على إحدى إصدارات الطابعة ثلاثية الأبعاد التى تقوم بإنتاجها شركة Prusa Research التشيكية وهو الإصدار Original Prusa i3 MK3S. وقد توصلت الدراسة إلى أن نموذج المعلومات المنظم يقدم نهجاً شاملاً يتيح امكانية استرجاع بيانات التوأم الرقمى ذات الصلة والناتجة عن تتبع دورة حياة الجيل الأخير من المنتج بصورة تتسم بالشفافية وهو ما يحسن كفاءة تصميم الجيل التالى من هذا المنتج من خلال تحسين استغلال الموارد المتاحة وتخفيض التكلفة. وفى إطار دراسة الحالة توصلت النتائج إلى أن تطبيق نموذج المعلومات على إصدار الطابعة ثلاثية الأبعاد محل الدراسة يدعم تفسير البيانات المقدمة من التوأم الرقمى فيما يتعلق بتحديد متطلبات الأداء، وهو ما ينعكس ايجاباً على استغلال الموارد ومن ثم التكلفة.

وفى إطار ما تم عرضه من الدراسات السابقة يتضح وجود فجوة بحثية تتمثل فى:

١- أنه على الرغم من اهتمام عدد من الباحثين بمناقشة التحديات التى تواجه أساليب الإدارة الإستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم بهدف تحسين فعالية تطبيق كل منها ومحاولتهم وضع حلولاً للحد منها. إلا أن هذه الدراسات لم تتطرق إلى مناقشة التحديات التى تواجه تلك الأساليب فى إطار التكامل بينها. فهذه التحديات قد يكون لها تأثيراً سلبياً على الهدف الذى يسعى هذا التكامل لتحقيقه، والمتمثل فى تصميم منتج يحقق التوازن بين الوصول للتكلفة المستهدفة والحفاظ على الأداء الوظيفى وتلبية احتياجات العملاء. وعلى ذلك يعتقد الباحثون أن الأدب المحاسبى مازال فى حاجة إلى المزيد من الدراسات فى هذا المجال، وأن هذا البحث يعتبر خطوة على الطريق

لإستكمال الجهود السابقة للتحقق من التحديات التى تواجه تطبيق أساليب الإدارة الإستراتيجية للتكلفة محل الدراسة ومناقشتها بهدف ايجاد نهج مناسب يساهم فى الحد منها.

٢- أنه على الرغم من وجود اهتمام كبير من جانب الباحثين فى الدول المتقدمة بدراسة دور تكنولوجيا التوأم الرقمى فى دعم مرحلة تصميم المنتج، إلا أنه لم يكن هناك اهتمام كاف من جانب الباحثين فى الدول العربية والنامية للتعرف على هذه التكنولوجيا. لذلك فإن المكتبة العربية ما زالت فى حاجة إلى المزيد من الأبحاث والدراسات التى تخصص لدراستها للتعرف على مزاياها وأسباب تفوقها فى مجال التصميم ومدى ملاءمة تطبيقها بالمنظمات العاملة بالدول العربية. بالإضافة إلى أن معظم الدراسات السابقة قد اكتفت بعرض الجانب النظرى لتكنولوجيا التوأم الرقمى، وأن الدراسات التى حاولت تطبيقها فى الواقع العملى عن طريق دراسات الحالة اقتصرت على عرض لكيفية التطبيق بخطوات نظرية. وأخيراً، لم تقم أى من الدراسات السابقة –فى حدود علم الباحثين– بدراسة تأثيرها على فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم المنتج.

وعلى ذلك، استهدف هذا البحث تغطية هذه الفجوة البحثية من خلال إرساء منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة المنتج بمرحلة التصميم باستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى. ويستلزم تحقيق ذلك مناقشة التحديات التى تواجه تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة تصميم المنتج، وهو ما سيتم العمل على تحقيقه فى المحور التالى من هذا البحث.

المبحث الثانى

تحديات تطبيق أساليب الإدارة الإستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم المنتج

تمهيد

اعتمدت العديد من الجهود البحثية (Alawaed, 2022: 51; Egbuhuzor et al., 2019: 18; Ishak et al., 2020: 6) النهج التكاملى بين أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم المنتج باعتبارها داعماً أساسياً للنظرة الشاملة لإدارة التكلفة من خلال تحقيق التوازن بين أهداف التكلفة والجودة وتلبية احتياجات العملاء، إلا أن نجاح هذا التكامل يعتمد بشكل كبير على نجاح تطبيق مراحل كل أسلوب. ونظراً لأهمية مرحلة التصميم والتى يتحدد بها معظم تكاليف المنتج وتصبح غير قابلة للتعديل فيما بعد–كما سبقت الإشارة، فإن التحديات التى تواجه تطبيق تلك الأساليب قد تحد من الوصول للأهداف المرجوة منها. الأمر الذى يتطلب مناقشة هذه التحديات بهدف محاولة تخفيض تأثيرها، ومن هنا كان التوجه لتخصيص هذا المبحث لدراسة وتحليل تحديات تطبيق كل أسلوب وفقاً لمراحل تطبيقه.

١/٢ تحديات تطبيق أسلوب التكلفة المستهدفة

تعد التكلفة المستهدفة أسلوب لإدارة التكلفة بشكل استباقى بهدف تحقيق هوامش الربح المرغوبة فى ضوء التقييم المستمر لسعر السوق، مع ضمان تحقيق التوافق والتوازن بين تلك التكلفة من ناحية وأداء المنتج وخصائصه التى تحقق احتياجات ورغبات العملاء من ناحية أخرى(CPA Canada, 2015:6-7). ويتم تحديد التكلفة المستهدفة من خلال ثلاث مراحل أساسية تتمثل فى التكلفة الموجهه بالسوق والتكلفة المستهدفة على مستوى المنتج وأخيراً التكلفة المستهدفة على مستوى المكون (Lima et al., 2016: 16-17). وفى ضوء ذلك، ستتم دراسة تحديات تطبيق التكلفة المستهدفة من خلال عرض مختصر لكل مرحلة من مراحلها للتعرف على التحديات التى تواجه تطبيقها، وذلك كما يلى:

أولاً: التحديات التى تواجه تطبيق مرحلة التكلفة الموجهه بالسوق: تعتمد التكلفة المستهدفة على آليات السوق كقوة محركة للمنافسة كونها جزءاً من العملية الإستراتيجية لإدارة التكلفة وتخطيط الأرباح. وفى هذه المرحلة يتحدد رقم التكلفة المسموح بها. بعد ذلك تأتى خطوة تحديد التكلفة المستهدفة، حيث يتم أولاً تحديد رقم التكلفة الجارية والذى غالباً ما يكون أكبر من رقم التكلفة

المسموح بها، ومن خلال إجراء محاولات التوفيق بين التكلفة المسموح بها والتكلفة الجارية يتحقق الوصول إلى التكلفة المستهدفة(Lima et al., 2016: 16).

وتواجه هذه المرحلة بعض تحديات التطبيق من بينها:

- صعوبة التنبؤ بسعر السوق خاصةً فى ظل الإرتفاع المستمر فى أسعار المواد الأولية وكذلك التنبؤ برغبات العملاء المستقبلية التى تتغير باستمرار. الأمر الذى يساهم فى صعوبة التحديد الدقيق للتكلفة المستهدفة (El- Dalahmeh, 2018: 394; Ahn et al., 2018: 326).
- صعوبة التنبؤ بالمنافسين الحاليين والمحتملين، فالتكلفة المستهدفة غالباً ما تطبق فى الأسواق شديدة التنافس، حيث يجبر الضغط التنافسى المنظمات على خفض التكلفة لتحسين المركز التنافسى وضمان البقاء فى السوق (El- Dalahmeh, 2018: 394; Gua & Heb, 2019: 79).

ثانياً: التحديات التى تواجه تطبيق مرحلة التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج: تركز التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج على تصميم منتج يلبى رغبات العملاء فى ضوء التكلفة المسموح بها، وحيث أن التكلفة المسموح بها تشتق من الظروف الخارجية للسوق دون الأخذ فى الاعتبار امكانيات خفض التكلفة من جانب المنظمة، فقد لا يمكن تحقيقها دائماً من الناحية العملية. وهنا يتعين على المنظمة تعديل التكلفة المسموح بها غير القابلة للتحقق عبر تحديد مستوى خفض التكلفة الذى يمكن تحقيقه والذى لا يمكن تحقيقه. وبناءً على ذلك يتم تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج عبر تحديد الفرق بين التكلفة الجارية ومستوى خفض التكلفة الممكن (Pazarceviren & Celayir, 2013: 6; Lima et al., 2016: 17).

ويواجه تطبيق هذه المرحلة عدداً من التحديات منها:

- يستند تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج إلى منهجية تعتمد فى الأساس على معلومات تفصيلية تحدد درجة دقتها درجة جودة القرار المتخذ. إلا أن مثل هذه المعلومات قد يصعب الحصول عليها فى تلك المرحلة المبكرة من دورة حياة المنتج، ومن ثم يواجه التطبيق حالة من عدم التأكد فيما يتعلق بتلك المعلومات. ففى ظل التقدير المبكر للتكلفة قد تظل تفاصيل التصميم المهمة وتكاليفها غير مؤكدة (Stadtherr & Wouters, 2021: 2; Ahn et al., 2018: 328).
- يشوب تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج نقاط ضعف قد تؤدى إلى تخصيص عشوائى للموارد، ففى هذه المرحلة يتم تخصيص الموارد للمنتج فى ضوء تخصيص الموارد بالجيل الأخير.

ومن ثم يكون هناك خطر لاعتماد تصميم مبدئى تم تخصيص التكاليف المستهدفة له اعتماداً على الحلول التاريخية دون الأخذ فى الاعتبار مدى تقييمها من قبل السوق، الأمر الذى يؤدى إلى عرقلة الأنشطة المبتكرة وتوجه التفكير نحو أنماط السلوك القديمة (Ahn et al., 2018: 328).

- يتطلب التمييز بين هدف خفض التكلفة القابل للتحقق وغير القابل للتحقق دقة عالية، حيث ينبغى أن تكون العملية التي يتم من خلالها تحديد "هدف خفض التكلفة القابل للتحقق" شديدة الانضباط، وإلا فإنها تصبح آلية لتقليل فعالية أسلوب التكلفة المستهدفة عبر تحديد التكلفة المستهدفة التى يسهل تحقيقها. فتحديد هدف خفض التكلفة القابل للتحقق عند مستوى عالٍ للغاية سيؤدى إلى إرهاق القوى العاملة بالمنظمة، وفى نهاية الأمر تفقد الانضباط فى تحديد التكلفة المستهدفة. وعلى العكس من ذلك، إذا كان هدف خفض التكلفة منخفضاً للغاية فهذا يعنى أن التحدى الاستراتيجى لهذا الخفض قد تحدد عند مستوى مرتفع الأمر الذى قد يؤدى إلى فقدان المنظمة لمركزها التنافسى على المدى الطويل(Yükçü & Koçakoğlu, 2015: 13).

ثالثاً: التحديات التى تواجه تطبيق مرحلة التكلفة المستهدفة على مستوى المكون: يبدأ تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المكون بتحليل المنتج إلى مجموعة من الوظائف وتقييم أهميتها من حيث أداء المهام الوظيفية التى تساهم فى تحقيق الغرض من المنتج. وتهدف هذه الخطوة إلى تخصيص التكلفة المستهدفة للمنتج على وظائفه بحيث يمثل مجموع التكاليف المستهدفة لجميع الوظائف التكلفة الكلية المستهدفة للمنتج (Slagmulder, 2018: 1; Pazarceviren & Celayir, 2013: 6). وبعد ذلك، يتم تحليل التكلفة المستهدفة لكل وظيفة على مستوى مجموعة من المكونات التى تتشكل منها تلك الوظيفة بهدف تحديد تكلفة كل مكون، ثم تحديد الأهمية النسبية لهذه المكونات من حيث مدى مساهمة كل مكون فى تحقيق أداء الوظيفة المعنية. بعد ذلك يتم توزيع التكاليف المستهدفة على مستوى الوظيفة إلى تكاليف على مستوى المكونات بحيث أن مجموع التكاليف المستهدفة على مستوى المكون يساوى التكلفة المستهدفة للوظيفة التى تحتوى على هذه المكونات (Lima et al., 2016: 17).

ويواجه تطبيق هذه المرحلة عدداً من التحديات منها:

- صعوبة وصول فريق التصميم –يتكون من ممثلين من مختلف الإدارات إضافةً إلى الموردين– إلى توافق فى الآراء بشأن التصميم المناسب. حيث يتطلب الوصول الدقيق إلى تصميم يحقق التكلفة المستهدفة على مستوى الوظائف والمكونات ايجاد تعاوناً مكثفاً بين اعضاء فريق التصميم، وبدون

هذا التعاون سيكون الوصول إلى تخصيص دقيق للتكلفة المستهدفة أمراً صعباً، نظراً لوجود عدد كبير من وجهات النظر فيما يتعلق بتحقيق التوافق بين ميزات وخصائص المنتج التى تلبى متطلبات العملاء فى ظل قيود التكلفة المستهدفة (The Institute of Chartered Accountants of India: 2019: 177).

- يبدأ تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المكون مبكراً أثناء عملية تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج نظرًا لأن التكلفة على مستوى المنتج تعتمد بشكل كبير على تكلفة كل مكون. وحيث أن عملية تحديد أسعار بيع الموردين المتفاوض عليها عادةً ما تحدث فى وقت متأخر إلى حد ما عن عملية تحديد التكلفة المستهدفة، فغالباً ما يتم تحديد مستوى خفض التكلفة الذى ينبغى على موردى المنظمة تحقيقه مرة عند تحديد التكلفة المستهدفة لدمج مقترحاتهم لخفض تكلفة المكونات، ويتم تكرار العملية مرة أخرى بعد التحديد النهائى للأسعار مع الموردين (Slagmulder, 2018: 1).

وبناء على ذلك، فإن الوصول إلى تصميم نهائى للمنتج يلبى اعتبارات التكلفة المستهدفة فى حدود الأسعار النهائية للموردين على مستوى المكون يتطلب تكرار التصميم وإجراء عدداً من المحاولات لتعديله، مما قد يترتب عليه صعوبة الوصول إلى ذلك التصميم فى إطار زمنى معقول حيث يستغرق الأمر وقتاً أطول من المعتاد، الأمر الذى قد يؤدى فى النهاية إلى وصول المنتج للسوق فى وقت متأخر(The Institute of Chartered Accountants of India: 2019: 177).

- يؤدى تطبيق التكلفة المستهدفة إلى خلق صعوبات فى التعامل مع الموردين، خاصة عندما يتم عرض متطلبات خفض التكلفة للوصول إلى التكلفة المستهدفة لكل مكون، حيث يشعر الموردون بأن المنظمة تنقل العبء الأكبر لتحقيق خفض التكلفة إليهم (Gua & Heb, 2019: 80).

فى ضوء ما سبق يمكن القول أن هناك عدداً من التحديات التى تواجه تطبيق أسلوب التكلفة المستهدفة فى كافة مراحلها، إلا أن أغلب هذه التحديات تتمحور حول مواجهتها لظروف عدم التأكد التى تفرضها مرحلة التطبيق، الأمر الذى قد يجعل التحديد الدقيق للتكلفة المستهدفة أمراً صعباً وقد يستغرق وقتاً طويلاً مما قد يترتب عليه إما تخصيص عشوائى للموارد أو الوصول للسوق فى وقت متأخر.

٢/٢ تحديات تطبيق أسلوب هندسة القيمة

قامت جمعية مهندسى القيمة الأمريكية SAVE[1] بتعريف أسلوب هندسة القيمة بأنه تطبيق منهجى يهدف إلى تحديد وظائف المنتج وقيمة كل وظيفة لمحاولة الوصول إلى أفضل أداء وظيفى بأقل تكلفة إجمالية ممكنة (SAVE, 2020: 1). ويتم تطبيق هذا الأسلوب من خلال تنفيذ خطة عمل منهجية تتضمن ثلاث مراحل، إلا أن المرحلة الثانية وهى مرحلة دراسة القيمة تعد المرحلة الرئيسية لتطبيق هذه الخطة، فالمرحلة الأولى هى تمهيد لإجراء دراسة القيمة والمرحلة الأخيرة تهدف إلى مراقبة نتائجها. وعلى ذلك سيتم دراسة تحديات تطبيق أسلوب هندسة القيمة عبر مناقشة التحديات التى قد تواجه المراحل الفرعية لإعداد دراسة القيمة وذلك فيما يلى:

أولاً: تحديات مرحلة المعلومات: تعتبر مرحلة المعلومات أولى المراحل التى تستند إليها دراسة القيمة، ففى هذه المرحلة الأولى يحاول الفريق فهم الغاية من إنتاج المنتج محل الدراسة عبر توفير معلومات دقيقة حول وظائفه وتكاليفه، بالإضافة إلى توفير معلومات كافية حول احتياجات العملاء ومتطلباتهم بهدف وصول أعضاء فريق هندسة القيمة إلى فهم مشترك عن كل ما يحيط بالمنتج من أبعاد وحقائق تساعد فى إتمام دراسة القيمة (Alkhereibi, 2017: 13).

وأضاف Wao (2015: 3) أنه فى هذه المرحلة يتم تحديد معايير تقييم البدائل مبدئياً. وقد اعتبرت الدراسة ذاتها أن ذلك نهجاً غير سليماً قد يتسبب فى وضع معايير غير مناسبة، فعملية تقييم البدائل لا تتم فى تلك المراحل المتقدمة من التطبيق وقد تم اقتراح مرحلة التفكير الإبداعى والإبتكارى كأنسب المراحل لتحديد معايير التقييم.

ثانياً: تحديات مرحلة تحليل الوظيفة: يعد الهدف الرئيسى من هذه المرحلة هو فهم المنتج وظيفياً، وذلك عبر تحديد وظائف المنتج وتصنيفها إلى وظائف أساسية وأخرى ثانوية تدعم تنفيذها (Selim et al., 2017: 370; Rad & Yamini, 2016: 267). ويتم توضيح العلاقات التى تربط الوظائف بعضها البعض وتقييمها من حيث التكلفة والأداء لتحديد الوظائف المضيفة منها للقيمة من خلال تقنية نظام تحليل الوظائف FAST[2] (Alkhereibi, 2017: 17).

[1] *Society of American Value Engineers.*

[2] *Function Analysis System Technique.*

وفى هذا الصدد، وجهت إلى هذه المرحلة انتقادات تتعلق بالاعتماد الزائد على تقنية FAST لتحليل الوظائف، حيث تميل التقنية إلى خفض التكلفة على حساب الأداء والجودة. الأمر الذى قد يؤثر سلباً على تحقيق الهدف من تطبيق أسلوب هندسة القيمة والمتمثل فى التخلص من التكلفة غير الضرورية فى ضوء الحفاظ على الخصائص الرئيسية للمنتج ومستوى الأداء الذى يتوقعه العملاء(Wao et al., 2016: 7).

ثالثاً: تحديات مرحلة التفكير الإبداعى والابتكارى: تهدف هذه المرحلة إلى تحفيز الأفكار نحو ايجاد طرقاً بديلة لأداء وظائف المنتج بغرض تحسين القيمة، وذلك عبر تطبيق آليات تساعد على دعم التفكير الجماعى وتوليد الأفكار البديلة كالعصف الذهنى (Alkhereibi, 2017: 21).

وتواجه المرحلة عدداً من التحديات أهمها:

- الافتقار إلى نظام إدارة قواعد بيانات Structured Database Management System يمكن من خلاله تخزين وإدارة وتجميع أفكار هندسة القيمة السابقة بشكل منهجى. حيث يتم الوصول إلى معظم البيانات من خلال قواعد بيانات غير منتظمة يصعب استردادها والاستفادة منها بكفاءة على الرغم من وصول فرق عمل هندسة القيمة إلى أفكار قيمة بشكل متكرر فى مشاريع مماثلة (Park et al., 2017: 700).
- نقص الخبراء والمهنيين المدربين فى مجال هندسة القيمة. فمرحلة التفكير الإبداعى والإبتكارى تتطلب اكتساب أعضاء فريق القيمة للعديد من السمات التى تساعد على الوصول إلى الأفكار الابداعية التى تكون المقترحات والبدائل والتى تقود إلى التخلص من التكاليف غير الضرورية. الأمر الذى يتطلب الالتحاق بدورات تدريبية متخصصة والسعى نحو اكتساب المعرفة فى ذلك المجال للحصول على فريق عمل مؤهل يوظف الإبداع والتحليل الوظيفى لتحقيق القيمة (Danso & Kwadwo, 2020: 16).
- فى بعض الحالات، تكون آليات التفكير الإبداعى التقليدية كالعصف الذهنى غير فعالة، حيث أنها تعتمد بصورة كبيرة على قدرة أعضاء فريق عمل هندسة القيمة فى جمع أكبر عدد ممكن من الأفكار المختلفة والذى اعتبر غير كافياً لتحسين قيمة وأداء ووظيفة المنتج (Yang et al., 2014: 356).

رابعاً: تحديات مرحلة التقييم: تهدف هذه المرحلة إلى تركيز الجهود الفكرية لتقديم البدائل المبتكرة لتخفيض تكلفة وظائف المنتج، حيث يتم تقديم قائمة مختصرة بمعظم الأفكار المحتملة لتحسين هذه الوظائف وتحقيقها فى ظل قيود التكلفة (Rad & Yamini, 2016: 267).

وتواجه هذه المرحلة عدداً من التحديات و الصعوبات من بينها (Dahooie et al., 2020: 1314; Wao, 2015: 3):

- معيار التقييم الذى يحدد أولويات التقييم هو معيار التكلفة فى المقام الأول دون إيلاء اهتمام بالقدر نفسه للمعايير الأخرى.
- تواجه عملية تقييم الحلول النهائية لهندسة القيمة عادةً حالة من عدم التأكد. ويرجع ذلك إلى صعوبة الوصول إلى معلومات كاملة ومفصلة حول تكلفة كل مكون من مكونات المنتج فى مرحلة التصميم، الأمر الذى قد يؤثر على عملية صنع القرار.
- استخدام المزايا والعيوب لترتيب البدائل وتقييمها قد يؤثر على الوصول إلى قرارات صائبة لأن ميزة أحد البدائل قد تكون عيباً في بديل آخر والعكس صحيح. الأمر الذى قد يؤدى إلى حساب مزدوج أو متعدد للمزايا ومن ثم أخطاء فى تقييم واختيار البديل الأمثل.
- تعتمد عملية التقييم لتحديد البديل الأفضل بشكل رئيسى على آراء أعضاء فريق هندسة القيمة، والتى قد لا تعتبر أساساً كافياً للتقييم والتوصل إلى البديل الذى يحقق أفضل النتائج.

خامساً: تحديات مرحلة التطوير: فى هذه المرحلة يتم إجراء مزيد من البحث لتطوير قائمة من الأفكار لاختيار أفضل بدائل تحسين القيمة، وذلك عبر مزيد من الدراسة والتقييم للأفكار والبدائل.

وتتطلب هذه المرحلة من قبل فريق عمل هندسة القيمة تطوير الأفكار والبدائل المقترحة لتحقيق هدف خفض التكلفة مع الحفاظ على الأداء الوظيفى، وهنا تظهر مجدداً التحديات المتعلقة بنقص الخبرة والمعرفة وصعوبة توافر المهنيين المدربين بهذا المجال. إضافةً إلى صعوبة تكريس الوقت والجهد اللازمين للوصول إلى أفضل المقترحات العملية والقابلة للتنفيذ، الأمر الذى قد يؤدى إلى نتائج غير مرضية (Danso & Kwadwo, 2020: 16; Kissi et al., 2016: 8).

فى ضوء ما سبق تتمحور تحديات تطبيق أسلوب هندسة القيمة حول كونها تعتمد بشكل رئيسى فى الوصول إلى الأفكار الإبداعية وعمليات تقييم البدائل المبتكرة التى تقود إلى التخلص من التكاليف غير الضرورية على آراء أعضاء فريق هندسة القيمة. بالإضافة إلى نقص الخبرة

والمعرفة وصعوبة توافر المهنيين المدربين لتقييم وتطوير الأفكار للوصول لأفضل بدائل تحسين القيمة. هذا فضلاً عن افتقار التطبيق إلى وجود نظم لإدارة قواعد البيانات يمكن من خلالها تخزين وإدارة وتجميع الأفكار السابقة لهندسة القيمة بشكل منهجى، وهو الأمر الذى يصعب معه التوصل إلى أفضل الأفكار والبدائل التى تحقق القيمة.

٣/٢ تحديات تطبيق مصفوفة نشر وظيفة الجودة QFD

يعد الهدف الرئيسى من تطبيق مصفوفة QFD هو توفير منهجية تنظر إلى احتياجات العملاء باعتبارها المحرك الرئيسى لعملية تصميم المنتج، بهدف دعم قرارات مرحلة التصميم عبر توفير معلومات واقعية ومحددة وقابلة للقياس لتلك الاحتياجات (Rodado, 2020: 3). وتعتبر "تخطيط المنتج" المرحلة الأهم بين مراحل تطبيق مصفوفة QFD[١] لكونها تحدد سمات المنتج التى تساهم فى تحقيق أولويات احتياجات العملاء ورغباتهم. وفى إطار مراجعة الأدب المحاسبى فيما يتعلق بتحديات تطبيق مصفوفة QFD يمكن عرض التحديات التى تواجه تطبيق مرحلة تخطيط المنتج، والتحديات التى تواجه تطبيق المصفوفة بشكل عام فيما يلى:

تعتمد **مرحلة تخطيط المنتج** على مصفوفة بيت الجودة HoQ التى تعبر عن أداة تصميم أساسية تهدف إلى الإصغاء إلى صوت العميل VOC[2] لتحديد احتياجاته وترجمتها إلى مجموعة من المتطلبات الفنية والخصائص الهندسية. حيث يتم تحديد خصائص المنتج ومستويات الأداء التى تساعد فى تحقيق احتياجات العملاء ورغباتهم، بهدف وضع معايير ضمان جودة المنتج بمرحلة التصميم فى ضوء هذه الاحتياجات، ومن ثم توجيه الجهد إلى تلك التى توفر أقصى قيمة لهم (Shaik, 2019: 46).

وبالرغم من أهمية المرحلة إلا أنها قد واجهت عدداً من التحديات من بينها:

- صعوبات تحديد الاحتياجات الحقيقية للعملاء، حيث تفترض مصفوفة بيت الجودة HoQ أن احتياجات العملاء ورغباتهم حتمية ومعروفة ولا تتغير بشكل كبير بمرور الوقت. ونظرًا لأن احتياجات العملاء على العكس من ذلك الافتراض وعادة ما تتسم بالتغير السريع وغير المتوقع، فإن تطبيق المصفوفة قد يؤدى إلى إنتاج منتجات لا تلبى الاحتياجات الحقيقية للعملاء

[١] لمزيد من التفاصيل حول مراحل تطبيق مصفوفة QFD وفقاً لمناهجها يمكن الرجوع إلى آية محمد سيد محمد، ٢٠٢٤: ٤٠-٤١

[2] *Voice of Customer.*

(Wolniak, 2018: 14). وفى ذات الشأن أضاف Lohrey (2017: 1) أنه على الرغم من أن استطلاعات الرأى هى واحدة من أهم الطرق التى يتم اعتمادها للحصول على معلومات مباشرة من العملاء، إلا أنها فى أغلب الأحيان لا تعكس الصورة الحقيقية لاحتياجات للعملاء ورغباتهم. الأمر الذى قد يجعل تحديد الأهمية النسبية لهذه الاحتياجات متحيزة وغير دقيقة ويؤدى إلى تخصيص غير ملائم للموارد والتكلفة.

- صعوبات فى التعامل مع الكم الكبير من بيانات احتياجات العملاء، ومن ثم صعوبة ترجمة هذه البيانات وتحويلها إلى متطلبات فنية قابلة للقياس، (Rodado et al., 2020: 4; Nawar et al., 2017: 73). وفى هذا الصدد أضاف كل من Ginting & Ishak (2020: 72) أن مصفوفة HoQ قد تجعل التكيف مع احتياجات العملاء أكثر تكلفة وصعوبة وتعقيداً، حيث تستغرق عملية تحديد احتياجات العملاء وتوثيقها وتلبيتها وقتاً طويلاً، وبمجرد بدء الإنتاج يكون من الصعب تغييرها.
- صعوبات تحديد العلاقات بين احتياجات العملاء والمتطلبات الفنية فى بعض الأحيان، وهنا يتم الاعتماد فى تحديد العلاقة على وجهات نظر صانعى القرار، الأمر الذى قد يخلق نوعاً من التحيز والتحديد غير الدقيق للأهداف (Rodado et al., 2020: 4). وقد أرجعت دراسة كلا من Dehe & Bamford (2017: 178) ذلك إلى افتراض مصفوفة HoQ أن هناك علاقات خطية بين متطلبات العميل وخصائص المنتج، وهو أمر مبسط للواقع إلى حد كبير.

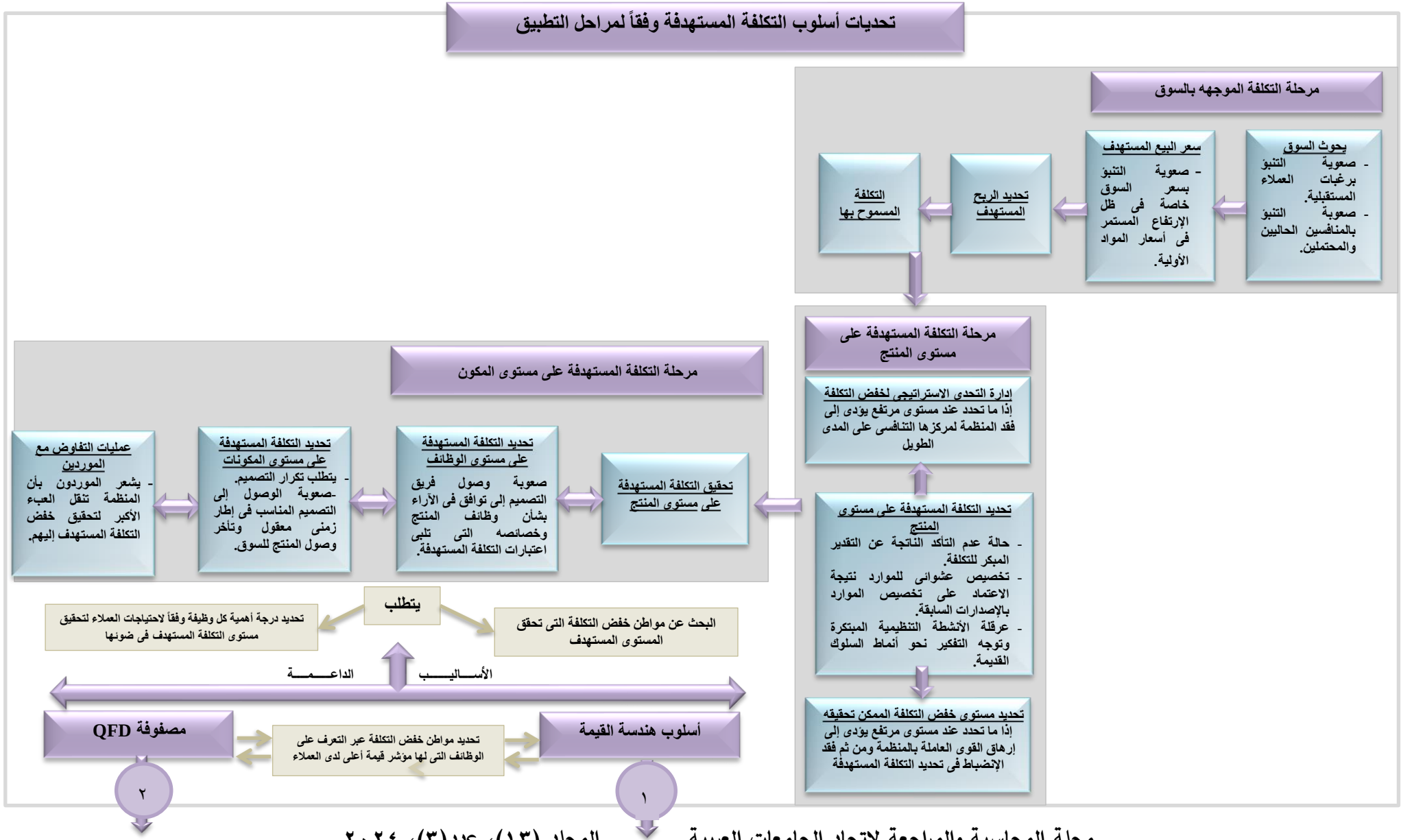
وبشكل عام يواجه تطبيق مصفوفة QFD العديد من تحديات التطبيق التى ساهمت فى توجيه بعض الانتقادات لها، من بينها ما يلى:

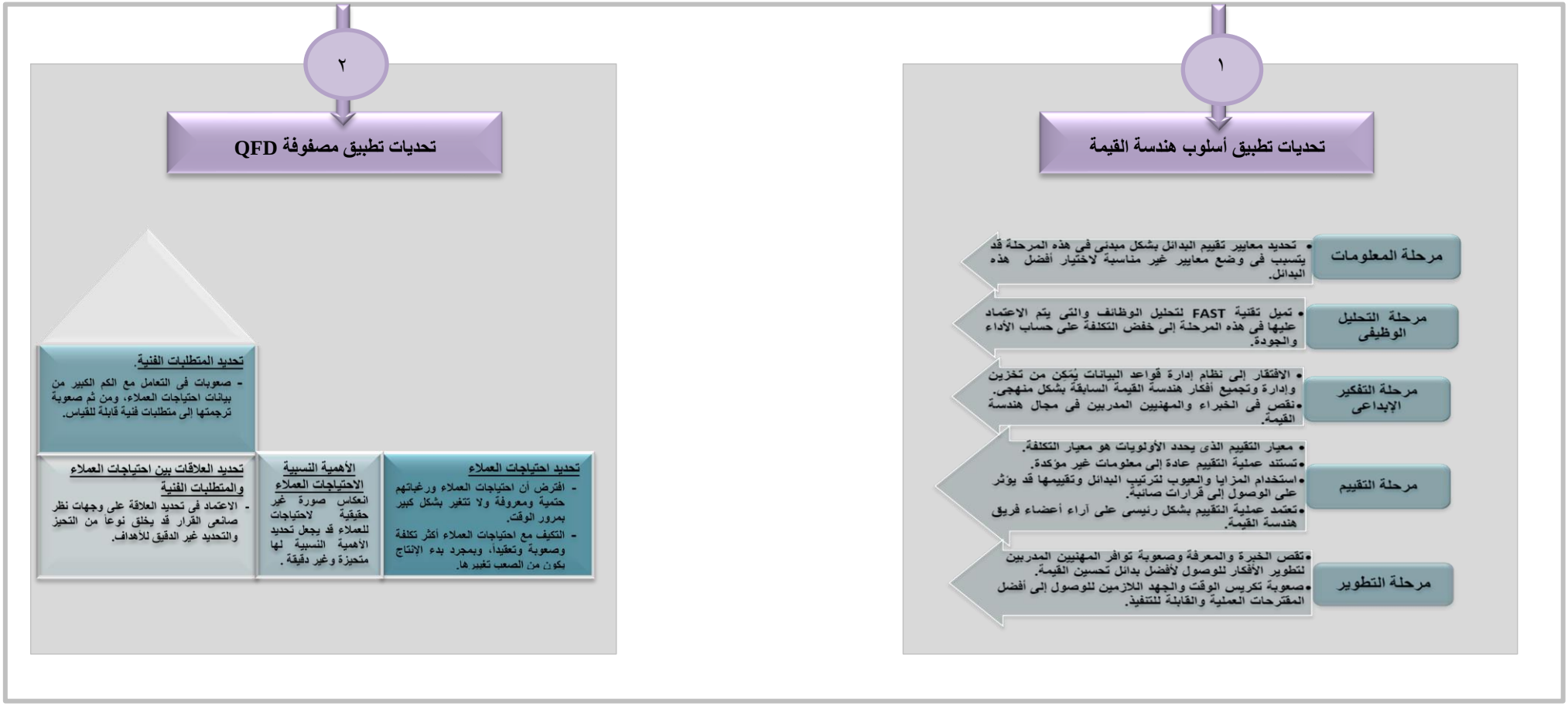
- تحتاج المنظمات – فى معظم الأحيان– قبل البدء فى تطبيق مصفوفة QFD إلى أن تخضع لعملية إعادة تنظيم كاملة Undergo a Complete Reorganization، حيث أن بيئة توظيف الجودة الفعالة تتطلب الابتكار والمبادرة والعمل الجماعى ومشاركة المعلومات. فى حين أن الهياكل التنظيمية التى لا توفر هذه البيئة غالباً ما تنظر إلى عمليات توظيف الجودة على أنها عمل إضافى بدلاً من كونها طريقة لتصميم منتج يتناسب واحتياجات العملاء(Lohrey, 2017: 1).
- يستغرق تطبيق مصفوفة QFD وقتًا طويلاً ويتطلب موارد بشرية متخصصة ومؤهلة وتمتلك خبرات عملية كافية، حيث يتطلب التطبيق إنشاء مصفوفات ضخمة ومعقدة، وجمع ومعالجة للعديد من

البيانات –ذات الطبيعة النوعية– من العملاء والمنافسين وصناع القرار (Ginting & Ishak, 2020: 72; Rodado et al., 2020: 4).

وفى إطار ما سبق، تتمحور تحديات تطبيق مصفوفة QFD حول افتراضها أن احتياجات العملاء ورغباتهم معروفة ولا تتغير بشكل كبير بمرور الوقت، هذا فضلاً عن افتراض وجود علاقات خطية بين تلك الاحتياجات وخصائص المنتج. بالإضافة إلى أنه عادة ما يصعب التعامل مع الكم الكبير من بيانات احتياجات العملاء، ومن ثم يصعب ترجمتها إلى متطلبات فنية قابلة للقياس، الأمر الذى قد يوثر سلباً على تلبية المنتج الذى يتم تصميمه لتوقعات هؤلاء العملاء.

وبناءً على العرض السابق وكما يوضح الشكل (٢-١)، أنه بالرغم من أهمية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم، إلا أنها تواجه العديد من التحديات عند التطبيق. ولعل معظم هذه التحديات ترجع إلى طبيعة مرحلة التصميم التى عادةً ما تواجه عملية صنع القرار بها حالة من عدم التأكد، هذا بالإضافة إلى افتقار هذه الأساليب إلى نهج لإدارة المعرفة ونقص الخبراء والمهنيين المدربين فى مختلف التخصصات المطلوبة لتطبيقها. ومن ثم كانت الحاجة ملحة لإيجاد نهج مناسب يساهم فى الحد من تلك التحديات، ومن هنا كان التوجه لإرساء منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم باستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى، وهو ما سيتم دراسته بالمبحث التالى.


تحديات أسلوب التكلفة المستهدفة وفقاً لمراحل التطبيق
مرحلة التكلفة الموجهه بالسوق
بحوث السوق
- صعوبة التنبؤ برغبات العملاء المستقبلية.
- صعوبة التنبؤ بالمنافسين الحاليين والمحتملين.
سعر البيع المستهدف
- صعوبة التنبؤ بسعر السوق خاصة فى ظل الإرتفاع المستمر فى أسعار المواد الأولية.
تحديد الربح المستهدف
التكلفة المسموح بها
مرحلة التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج
إدارة التحدى الاستراتيجى لخفض التكلفة
إذا ما تحدد عند مستوى مرتفع يؤدى إلى فقد المنظمة لمركزها التنافسى على المدى الطويل
تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج
- حالة عدم التأكد الناتجة عن التقدير المبكر للتكلفة.
- تخصيص عشوائى للموارد نتيجة الاعتماد على تخصيص الموارد بالإصدارات السابقة.
- عرقلة الأنشطة التنظيمية المبتكرة وتوجه التفكير نحو أنماط السلوك القديمة.
تحديد مستوى خفض التكلفة الممكن تحقيقه
إذا ما تحدد عند مستوى مرتفع يؤدى إلى إرهاق القوى العاملة بالمنظمة ومن ثم فقد الإنضباط فى تحديد التكلفة المستهدفة
مرحلة التكلفة المستهدفة على مستوى المكون
تحقيق التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج
تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى الوظائف
صعوبة وصول فريق التصميم إلى توافق فى الآراء بشأن وظائف المنتج وخصائصه التى تلبى اعتبارات التكلفة المستهدفة.
تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المكونات
- يتطلب تكرار التصميم.
-صعوبة الوصول إلى التصميم المناسب فى إطار زمنى معقول وتأخر وصول المنتج للسوق.
عمليات التفاوض مع الموردين
- يشعر الموردون بأن المنظمة تنقل العبء الأكبر لتحقيق خفض التكلفة المستهدف إليهم.
يتطلب
تحديد درجة أهمية كل وظيفة وفقاً لاحتياجات العملاء لتحقيق مستوى التكلفة المستهدف فى ضوئها
البحث عن مواطن خفض التكلفة التى تحقق المستوى المستهدف
الأساليب
الداعمة
أسلوب هندسة القيمة
تحديد مواطن خفض التكلفة عبر التعرف على الوظائف التى لها مؤشر قيمة أعلى لدى العملاء
مصفوفة QFD
١
٢



شكل رقم (٢-١)

تحديات تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم

(المصدر: إعداد الباحثون)

المبحث الثالث

منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم باستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى

تمهيد

ظهرت تكنولوجيا التوأم الرقمى Digital Twin كأحدث النماذج الافتراضية التى تسمح للمنظمات بالحصول على بصمة رقمية كاملة للمنتج المادى منذ بداية مرحلة التصميم والتطوير حتى نهاية دورة حياته، وذلك عبر بناء نموذج افتراضى مماثل للمنتج المادى يحقق رؤية متعمقة له فى الوقت الفعلى عبر تحقيق التزامن الرقمى / المادى digital / physical synchronization من خلال مراقبة رقمية عن بُعد له Remote monitoring وتتبع فورى وديناميكى لأدائه على مدار دورة حياته عبر مستشعرات ملحقة به (Rasheed et al., 2020: 21982; Tao et al., 2018: 5). وفى إطار ذلك اعتبر التوأم الرقمى داعماً لتصميم الجيل التالى من المنتج المادى، حيث يوفر قاعدة معرفية تتوسع باستمرار يمكن من خلالها إجراء عمليات محاكاة مفصلة لأداء هذا المنتج فى ظل مختلف ظروف الاستخدام وفى ضوء معيار لتقدير تكلفة كل مكون من مكوناته وبدائلها[١] (He & Bai, 2021: 2-3; Siemens, 2020: 1; Tao et al., 2018: 5)

وفى إطار ذلك، يهدف هذا المبحث إلى إرساء منظومة مقترحة تعتمد على مراجعة واستعراض وتحليل آراء الباحثين لدراسة تأثير تكنولوجيا التوأم الرقمى على أساليب الإدارة الإستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم بهدف تحسين فعاليتها فى ضوء التكامل بينها. وحيث أن الفعالية هى القدرة على تحقيق الأهداف المرجوة، فسيتم وضع منهجية عمل للمنظومة المقترحة تقوم على التعرف على دور تكنولوجيا التوأم الرقمى فى تحقيق أهداف كل مرحلة من مراحل تطبيق تلك الأساليب والحد من التحديات التى تواجهها، وهو ما يتضح تفصيلاً فيما يلى:

[١] لمزيد من التفاصيل حول تكنولوجيا التوأم الرقمى يمكن الرجوع إلى آية محمد سيد محمد، ٢٠٢٤: ٦١-٧٧؛ Tao et al., 2018: 12- 14

١/٣ التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج فى ظل تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى[١]

يتم **تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج** من خلال تحديد الفرق بين التكلفة الجارية ومستوى خفض التكلفة القابل للتحقق. وفى هذا الصدد، توفر تكنولوجيا التوأم الرقمى للمصمم نهجاً لاستخدام المعرفة المتعلقة بتكلفة دورة الحياة الإجمالية للجيل الأخير من المنتج لتقدير تكلفة الجيل التالى من ذلك المنتج (Erkoyuncu et al., 2020: 146; Farsi et al., 2021: 509). فالتوأم الرقمى اعتبر نموذجاً مرجعياً لبناء المعرفة من خلال التشغيل البينى ودمج العالمين المادى والافتراضى وإنشاء دورة تكرارية من الاتصال والتحكم تساهم فى متابعة التغير الديناميكى للمنتج من ناحية، وتحقيق التراكم المستمر للمعرفة والانتقال التلقائى لها من ناحية أخرى. ومن ثم توفير أداة أكثر مرونة لتقدير تكلفة الجيل التالى من المنتج عبر محاكاة تكلفة الجيل الأخير فى ضوء تتبع التغيرات التى أجريت عليه طوال دورة حياته. بالإضافة إلى دور التوأم الرقمى فى توضيح الأسباب الجذرية Root-causes لحدوث التكلفة للبحث عن العامل الذى سمح أو تسبب فى حدوثها وتحليله، وإنشاء نماذج تكلفة دقيقة محدثة باستمرار من وقت لآخر يتم الاعتماد عليها عند تقدير تكلفة الجيل التالى –تعرف هذه الطريقة بتقدير التكلفة التكيفى Adaptive Cost Estimation–(Farsi et al., 2021: 506- 507; Wang et al., 2021b: 2).

وفى ضوء ذلك يتضح للباحثين أن تحديد التكلفة المستهدفة للمنتج فى إطار المنظومة المقترحة قد يساهم فى تحسين قدرة المصممين على تحديد مستوى خفض التكلفة الذى يمكن تحقيقه فى ضوء القدرات الحالية للمنظمة. وذلك عبر امكانية تحديد التكلفة التى يمكن أن تتكبدها المنظمة طوال دورة حياة المنتج فى ضوء مختلف العوامل التى قد تتسبب فى حدوث التكلفة وإدارتها. وكذلك السماح للمصمم بالتعرف على فرص خفض التكلفة الممكنة لإدارة التحدى الاستراتيجى فى ضوء الواقع الفعلى، ومن ثم دعم المركز التنافسى للمنظمة على المدى الطويل. وعلى ذلك قد يساعد العمل فى إطار المنظومة المقترحة على تخفيض حالة عدم التأكد فيما يتعلق بالمعلومات التكاليفية فى مرحلة التصميم، وبالتالى تخصيص أكثر كفاءة للموارد.

وفى الخطوة التالية، تأتى مهمة تحقيق التكلفة المستهدفة للمنتج التى تم تحديدها، ويتطلب هذا الأمر محاولة كل من فريق التصميم والموردين إجراء عدداً من تكرارات التصميم للوصول إلى

[١] تبدأ دراسة اقتراح المنظومة من المرحلة الثانية لتطبيق التكلفة المستهدفة باعتبارها المرحلة التى يتم خلالها نقل ضغوط التكلفة التنافسية والمتمثلة فى التكلفة المسموح بها إلى المصممين لتبدأ مهمتهم فى تحديد امكانيات خفض التكلفة. ومن ثم تكون هى نقطة البداية لدراسة تأثير العمل فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى.

توافق حول إحداث تخفيضات متزايدة فى تكلفة المكونات، والتخلص من غير الضرورى منها فى إطار الحفاظ على جودة المنتج وأدائه الوظيفى (Pazarceviren & Celayir, 2013: 6; Lima et al., 2016: 17). وفى إطار المنظومة المقترحة يسهل التوأم الرقمى التعاون بين فريق التصميم والموردين ودعم التوصل إلى توافق حول ميزات وخصائص المنتج التى تحقق التكلفة المستهدفة على مستوى المكون. ويرجع ذلك إلى ما أوضحته ورقة العمل الصادرة عن DHL Trend Research (2020: 9) حول دور التوأم الرقمى فى دعم عمليات التفاوض مع الموردين فى ضوء نموذج افتراضى عالى الدقة للجيل الأخير من المنتج يصور ويحاكى أداء وظائفه ومكوناته وتكلفة كل مكون خلال مراحل دورة حياته، ومن ثم التوصل إلى تصميم نهائى للمنتج يلبى اعتبارات التكلفة المستهدفة على مستوى المكون بسهولة من ناحية ويخفض زمن دورات التصميم بشكل كبير لتفادى تأخر وصول المنتج للسوق من ناحية أخرى (Qi et al., 2018: 241; Morandotti & Pelosi, 2018: 10).

ولتحقيق التكلفة المستهدفة للمنتج، فإن الأمر يتطلب إجراء التكامل مع أسلوبى هندسة القيمة ومصفوفة QFD –وهو ما سبق توضيحه بالمبحث الثانى من هذا البحث–.

٢/٣ هندسة القيمة فى ظل تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى

يمر تطبيق أسلوب هندسة القيمة بعدة مراحل–كما سبق التوضيح بالمبحث الثانى، ويهتم البحث فى هذا الجزء ببيان كيفية تأثير التوأم الرقمى على الهدف الذى تسعى كل مرحلة من هذه المراحل لتحقيقه، ومناقشة انعكاس ذلك على فعاليتها فى تحقيق التكلفة المستهدفة، ودور ذلك فى الحد من تحديات التطبيق.

أولاً: أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على مرحلة المعلومات: فى هذه المرحلة يجمع فريق دراسة القيمة معلومات كاملة ومحددة حول خصائص المنتج ومتطلبات أدائه. ويدعم تطبيق التوأم الرقمى هذه المرحلة من خلال **توفير نموذج معلومات افتراضى يحقق إدراكاً متكاملاً Integrated perception للمنتج ومكوناته طوال دورة الحياة ليمثل أساساً لدمج المعرفة عند تصميم الجيل التالى** حيث يسمح بإنشاء نموذج معلومات متكامل يضم وصفاً متزامناً للمنتج المادى ومكوناته ويتضمن وحدات معلومات Information units توضح سلسلة من خصائص المنتج التى تم تشكيلها خلال كافة مراحله من ناحية، بالإضافة إلى تقديم توصيات بشأن التحسينات المستقبلية من ناحية أخرى. ولذلك اعتبر التوأم الرقمى بمثابة خبير رقمى يمكنه دعم

التطور المستمر عبر القدرات المعرفية والدلالية التى تحقق انعكاساً لمتطلبات تصميم الجيل التالى من ذلك المنتج (Abburu et al., 2020: 26; Wang et al., 2021a: 363).

وفى إطار ما سبق يمكن القول أن المنظومة المقترحة تدعم تحقيق الهدف من مرحلة المعلومات من خلال تقديم فهم شامل للمنتج قيد الدراسة عبر مراجعة متعمقة للمعرفة ذات الصلة.

ثانياً: أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على مرحلة تحليل الوظيفة: تسعى هذه المرحلة نحو تحديد الوظائف وتصنيفها وتوضيح العلاقة بينها من حيث الأداء والتكلفة لايجاد أفضل البدائل التى تحقق إما خفضاً للتكلفة أو تحسيناً للأداء (Selim et al., 2017: 370). ويدعم تطبيق التوأم الرقمى هذه المرحلة من خلال **توفير وصف منهجى للوظائف وتقديم توصية وظيفية Function Recommendation قائمة على البيانات.** ففى ظل عصر البيانات الضخمة، ازدادت البيانات التى يمكن أخذها فى الاعتبار عند صياغة الوظائف بشكل كبير. ويوفر التوأم الرقمى وصف منهجى للوظائف، حيث يشتمل على تجسيد وظيفى شامل للمنتج يسمح للمصممين بتحليل مخرجاته عبر النمذجة الوظيفية Function Modeling، وهو تمثيلاً منظماً للوظائف يدعم تحليلها إلى الأجزاء المكونة لها من خلال تحليل الإثراء التدريجى للمعرفة المتعلقة بالوظيفة. واستنادًا إلى نتائج هذا التحليل يمكن للمصممين تحليل دور مكون معين فى أداء كل وظيفة وتوضيح التفاعلات فيما بينهم، وبناء على ذلك يمكن التعبير عن تأثير كل وظيفة على الأداء ومن ثم التعرف على قيمتها. كما يضمن التوأم الرقمى أن يتم تطبيق النموذج الوظيفى فى ظل نموذج توقع التكلفة، ومن ثم تقديم توصية وظيفية منهجية لدعم تخطيط الوظائف فى إطار كل من الأداء والتكلفة (Wu et al., 2021a: 4-5; Wu et al, 2021b: 86).

مما سبق يمكن القول أن المنظومة المقترحة قد تساهم فى خفض حدة الانتقادات التى توجه إلى هذه المرحلة، ففى ظل المنظومة المقترحة يوفر التوأم الرقمى طريقة فعالة لنمذجة الوظائف وتحليلها إلى الأجزاء المكونة لها فى ظل تقدير تكلفة كل مكون. ومن ثم توضيح العلاقات التى تربط الوظائف بعضها البعض وتقييمها من حيث الأداء والتكلفة، وبالتالى مساعدة فريق القيمة لتركيز التفكير الإبداعى على الوظائف المضيفة للقيمة بشكل موضوعى.

ثالثاً: أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على مرحلة التفكير الإبداعى والابتكارى: خلال هذه المرحلة يوجه أعضاء الفريق جهودهم الإبداعية نحو تطوير مجموعة متنوعة من البدائل لأداء الوظائف المطلوبة بهدف تحسين القيمة، وفى ظل تطبيق المنظومة المقترحة يمكن أن يتحقق ما يلى:

- **يساهم التوأم الرقمى فى إيجاد فرص جديدة للتوصل إلى أفكار إبداعية لتحسين القيمة من خلال التغذية العكسية ذات الحلقة المغلقة لدورة حياة الجيل الأخير من المنتج:** حددت دراسة Yang وأخرون (2018: 279) ثلاثة عوامل رئيسية لدعم فرص خلق القيمة من بينها: مراقبة المنتج خلال مراحل دورة حياته، وتحديد أنماط القيمة التى لم يتم استغلالها، ومن ثم توفير المزيد من فرص خلق القيمة ودعم الابتكار. ويساهم التوأم الرقمى فى تحقيق تلك المراقبة، حيث اعتبر مركز بيانات لدورة حياة المنتج Data center of the product lifecycle والذى يوفر دمجاً للبيانات الضخمة الناتجة عن تتبع أداء المنتج ووظائفه على مدار دورة الحياة ونتائج محاكاتها مع البيانات التاريخية فى منصة واحدة، كما تتيح معالجة تدفق تلك البيانات وتحليلها فى الوقت الفعلى بدقة عالية (Detzner & Eigner, 2018: 1553; Habe et al., 2019: 15). ومن ثم توفير تغذية عكسية لمصممى الجيل التالى حول أداء المنتج خلال مراحل دورة الحياة بشكل واضح وتقديم توصيات ورؤى مستقبلية قابلة للتنفيذ (Xia et al., 2021: 11).

- **توفير امكانية إجراء تحليلات تنبؤية تقدم اقتراحات تصميمية لتوجيه الجهود والأفكار نحو إيجاد أفضل بدائل تحسين القيمة:** يساهم التوأم الرقمى بحكم مفهومه فى إتاحة الفرص للتعرف بدقة على التغير الذى يحدث على أداء المنتج المادى باستمرار، مما يخلق السياق المطلوب لإجراء تحليلات تنبؤية منها "تحليل أعطال المنتج Product failure analysis"، وهو تحليل يتم فى مرحلة التصميم يهدف إلى التنبؤ بالحالات المحتملة للأعطال المستقبلية لمكونات المنتج قيد التصميم بناءً على بيانات الأعطال التاريخية فى العالم الافتراضى وترتيبها حسب الأولوية للقضاء عليها قبل البدء فى الإنتاج. حيث يساهم التحليل فى تزويد المصممين بمنهجية لتحليل الأسباب التى قد تؤدى إلى إخفاق المنتج فى أداء وظائفه المطلوبة ومن ثم اتخاذ تدابير لتفادى حدوثها(Wang et al., 2021a: 374).

وفى ضوء ما سبق يستنتج الباحثون أن المنظومة المقترحة تساهم فى الحد من الافتقار إلى قواعد ونقص الخبراء والمهنيين المدربين فى مجال هندسة القيمة. فالتوأم الرقمى يوفر استراتيجية ممنهجة لإدارة بيانات التغذية العكسية من الجيل الأخير من المنتج خلال دورة حياته تساعد على استرداد الأفكار الابداعية والابتكارية السابقة والاستفادة منها خلال تصميم الجيل التالى. كما تساعد أيضاً على الوصول إلى أفكار ابداعية جديدة عبر تقديم اقتراحات تصميمية بشكل استباقى بناءً على إجراء فحص مستمر لحالات الاخفاق الفعلى وتقييمها، ومن ثم توجيه الجهود نحو إيجاد أفضل البدائل التى تؤدى إلى تحسين قيمة المنتج.

رابعاً: أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على مرحلة التقييم: تهدف هذه المرحلة إلى تقييم أفكار وبدائل تحسين القيمة، تمهيداً لاختيار البديل الأفضل. ويدعم تطبيق المنظومة المقترحة عملية **تقييم الحلول النهائية لهندسة القيمة، حيث تتم فى ضوء محاكاة مفصلة لجميع السيناريوهات الممكنة لبدائل تصميم الجيل التالى من المنتج عبر نموذج وصفى وديناميكى دقيق لأداء الجيل الأخير.** فتقييم بدائل التصميم فى تلك المرحلة المبكرة هى عملية صنع قرار متعدد المعايير A Multi-Criteria Decision Making تنطوى على العديد من العوامل المعقدة. وفى ظل الأطر التقليدية للتقييم، يعتمد تحديد وزن المعيار والتفضيل بين البدائل على الأحكام الذاتية والتوصيفات النوعية من قبل الخبراء بشكل كبير. ومن ثم غالباً ما تكون النتائج غير فعالة ولا تتسم بالدقة الكافية (Zhang et al., 2017: 52). وقد أكدت الدراسات (Siemens, 2020: 4; Shikata et al., 2019: 18) أنه بتطبيق التوأم الرقمى تتوافر امكانية تقييم البدائل عبر محاكاة أكثر تقدماً ينخفض فيها التباين بين العالم المادى والافتراضى. حيث يوفر التوأم الرقمى منصة رقمية تتيح صورة ديناميكية متزامنة للجيل الأخير من المنتج من خلال تدفق بيانات خاصة بأداء أجزائه ومكوناته بمرحلة الاستخدام، ومن ثم توضيح الأجزاء والمكونات التى يتم استبدالها والعلاقات التى تربط هذه المكونات. ومن خلال "سيناريوهات ماذا لو What-If Scenarios" يتم إجراء محاكاة مفصلة لجميع السيناريوهات الممكنة لبدائل تصميم الجيل التالى المبتكرة ومقارنتها، وبالتالى تقييم الحلول النهائية لهندسة القيمة فى ظل مختلف الظروف المتوقعة.

وبناء على ذلك يستنتج الباحثون أن المنظومة المقترحة تساهم فى تقليص التحديات المتعلقة بحالة عدم التأكد والتى تُصعب الوصول إلى قرارات صائبة فيما يتعلق بتقييم الحلول النهائية لهندسة القيمة. ففى ظل المنظومة المقترحة تتوافر امكانيات متقدمة لتقييم البدائل عبر إجراء محاكاة مفصلة لكافة السيناريوهات المبتكرة والابداعية لبدائل تصميم الجيل التالى من حيث الأداء والتكلفة فى إطار مثيل افتراضى يرصد الأداء باستمرار فى الوقت الفعلى، الأمر الذى يوفر أساساً موضوعياً للتقييم يضمن الوصول إلى التكلفة المستهدفة مع الحفاظ على القيمة.

٣/٣ مصفوفة QFD فى ظل تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى

تسعى مصفوفة QFD إلى تحسين جودة المنتج من خلال فهم احتياجات العملاء ودمج أصواتهم فى عملية التصميم، ويعتمد ذلك على الركيزة الأساسية لتحديد تلك الاحتياجات وهى مصفوفة بيت الجودة HoQ –المرحلة الأولى من مراحل تطبيق QFD – والتى تحقق مساراً منهجياً لنشر الجودة بطريقة نظامية ووضع معايير ضمان لتحقيقها (Erdil & Arani, 2019:

(148. وفى إطار ذلك يهتم هذا الجزء بمراجعة ماورد فى الأدب المحاسبى بهدف دراسة أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على مصفوفة QFD، وذلك من خلال عرض الخطوات الثلاث الأولى لبناء HoQ والمتمثلة فى تحديد احتياجات العملاء وتحديد المتطلبات الفنية، وتحديد العلاقة بينهما.

أولاً: أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على تحديد احتياجات العملاء: يعد الفهم الشامل والدقيق لاحتياجات العملاء أساس تصميم منتج عالى الجودة، إلا أنه غالباً ما يصعب فهم هذه الاحتياجات بشكل كامل. ويدعم تطبيق التوأم الرقمى **توفير امكانية إعادة استخدام المعرفة Reuse knowledge فى تحديد الاحتياجات الضمنية للعملاء عبر المحتوى الذى ينشئه تتبع ومراقبة أداء المنتج بمرحلة الاستخدام:** يسمح التوأم الرقمى من خلال قدرات التعرف على السياق Context recognition capabilities الذى يعمل فيه المنتج أثناء الاستخدام بتحديد الاحتياجات الضمنية للعملاء. حيث يساهم التوأم الرقمى فى توفير نظرة ثاقبة لتفاعل العملاء مع المنتج ومن ثم دعم الحلول القائمة على المعرفة فى تحديد احتياجاتهم والعمل بشكل استباقى نحو تلبيتها بصورة أكثر ملاءمة فى المستقبل وتوفير فرصاً لتخفيض التكلفة المتعلقة بإدارة التغير فى تلك الاحتياجات (Lim et al., 2020: 6; Voell et al., 2018: 238; Schleich et al., 2019: 9). كما يساعد التوأم الرقمى على تقييم أهمية احتياجات العملاء عبر اكتشاف اتجاه احتياجاتهم المشتركة بناءً على البيانات التى تم جمعها حول المنتج خلال مرحلة استخدامه ومراقبة التفاعل المستمر بين العملاء والمنتج (Zhang et al., 2020: 18).

مما سبق، يمكن القول أن المنظومة المقترحة توفر دعماً لتحديد احتياجات العملاء فى ضوء الطبيعة الديناميكية لتطور هذه الاحتياجات، ومن ثم الوصول إلى فهم عميق حولها. كما يساهم التوأم الرقمى فى دعم تحديد الأهمية النسبية لاحتياجات العملاء عبر امكانيات التعرف على الاحتياجات الفردية إضافةً إلى الاحتياجات المشتركة، الأمر الذى قد يجعل تحديد الأهمية النسبية لهذه الاحتياجات يتم بصورة محايدة وبشكل أكثر ملاءمة.

ثانياً: أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على تحديد المتطلبات الفنية: يشير تحديد المتطلبات الفنية إلى التعرف على الخصائص الهندسية للتصميم التى تحدد كيفية الاستجابة لاحتياجات العملاء. ويتم تحليل العلاقة بين المتطلبات الفنية وفحص كيفية تأثير كل متطلب من هذه المتطلبات على بعضها البعض، لتجنب التعارض فيما بينها –عندما يتطلب التصميم توافر خاصيتين متعارضتين لغرضين مختلفين– والذى قد يؤثر على الأداء بأكمله (Darmawan et al.,

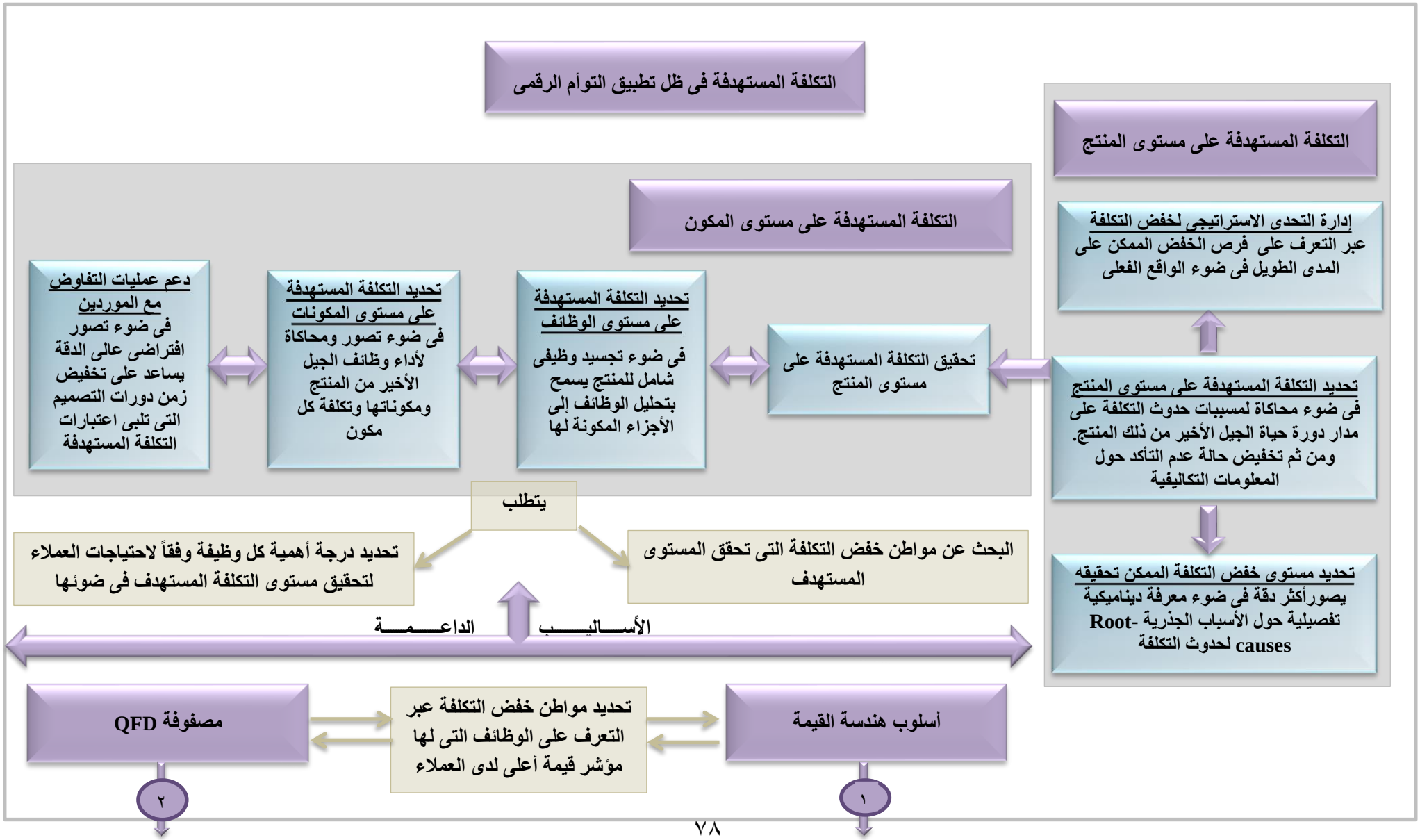
(2017: 607). وبتطبيق التوأم الرقمى **تتحسن القدرة على تحليل العلاقة بين المتطلبات الفنية واكتشاف طبيعة وحدة التعارض بين هذه المتطلبات بعضها البعض ومن ثم إدارته:** ففى ظل التوأم الرقمى يتمكن المصممون من تحليل ومعالجة البيانات المتعلقة بالعادات المختلفة لاستخدام المنتج فى بيئات مختلفة، حيث تتوافر بيانات عن أداء كافة مكونات المنتج ووصف لخصائصها وعلاقاتها التفاعلية مع توضيح نوع ودرجة هذه التفاعلات. وتعتبر تلك البيانات أساساً مباشراً لتحسين دقة توجيه المتطلبات الفنية. كما يستطيع المصممون من خلال التوأم الرقمى تحديد مواطن التعارض الممكنة بين المتطلبات الفنية وماهيتها مع خفض الفترة الزمنية والجهد المبذول المستغرق فى اتمام هذه العملية، وذلك عبر قدرات المحاكاة المتطورة لدورة حياة الجيل الأخير من المنتج وتحليل نتائجها. الأمر الذى يُمّكن المصممين من الحصول على أدلة فعالة للحكم على درجة ذلك التعارض وحدته ومن ثم إدارته (Wang et al., 2020: 718).

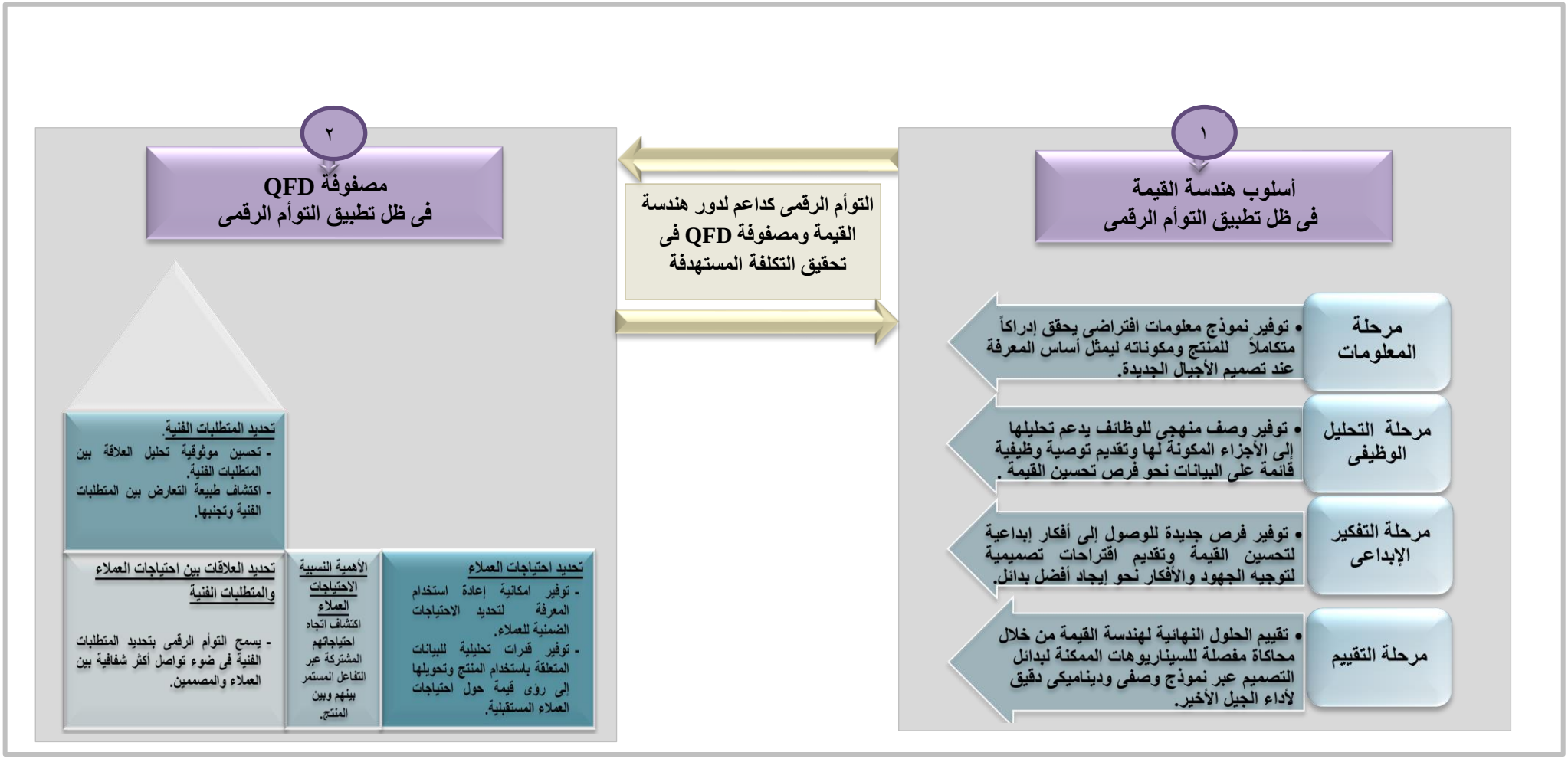
وبناء على ذلك يتضح أن المنظومة المقترحة تحد من التحديات التى تواجه هذه المرحلة والمتعلقة بصعوبة تحويل احتياجات العملاء إلى متطلبات فنية قابلة للقياس. فالتوأم الرقمى يوفر للمصممين نماذج افتراضية تعكس صورة ديناميكية مرئية للمنتج تساعد على تحليل العلاقة بين المتطلبات الفنية واكتشاف طبيعة التعارض بينها –إن وجد– فى أقل وقت ممكن وبأقل جهد. الأمر الذى يساهم فى التوصل إلى تصور واضح حول المتطلبات الفنية لتصميم الجيل التالى من هذا المنتج.

ثالثاً: أثر تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على تحديد العلاقات بين احتياجات العملاء والمتطلبات الفنية: فى هذه الخطوة يتم تقييم العلاقة بين احتياجات العملاء والمتطلبات الفنية عبر إنشاء مصفوفة العلاقات والتى تهدف إلى التعرف على مدى تلبية كل متطلب لاحتياجات العملاء(Lapinskiene & Martinaitis, 2017: 464). إلا أن التحدى الذى يواجه هذه الخطوة هو الاعتماد على التقييمات الذاتية من قبل المصممين (Ghosh et al., 2017: 2). وفى ظل تطبيق التوأم الرقمى يتم **تحديد المتطلبات الفنية فى ضوء تواصل أكثر شفافية بين العملاء والمصممين:** فمن خلال تحليلات بيانات التغذية العكسية الموجهه بالعملاء، يساهم التوأم الرقمى فى التحقق مما إذا كان مخطط تصميم الجيل الأخير قد وفى بالمتطلبات التى تلبى احتياجاتهم، وذلك بناء على أنماط استخدام المنتج وإجراء اختبار شامل للأداء. حيث يتمكن المصممون من ثم تحديد متطلبات التصميم مسبقاً بناءً على بيانات تفاعل العملاء مع المنتج ومحاكاة أدائه فى ظل مختلف بيئات العمل المتوقعة. وفى ضوء ذلك يقدم التوأم الرقمى توصيات للمصممين بالمتطلبات المناسبة لإنشاء توافق أفضل مع احتياجات العملاء. الأمر الذى يساعد على تخفيض التحيز

الناتج عن الاعتماد المتزايد على خبرة المصمم فى تحديد تلك المتطلبات (Qi & Tao, 2018: 3592; Ghosh et al., 2017: 7).

وبناءً على ما سبق وبعد إجراء مسح للأدب المحاسبى استهدف إرساء منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم المنتج، يمكن عرض هذه المنظومة من خلال الشكل رقم (٣-١).


التكلفة المستهدفة فى ظل تطبيق التوأم الرقمى
التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج
إدارة التحدى الاستراتيجى لخفض التكلفة
عبر التعرف على فرص الخفض الممكن على المدى الطويل فى ضوء الواقع الفعلى
التكلفة المستهدفة على مستوى المكون
تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج
فى ضوء محاكاة لمسببات حدوث التكلفة على مدار دورة حياة الجيل الأخير من ذلك المنتج. ومن ثم تخفيض حالة عدم التأكد حول المعلومات التكاليفية
تحقيق التكلفة المستهدفة على مستوى المنتج
تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى الوظائف
فى ضوء تجسيد وظيفى شامل للمنتج يسمح بتحليل الوظائف إلى الأجزاء المكونة لها
تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى المكونات
فى ضوء تصور ومحاكاة لأداء وظائف الجيل الأخير من المنتج ومكوناتها وتكلفة كل مكون
دعم عمليات التفاوض مع الموردين
فى ضوء تصور افتراضى عالى الدقة يساعد على تخفيض زمن دورات التصميم التى تلبى اعتبارات التكلفة المستهدفة
تحديد مستوى خفض التكلفة الممكن تحقيقه
يصورأكثر دقة فى ضوء معرفة ديناميكية تفصيلية حول الأسباب الجذرية Root- causes لحدوث التكلفة
يتطلب
البحث عن مواطن خفض التكلفة التى تحقق المستوى المستهدف
تحديد درجة أهمية كل وظيفة وفقاً لاحتياجات العملاء لتحقيق مستوى التكلفة المستهدف فى ضوئها
الأســـاليـــــب
الداعـــمـــة
أسلوب هندسة القيمة
تحديد مواطن خفض التكلفة عبر التعرف على الوظائف التى لها مؤشر قيمة أعلى لدى العملاء
مصفوفة QFD
١
٢



شكل رقم (٣-١)

منظومة مقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم

(المصدر: إعداد الباحثون)

المبحث الرابع

تطبيق المنظومة المقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم على إحدى شركات قطاع صناعة السيارات

تمهيد

يهدف هذا المبحث إلى تطبيق المنظومة المقترحة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم على إحدى شركات قطاع صناعة السيارات باعتبارها واحدة من الصناعات الرئيسية التى تشهد تطوراً مستمراً فى مجالى التصميم والتصنيع بسبب مواكبتها المتزايدة لمستويات متقدمة من التطور التكنولوجى، وهو ما يتناسب مع طبيعة الدراسة. وقد تم التطبيق على إحدى الشركات اليابانية[١] التى لها حضوراً قوياً فى سوق السيارات العالمى، حيث تقوم بتصنيع السيارات فى حوالى٢٠ سوقاً، وتقدم منتجاتها فى أكثر من ١٦٠ دولة حول العالم.

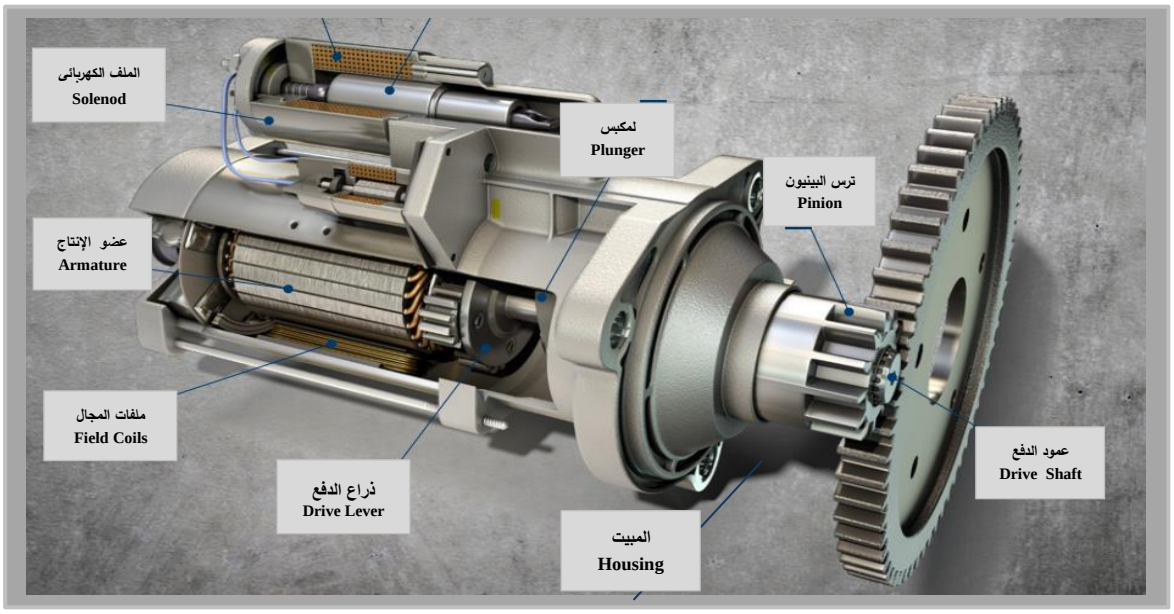
وفى أولى المقابلات الشخصية التى أجريت بالشركة محل الدراسة، أفاد أحد مديرى التصميم أن الشركة تقوم بتطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة التصميم، واقترح اعتبار محرك بدء التشغيل Starter Motor[٢] المنتج الذى يتم التطبيق من خلاله. ويعبر محرك بدء التشغيل عن محرك كهربائى قوى يعمل على إمداد محرك السيارة Engine بالطاقة اللازمة لبدء التشغيل. وكما هو موضح بالشكل رقم (٤-١) يتكون هذا المحرك من عدة مكونات أساسية لكل منها وظيفة محددة[٣] تتمثل فيما يلى الملف الكهربائى Solenoid- عضو الإنتاج Armature - ملف المجال Field Coil - ترس البينيون Pinion - عمود الدفع Drive Shaft - ذراع الدفع Drive lever - المكبس Plunger - مبيت أمامى وخلفى Front & Rear Housing. (Zhejiang Songtian Automotive Motor, 2023: 1).

[١] لم يتم الإفصاح عن هوية الشركة محل الدراسة بناء على رغبة مجلس الإدارة.

[٢] تتطلب طبيعة الدراسة اعتبار أحد أجزاء السيارة هو المنتج الذى تتم إجراء الدراسة عليه، حيث يتطلب التعرف على مكونات ذلك المنتج وتكلفة كل مكون وبدائل هذه المكونات وتقييمها للتعرف على البديل الأفضل. وهو الأمر الذى يصعب تطبيقه على السيارة بأكملها حيث يعتبر منتج يتسم بالتعقيد، كونه يتألف من عدد كبير من الأجزاء التى تشملها الأنظمة الميكانيكية والأنظمة الكهربائية وأنظمة القيادة والتوجيه. وفى إطار ذلك رشحت الشركة محل الدراسة محرك بدء التشغيل لهذا الشأن.

[٣] لمزيد من التفاصيل حول تعريف كل مكون من مكونات محرك بدء التشغيل ووظائفه يمكن الرجوع إلى آية محمد سيد محمد، ٢٠٢٤: ١٢٢- ١٢٣؛ Zhejiang Songtian Automotive Motor, 2023: 1.

وفى إطار ذلك، تم دراسة الوضع الحالى لتطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل بالشركة محل الدراسة والتحديات التى تواجهها، وذلك تمهيداً لإرساء المنظومة المقترحة لعمل تلك الأساليب فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى.



الشكل رقم (٤-١)

المكونات الأساسية لمحرك بدء التشغيل

(المصدر بتصرف: HELLA, 2021: 4)

١/٤ الوضع الحالى: تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل

تم الاعتماد فى هذا القسم على بيانات محرك بدء التشغيل الواردة بحسابات الشركة محل الدراسة[١] عن عام ٢٠٢٢، وذلك فى إطار إجراء مقابلات شخصية مع مدير التصميم والمحاسب الإدارى، بالإضافة إلى أحد خبراء تقدير التكلفة بالشركة. وفى ضوء تلك المقابلات، تم التوصل إلى أن الشركة تقوم بتطبيق أسلوب التكلفة المستهدفة عند تصميم محرك بدء التشغيل استجابةً للضغوط التنافسية التى تواجهها حول خفض تكلفة مكوناته. وفى إطار ذلك يتم تقديم عرضاً تفصيلياً لمراحل تطبيق هذا الأسلوب، وذلك كما يلى:

أولاً: تحديد التكلفة الموجهه بالسوق: فى ضوء المناقشات التى أجريت مع مدير التصميم حول إجراءات بحوث السوق، تم التوصل إلى أن سعر البيع المستهدف لمحرك بدء التشغيل يساوى

[١] استناداً إلى مفهوم سرية البيانات Data Confidentiality، والذى يضمن حماية البيانات الداخلية للشركة من الكشف غير المصرح به. فإن ما تم الاعتماد عليه فى هذا الدراسة هى بيانات ناتجة عن ضرب البيانات الفعلية فى معامل مقدر من قبل أحد خبراء تقدير التكلفة بالشركة محل الدراسة.

٤٠٠ دولار. وأنه يتم تحديد هامش ربح المستهدف بواقع ١٠٪ من هذا السعر. وفى إطار ذلك يمكن الوصول إلى التكلفة المسموح بها، وهو ما يتحقق من خلال المعادلة التالية:

التكلفة المسموح بها= سعر البيع المستهدف – هامش الربح المستهدف

التكلفة المسموح بها= ٤٠٠ – (٤٠٠ × ١٠ ٪) = ٣٦٠ دولار

ثانياً: التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل: توصلت الشركة محل الدراسة إلى أنه يصعب تحقيق التكلفة المسموح بها –السابق حسابها – لمحرك بدء التشغيل من الناحية العملية. وهنا تطلب الأمر تعديل هذه التكلفة عبر تحديد مستوى خفض التكلفة القابل للتحقق فى الأجل القصير، والمستوى غير القابل للتحقق والذى يعتبر تحدى استراتيجى لخفض التكلفة. وهو ما تطلب بدايةً تحديد هدف خفض التكلفة، والذى يساوى الفرق بين التكلفة الحالية والتكلفة المسموح بها، وذلك كما يلى:

فقد بلغت التكاليف الحالية لمحرك بدء التشغيل ٣٩٠ دولار (مواد مباشرة ١٩٤– أجور مباشرة ٩٣ – تكاليف صناعية مباشرة ١٠٣)، وعلى ذلك، تم حساب هدف خفض التكلفة من خلال المعادلة:

هدف خفض التكلفة = التكلفة الحالية – التكلفة المسموح بها

= ٣٩٠ – ٣٦٠ = ٣٠ دولار

وفى ضوء ما سبق، وحيث أن محرك بدء التشغيل يتم تصنيعه داخلياً بأحد مصانع الشركة محل الدراسة، فقد قامت الشركة بتحديد هدف خفض التكلفة القابل للتحقق وفقاً لقدراتها الداخلية فى تخفيض تكلفة مكونات المحرك. وقد توصلت إلى أن تلك التكلفة تساوى ١٢ دولار، وبذلك يكون التحدى الاستراتيجى لخفض التكلفة ١٨ دولار(٣٠ دولار –١٢ دولار).

وبناءً عليه، تم تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل من خلال المعادلة:

التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل =التكلفة الحالية –مستوى الخفض القابل للتحقق

= ٣٩٠ – ١٢ = ٣٧٨ دولار

ولكى يتم تحقيق التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل تم الاستعانة **بأسلوب هندسة القيمة ومصفوفة QFD** لإيجاد طرق مبتكرة لخفض التكلفة مع الحفاظ على مستوى الأداء الذى يحقق احتياجات العملاء. وفيما يلى عرضاً لمراحل التطبيق:

١– **مرحلة جمع المعلومات:** قام مهندسو القيمة بجمع معلومات دقيقة حول مكونات محرك بدء التشغيل وتكاليف كل مكون تمهيداً لتحديد البدائل التى تحقق خفضاً للتكلفة. ولكى يتم ذلك فى إطار تلبية احتياجات العملاء تطلب الأمر الاعتماد على مصفوفة QFD فى هذه المرحلة للمساعدة فى تركيز جهود مهندسى القيمة للعمل فى ضوء تلك الاحتياجات، وذلك من خلال:

أ- تحديد احتياجات ورغبات العملاء والأهمية النسبية لكل منها: من خلال بحوث السوق وفى ضوء استطلاعات الرأى، توصلت الشركة محل الدراسة إلى أن خصائص محرك بدء التشغيل التى يرغب العملاء دفع السعر مقابلها تتمثل فى خمس رغبات أساسية وهى: سرعة الإستجابة للبدء- استمرار تتابع الحركة- الحفاظ على جودة المحرك الأساسى- انخفاض الصيانة المطلوبة- انخفاض مستوى الضوضاء. وحيث أن لاحتياجات العملاء ورغباتهم أولويات مختلفة، فقد تضمنت استطلاعات الرأى محوراً يستهدف الكشف عن درجة أهمية تلك الاحتياجات والرغبات من وجهة نظر كل عميل، وذلك عبر استخدام مقياس ليكرت الخماسى الذى يتم من خلاله إعطاء مقياس ترتيبى لكل رغبة، حيث يتكون من خمس درجات لكل بند يتم قياسه وهى: غير مهم على الإطلاق (١)، غير مهم (٢)، محايد (٣)، مهم (٤)، مهم للغاية (٥). وفى ضوء ذلك قامت الشركة بحساب متوسط درجة أهمية كل رغبة لدى العملاء، وهو ما يتضح بالجدول (٤-١).

جدول رقم (٤-١)

احتياجات ورغبات العملاء والأهمية النسبية لها

احتياجات العملاء ورغباتهم	متوسط درجة أهمية كل رغبة لدى العملاء	الأهمية النسبية لكل رغبة[١] (٪)
سرعة الإستجابة للبدء	٥	٢٢,٧
استمرار تتابع الحركة	٤	١٨,٢
الحفاظ على جودة المحرك الأساسى	٥	٢٢,٧
انخفاض الصيانة المطلوبة	٥	٢٢,٧
انخفاض مستوى الضوضاء	٣	١٣,٧
إجمالى	**٢٢**	**١٠٠**

ب- تحديد المتطلبات الفنية: تتمثل المتطلبات الفنية فى مكونات المنتج وخصائصه الهندسية التى تحدد كيفية الاستجابة لاحتياجات العملاء. وقد تم تحديد مكونات محرك بدء التشغيل من قبل فريق القيمة كمتطلبات فنية للتصميم.

ج- قام أعضاء فريق هندسة القيمة بتحديد العلاقات المتبادلة بين احتياجات العملاء والمتطلبات الفنية لمحرك بدء التشغيل من خلال مصفوفة العلاقات والتى تعتبر خطوة أساسية تؤثر على نتائج التحليل النهائى لمصفوفة بيت الجودة HoQ -المرحلة الأولى من مراحل تطبيق QFD -

[١] الأهمية النسبية لكل رغبة = متوسط درجة أهمية كل رغبة لدى العملاء / إجمالى متوسط درجة الأهمية

. حيث تساهم فى التعرف على مدى مساهمة كل مكون من مكونات محرك بدء التشغيل فى تحقيق احتياجات العملاء. وقد قام أعضاء الفريق بتحديد هذه العلاقات فى ضوء أربعة مستويات تتمثل فى "علاقة قوية – علاقة متوسطة – علاقة ضعيفة – لا توجد علاقة"، حيث تم استخدام مقياس واحد للتعبير عن كل مستوى من مستويات العلاقات المذكورة وتتمثل تلك المقاييس فى "٥ ، ٣ ، ١ ، ٠" على الترتيب، وتتضح نتائج تحديد تلك العلاقات بالشكل رقم (٤-٢) والذى يوضح مصفوفة HoQ لمحرك بدء التشغيل.

وفى إطار ذلك يتم حساب الأهمية المطلقة (وزن الأهمية) لكل متطلب فنى (WI_k[1]) فى تلبية احتياجات العملاء من خلال المعادلة[٢]:

$$WI_k = \sum_{i=1}^{5} DI_i \times SR_{ik}$$

حيث:

WI_k: الأهمية المطلقة للمتطلب الفنى k

DI_i[٣]: درجة أهمية رغبة العملاء i

SR_{ik}[4]: قوة العلاقة بين المتطلب الفنى k ورغبة العملاء i

وفى ضوء العلاقة بين المتطلب الفنى الأول والمتمثل فى الملف الكهربائى ودرجة أهمية كل رغبة من رغبات العملاء والموضحة بالشكل رقم (٤-٣)، يتم التعويض فى المعادلة السابقة لحساب الأهمية المطلقة للملف الكهربائى، وذلك كما يلى:

$$WI_1 = (5 \times 5) + (4 \times 5) + (5 \times 5) + (5 \times 5) + (3 \times 5) = 110$$

كما يتم حساب الأهمية النسبية أو الوزن النسبى (Rw_k)[٥] لهذا المتطلب من خلال المعادلة:

$$Rw_k = \frac{WI_k}{\sum WI}$$

حيث

Rw_k: الوزن النسبى للمتطلب الفنى k

$\sum WI$: إجمالى الأهمية المطلقة للمتطلبات الفنية

وبالتعويض فى المعادلة السابقة لحساب الوزن النسبى للمتطلب الفنى الأول تكون كما يلى:

---

[1] *Important Weight of each technical solution.*

[٢] لمزيد من التفاصيل حول معادلتى تطبيق مصفوفة HoQ وكيفية تطبيقها يمكن الرجوع إلى Haron &Khairudin (2012: 60).

[3] *Degree of importance of the customer requirement*

[4] *Strength of relationship between the technical solution k and the customer requirement*

[5] *Relative Weight of each technical solution*

$$Rw_k = \frac{110}{489} \quad = 22.5\%$$

ومن خلال نتائج المعادلتين السابقتين يتضح أن الملف الكهربائى يساهم فى تحقيق احتياجات ورغبات العملاء بنسبة تصل إلى ٢٢,٥٪. وبتطبيق ذات المعادلات على كافة المتطلبات الفنية لمحرك بدء التشغيل بهدف تحديد مدى مساهمة كل منها فى تحقيق تلك الاحتياجات، اتضح أن الملف الكهربائى هو المتطلب الذى له الأولوية فى تحقيق احتياجات العملاء. و يوضح الشكل رقم (٤-٢) تلك النتائج تفصيلاً من خلال عرض لمصفوفة HoQ لمحرك بدء التشغيل.

قوة العلاقات (SR_{ik})

٥ علاقة قوية
٣ علاقة متوسطة
١ علاقة ضعيفة
٠ لا توجد علاقة

احتياجات العملاء ورغباتهم	درجة أهمية احتياجات العملاء ورغباتهم (DI_i)	المتطلبات الفنية (مكونات محرك بدء التشغيل)							
		الملف الكهربائى Solenoid	عضو الإنتاج Armature	ملف المجال Field Coil	ذراع الدفع Drive lever	عمود الدفع Drive shaft	المكبس Plunger	ترس البينيون Pinion	مبيت أمامى وخلفى Front & Rear Housing
سرعة الإستجابة للبدء	٥	٥	٥	٥	٣	٣	٣	٣	
استمرار تتابع الحركة	٤	٥	٣	٣	٥	٥		٣	
الحفاظ على جودة المحرك الأساسى	٥	٥	٣	٣				٣	٥
انخفاض الصيانة المطلوبة	٥	٥	٥	٥					٥
انخفاض مستوى الضوضاء	٣	٥			٥	٥	٣	٣	
الأهمية المطلقة للمتطلبات الفنية		١١٠	٧٧	٧٧	٥٠	٥٠	٢٤	٥١	٥٠	٤٨٩
الأهمية النسبية (٪) (الوزن النسبى Rw_k)		٢٢,٥	١٥,٧	١٥,٧	١٠,٢	١٠,٢	٤,٩	١٠,٦	١٠,٢	١٠٠

الشكل رقم (٤-٢)

مصفوفة بيت الجودة HoQ لمحرك بدء التشغيل

وبناءً على ما سبق وفى ضوء تلك النتائج، يكون تطبيق المراحل التالية لهندسة القيمة فى اتجاه دعم المكونات التى تحقق القيم الأعلى لدى العملاء. وهو ما توضحه الأجزاء التالية للتطبيق.

٢- مرحلة التحليل الوظيفى:

قام مهندسو القيمة بالتعاون مع خبراء التكلفة فى هذه المرحلة بإعداد قائمة بمكونات محرك بدء التشغيل والتكلفة الحالية لكل مكون، كما يتضح من الجدول رقم (٤-٢)، وذلك بهدف حساب مؤشر القيمة وتحديد فجوة التكاليف الخاصة بكل مكون ومن ثم توجيه الأفكار الإبتكارية نحو ايجاد أفضل بدائل تحسين القيمة.

جدول رقم (٤-٢)

مكونات محرك بدء التشغيل والتكلفة الحالية لها

(القيمة بالدولار)

المكون	التكلفة الحالية للمكون	نسبة تكلفة المكون إلى إجمالى تكلفة المكونات (٪)
الملف الكهربائى Solenoid	٨٥,٠٠	٢١,٨
عضو الإنتاج Armature	٥٦,٥٠	١٤,٥
ملف المجال Field winding	٥٦,٠٠	١٤,٤
ذراع الدفع Drive lever	٣٥,٥٠	٩,١٠
عمود الدفع Drive-shaft	٣٤,٥٠	٨,٨
المكبس Plunger	١٤,٠٠	٣,٦
ترس البينون (ترس صغير) Pinon	٤٠,٠٠	١٠,٢
مبيت أمامى وخلفى Front & Rear Housing	٦٨,٥٠	١٧,٦
المجموع	**٣٩٠**	**١٠٠**

وبناءً على النتائج السابقة، وفى ضوء الأهمية النسبية لكل مكون من مكونات محرك بدء التشغيل فى تحقيق احتياجات العملاء -ناتج تطبيق مصفوفة HoQ[1]-، يتم حساب مؤشر القيمة لكل مكون وذلك بقسمة الأهمية النسبية للمكون على نسبة تكلفة هذا المكون إلى إجمالى تكلفة المكونات بهدف تحديد الإجراء الذى يتحقق معه تحسين القيمة إما بتخفيض التكلفة أو تحسين الأداء، فإذا كان مؤشر القيمة للمكون أقل من الواحد الصحيح فهذا يعنى أن التكلفة الكلية لهذا المكون أكبر من أهميته النسبية لدى العميل، الأمر الذى يستلزم معه البحث عن أفضل بدائل

[1] يمكن الرجوع إلى شكل رقم (٤-٢) الصف الخاص بالأهمية النسبية لمكونات محرك بدء التشغيل.

لتخفيض تكلفته. أما إذا كان مؤشر القيمة للمكون أكبر من الواحد الصحيح فهذا يعنى أن الأهمية النسبية لهذا المكون لدى العميل أكبر من التكلفة الكلية له وهو ما يتعين معه إيلاء مزيد من الإهتمام نحو تحسين أدائه. وهو ما يوضحه الجدول رقم (٤-٣).

جدول رقم (٤-٣)

مؤشر القيمة لمكونات محرك بدء التشغيل وإجراء تحسين القيمة

المكون	الأهمية النسبية للمكون لدى العميل(٪)[١] (١)	نسبة تكلفة المكون إلى إجمالى تكلفة المكونات[٢] (٪) (٢)	مؤشر القيمة (١) ÷ (٢)	الإجراء الذى يحقق تحسين القيمة	
				تخفيض التكلفة	تحسين الأداء
الملف الكهربائى	٢٢,٥	٢١,٨	١,٠٣		✓
عضو الإنتاج	١٥,٧	١٤,٥	١,٠٨		✓
ملف المجال	١٥,٧	١٤,٤	١,٠٩		✓
ذراع الدفع	١٠,٢	٩,١	١,١٢		✓
عمود الدفع	١٠,٢	٨,٨	١,١٥		✓
المكبس	٤,٩	٣,٦	١,٣٦		✓
ترس البينون	١٠,٦	١٠,٢	١,٠٤		✓
مبيت أمامى وخلفى	١٠,٢	١٧,٦	٠,٥٨	✓	

ويتضح من الجدول السابق أن المبيت هو المكون الوحيد من الذى يقل مؤشر قيمته عن الواحد الصحيح، الأمر الذى يستلزم معه محاولة ايجاد أفضل بدائل لتخفيض تكلفته. وفى إطار اتجاهات تحسين القيمة المحددة قامت الشركة محل الدراسة بحساب فجوة التكاليف الخاصة بكل مكون من خلال مقارنة التكلفة الحالية لكل مكون بالتكلفة المستهدفة لهذا المكون. ويوضح الجدول رقم (٤-٤) حساب فجوة التكاليف لكل مكون.

وفى ضوء مؤشرات القيمة وفجوة التكاليف المحددتين بالجدول رقم (٤-٣) والجدول رقم (٤-٤) على التوالى، كان القرار بتوجيه جهود التفكير الإبداعى لمهندسى القيمة نحو تخفيض تكلفة المبيت، باعتباره المكون الذى يقل مؤشر قيمته عن الواحد الصحيح من ناحية ويحقق فجوة تكلفة موجبة -حيث تزيد تكلفته الحالية عن التكلفة المستهدفة بحوالى ٢٩,٩ دولار - من ناحية أخرى. وذلك فى إطار محاولة الوصول إلى التكلفة المستهدفة لمحرك بدء التشغيل.

[١] يمكن الرجوع إلى الشكل رقم (٤-٢)

[٢] يمكن الرجوع إلى الجدول رقم (٤-٢)

جدول رقم (٤-٤)

حساب فجوة التكاليف لكل مكون من مكونات محرك بدء التشغيل

(القيمة بالدولار)

المكون	الأهمية النسبية للمكون لدى العميل (٪) (١)	التكلفة الحالية للمكون[١] (٢)	التكلفة المستهدفة على مستوى المكون[٢] (٣)	فجوة التكاليف (التكلفة الحالية – التكلفة المستهدفة)
الملف الكهربائى	٢٢,٥	٨٥,٠٠	٨٥,٠٥	(٠,٠٥)
عضو الإنتاج	١٥,٧	٥٦,٥٠	٥٩,٣٤	(٢,٨٤)
ملف المجال	١٥,٧	٥٦,٠٠	٥٩,٣٤	(٣,٣٤)
ذراع الدفع	١٠,٢	٣٥,٥٠	٣٨,٥٥	(٣,٠٥)
عمود الدفع	١٠,٢	٣٤,٥٠	٣٨,٥٥	(٤,٠٥)
المكبس	٤,٩	١٤,٠٠	١٨,٥٢	(٤,٥٢)
ترس البينون	١٠,٦	٤٠,٠٠	٤٠,١٠	(٠,١٠)
مبيت أمامى وخلفى	١٠,٢	٦٨,٥٠	٣٨,٥٥	٢٩,٩٥
		٣٩٠	٣٧٨	١٢

٣-**مرحلة التفكير الإبداعى والابتكارى:** تهدف هذه المرحلة إلى تركيز الجهود الفكرية نحو تقديم بدائل مبتكرة لتخفيض تكلفة مبيت محرك بدء التشغيل. وفى هذا الشأن، قام مهندسو القيمة بتقديم قائمة مختصرة بالأفكار المحتملة لتخفيض تلك التكلفة. وتمثلت تلك الأفكار فى استبدال المادة الخام المصنعة للمبيت وهى مادة الألومنيوم Aluminum بأحد المواد الخام التالية: مادة البولى أميد المقواة بالألياف الزجاجية Glass fiber-reinforced polyamide (GFRP) – مادة الفولاذ Steel – مادة حديد الزهر Cast-iron. وقد تم إرفاق مستند بتلك القائمة يتضمن شرح وتصنيف كل فكرة بهدف خلق فهم مشترك حول الأفكار المقدمة، بالإضافة إلى مناقشة التأثير المحتمل لها فى ضوء معايير الأداء والتكلفة، بهدف المساعدة فى ترتيب البدائل ومن ثم تقييمها.

[١] يمكن الرجوع إلى الجدول رقم (٤-٢)

[٢] التكلفة المستهدفة لكل مكون = إجمالى التكلفة المستهدفة للمنتج (٣٧٨) × الأهمية النسبية لكل مكون (بالشكل رقم (٤-٢))

٤- **مرحلة التقييم واتخاذ القرار:** هدفت هذه المرحلة إلى تقييم المقترحات المقدمة. وفى ضوء ذلك التقييم، توصل فريق القيمة إلى أن البديل الأفضل هو استبدال المادة الخام للمبيت من مادة الألومنيوم إلى مادة البولى أميد المقواة بالألياف الزجاجية (GFRP). وقد اتخذ هذا القرار فى ضوء بعدى التكلفة والأداء، وهو ما يمكن توضيحه فيما يلى:

- **البعد الأول: بعد التكلفة:** توصلت نتائج التقييم إلى أن المادة الخام للألومنيوم أقل تكلفة عند مقارنتها بالمادة الخام لـ GFRP، إلا أن تكلفة معالجة processing cost مادة الألومونيوم أعلى من تكلفة معالجة مادة GFRP لأنها تتطلب أفراناً ذات درجات حرارة مرتفعة لصهر المادة الخام، وقد زادت تلك التكلفة مع ارتفاع تكلفة الطاقة الكهربائية المستخدمة، فى حين أن مادة GFRP يتم صهرها فى درجة حرارة عادية. وعلى ذلك، وبحساب عناصر تكلفة المبيت والتى تشمل تكلفة المادة الخام بالإضافة إلى تكلفة الأجور وتكلفة المعالجة والتكاليف الصناعية المباشرة الأخرى، تكون تكلفة المبيت المُصنع من مادة GFRP أقل من تكلفة ذلك المُصنع من مادة الألومنيوم. وقد قدرت نسبة خفض التكلفة الكلية المتوقعة للمبيت إلى ١٥٪، لتصل تكلفته إلى ٥٨,٢٢ دولار[١].
- **البعد الثانى: بعد الأداء:** تم تقييم بُعد الأداء فى ضوء تحليل نتائج نسبة القوة إلى الوزن[٢] Strength-to-Weight Ratio التى توفر مؤشر حول مدى مناسبة المادة المستخدمة للغرض منها، وكذلك التأثير المتوقع على الأداء. وقد توصلت النتائج إلى أن مادة GFRP تتمتع بنسبة قوة إلى وزن أعلى من مادة الألومونيوم. بالإضافة إلى ذلك، فقد تم تقييم الأداء فى ضوء مقياس يحدد مدى متانة وصلابة كل مادة. وقد توصلت النتائج إلى أن مادة الألومنيوم أقل متانة من مادة GFRP. فعلى الرغم من أن الألومنيوم مقاوم للتآكل الناتج عن بعض المواد، إلا أنه معرض بشدة للتآكل الناتج عن العديد من الأحماض وأملاح المعادن الثقيلة. وذلك على العكس من GFRP التى اعتبرت مادة مقاومة للتآكل.

وفى إطار ذلك تم حساب التكلفة على مستوى المكونات للتعرف على تأثير اعتماد مقترح هندسة القيمة على الوصول إلى التكلفة المستهدفة، وهو ما يوضحه الجدول رقم (٤-٥).

---

[١] تكلفة المبيت المُصنع من مادة GFRP = ٦٨,٥٠- (٦٨,٥٠× ١٥٪) =٥٨,٢٢ دولار.

[٢] تعد نسبة القوة إلى الوزن للمواد أحد المعايير المهمة التى تساعد على تقييم وتحليل الخصائص المختلفة للمادة محل الدراسة بدقة من خلال أخذ قوة المادة ووزنها بعين الاعتبار، حيث يؤثر ذلك على كفاءة تصميم المنتج من خلال تحقيق وفورات فى تكاليف المواد دون التضحية بالأداء (Lee, 2023: 1).

جدول رقم (٤-٥)

حساب فجوة التكاليف لكل مكون فى ظل البديل المقترح من قبل فريق القيمة

(القيمة بالدولار)

المكون	تكلفة المكونات فى ظل البديل المقترح (١)	التكلفة المستهدفة على مستوى للمكون[١] (٢)	فجوة التكاليف (١)-(٢)
الملف الكهربائى	٨٥,٠٠	٨٥,٠٥	(٠,٠٥)
عضو الإنتاج	٥٦,٥٠	٥٩,٣٤	(٢,٨٤)
ملف المجال	٥٦,٠٠	٥٩,٣٤	(٣,٣٤)
ذراع الدفع	٣٥,٥٠	٣٨,٥٥	(٣,٠٥)
عمود الدفع	٣٤,٥٠	٣٨,٥٥	(٤,٠٥)
المكبس	١٤,٠٠	١٨,٥٢	(٤,٥٢)
ترس البينون (ترس صغير)	٤٠,٠٠	٤٠,١٠	(٠,١٠)
مبيت أمامى وخلفى	*٥٨,٢٢	٣٨,٥٥	١٩,٦٧
	٣٧٩,٧٢	٣٧٨	١,٧٢

وفى ضوء تكلفة المكونات قبل وبعد تنفيذ إجراء هندسة القيمة، تقدم فريق القيمة بالاقتراح السابق إلى الإدارة العليا ورؤساء الأقسام، وتمت الموافقة عليه.

وفى إطار ما سبق وفى ضوء المقابلات الشخصية التى أجريت مع مدير التصميم والمحاسب الإدارى بالشركة محل الدراسة، تم مناقشة التحديات التى واجهتها عند تطبيق مراحل أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل السابق عرضها. وقد أظهرت نتائج المناقشة مواجهتها لعدة تحديات، يمكن عرضها كما يلى:

أولاً: يشوب تحديد التكلفة المستهدفة لمحرك بدء التشغيل تحديات تتعلق بالتحديد الدقيق لهدف خفض التكلفة القابل للتحقق.

ثانياً: صعوبة التوصل إلى رؤى مشتركة بين أعضاء فريق هندسة القيمة لخلق أفكار إبداعية تساهم فى تخفيض تكلفة محرك بدء التشغيل للوصول إلى التكلفة المستهدفة مع الحفاظ على الأداء.

ثالثاً: يتطلب تحقيق التكلفة المستهدفة لمحرك بدء التشغيل عبر هندسة القيمة تكرار التصميم لتقييم كافة البدائل المقترحة للتوصل إلى البديل الذى يحقق التوازن بين التكلفة والأداء، والتى غالباً ما تعد عملية مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً.

[١] يمكن الرجوع إلى جدول (٤-٤)

رابعاً: يعتبر تحويل احتياجات عملاء محرك بدء التشغيل إلى متطلبات فنية للتصميم مهمة معقدة، فغالباً ما يتطلب الأمر إضافة ميزات أو خصائص بناءً على احتياجات العملاء لتحسين الأداء الوظيفى للمحرك فى اتجاه تلبية تلك الاحتياجات، وهو ما اعتبر تحدياً خاصةً فى ظل قيود التكلفة المستهدفة.

وبناءً على ما سبق، وفى ضوء هذه التحديات يتم تخصيص الجزء التالى لدراسة اقتراح هذا البحث والخاص بإرساء منظومة لتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة محرك بدء التشغيل بمرحلة التصميم والحد من التحديات التى تواجه تطبيقها من خلال تكنولوجيا التوأم الرقمى.

٢/٤ المنظومة المقترحة: أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل فى ظل استخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى

فى إطار المقابلة الشخصية التى أجريت مع مدير التصميم حول التحديات التى واجهت الشركة محل الدراسة عند تطبيق مراحل أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل، اقترح الباحثون دراسة أثر العمل فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى على تحسين فعالية هذه الأساليب. وفى هذا الشأن أفاد مدير التصميم أن قرار الشركة باعتماد تطبيق هذه التكنولوجيا مازال قيد الدراسة لديها. وأضاف: أن الشركة قد اعتمدت على إحدى الإصدارات التجريبية trial versionلتكنولوجيا التوأم الرقمى بهدف تقييم مدى توافق الحلول المقدمة من هذه التكنولوجيا مع متطلبات التطبيق قبل الالتزام بقرار اعتمادها على نطاق واسع. وقد كان من بين الإصدارات التجريبية التى اعتمدتها الشركة "إصدار تجريبى لتوأم رقمى لمنظومة بدء التشغيل" والذى يعتبر محرك بدء التشغيل جزءاً أساسياً من أجزائها.

وعلى ذلك، تم الاعتماد فى تطبيق المنظومة المقترحة على افتراض تكرار الوضع الحالى فى ظل تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى، وذلك عبر الاعتماد على إجراء مقابلة مع مجموعة تركيز Focus group. حيث تعبر مجموعة التركيز عن نوع من المقابلات المتعمقة In-depth interviewالتى يتم إجراؤها فى صورة جماعية[١]. ويستهدف الباحثون من خلال إجراء هذه المقابلة تنفيذ مناقشة قائمة على التفاعل وتبادل الآراء والخبرات بين الأعضاء المشاركين بهدف الحصول على بيانات قيّمة ناتجة عن وجهات نظر متنوعة يمكن أن تساعد على تحديد التأثير المتوقع لتطبيق المنظومة المقترحة على فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة عند تصميم

[١] لمزيد من التفاصيل حول التعريف بمجموعات التركيز وخصائصها يمكن الرجوع إلى دراسة Mishra (2016: 1-2).

محرك بدء التشغيل فى ضوء الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى. وقد تم اختيار الأعضاء المشاركين بتوجيه من مدير التصميم. وتم مراعاة معيارين لهذا الاختيار، يتمثل المعيار الأول فى أن يكون المشاركون فى المقابلة من مختلف التخصصات[١]، بهدف تحقيق الشمول والتنوع الذى يتناسب وطبيعة الدراسة. أما المعيار الثانى فيتمثل فى أن يكون المشاركون قد تلقوا تدريباً مباشراً على الإصدار التجريبى لتكنولوجيا التوأم الرقمى.

وقد تم الاتفاق على إجراء مقابلة مجموعة التركيز عبر شبكة المعلومات الدولية، حيث أنها أكثر ملاءمة لجدول أعمال المشاركين. ويتم عرض نتائج هذه المقابلة وإجابات المشاركين على الأسئلة التى تم طرحها تباعاً فى إطار تطبيق المنظومة المقترحة، وذلك من خلال تقديم عرض تفصيلى لمراحل تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة – التى سبق عرضها فى القسم الأول– فى إطار تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى. وهو ما يتضح من خلال ما يلى:

أولاً: تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل فى ظل التوأم الرقمى: أوضح كل من مدير التصميم ومقدر التكلفة أثناء إجراء مقابلة مجموعة التركيز أن تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى يوفر رؤية شاملة واقعية لتكاليف محرك بدء التشغيل على مدار دورة حياة الجيل الأخير, ومن ثم توفير امكانية محاكاة مسببات حدوث التكلفة بناءً على رؤى العالم المادى. وهو الأمر الذى يدعم عملية إجراء تحليل شامل لتكلفة المحرك ومكوناته لتضمين جميع عناصرها عند تحديد هدف الخفض القابل للتحقق عند تصميم الجيل التالى من المحرك. وقد أفاد مقدر التكلفة أنه فى ضوء الامكانيات الموضحة والتقديرات المتوقعة من الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى تستطيع الشركة زيادة مستوى خفض التكلفة القابل للتحقق لمحرك بدء التشغيل بنسبة قد تصل إلى ٢٥٪ ومن ثم تخفيض التحدى الاستراتيجى للتكلفة.

وفى ضوء ذلك، يكون مستوى خفض التكلفة الذى يمكن تحقيقه فى ظل تطبيق التوأم الرقمى كما يلى:

هدف خفض التكلفة الممكن تحقيقه = ١٢ + (١٢ ×٢٥٪) = ١٥دولار

وعلى ذلك، يمكن تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل من خلال المعادلة:

التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل =التكلفة الحالية– مستوى الخفض القابل للتحقق

= ٣٩٠ – ١٥ = ٣٧٥ دولار

[١] لمزيد من التفاصيل حول أعضاء مجموعة التركيز التى أجريت معهم المقابلة والغرض من مشاركة كل منهم فى ضوء المهام الوظيفية لهم يمكن الرجوع إلى آية محمد سيد محمد، ٢٠٢٤: ١٣٨–١٤٠.

ثانياً: تحقيق التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل فى ظل التوأم الرقمى: لكى يتم التحقق من تأثير تطبيق التوأم الرقمى على تحقيق التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل، يتم بدايةً التحقق فى تأثيرها على أسلوبى هندسة القيمة ومصفوفة QFD. وذلك كما يلى:

١- **مرحلة جمع المعلومات فى ظل التوأم الرقمى:** تعد مرحلة جمع المعلومات المرحلة الأولى لتطبيق أسلوب هندسة القيمة، وهى ذات المرحلة التى يتكامل فيها الأسلوب مع مصفوفة QFD –كما سبقت الإشارة–، وفى إطار ذلك أكد كل من مهنس التطوير ومهندس الميكانيكا أثناء المقابلة أن تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى يدعم هذه المرحلة من خلال اتجاهين:

الاتجاه الأول: توفير رؤى واقعية حول أداء الجيل الأخير من محرك بدء التشغيل فى ظل مختلف ظروف الاستخدام، الأمر الذى يوفر أساساً معرفياً لتحسين أداء تصميم الجيل التالى من هذا المحرك. فالمراقبة المستمرة للجيل الأخير من محرك بدء التشغيل تساهم فى تحديد المكونات والأجزاء الأكثر عرضة للأعطال، وبالتالى استهداف مجالات التحسين التى تقلل من احتمالية هذه الأعطال عند تصميم الجيل التالى، ومن ثم دعم دراسة اتجاهات تحسين القيمة من جيل لآخر.

الاتجاه الثانى: تحقيق رؤى أكثر شمولاً حول الاحتياجات الضمنية للعملاء والناتجة عن تحليل أداء محرك بدء التشغيل فى ضوء أنماط الاستخدام الفعلية actual usage patterns.

وفى هذا الصدد، تم إجراء مناقشة مطولة مع مجموعة التركيز بهدف دراسة التأثير المتوقع لتطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى على بناء مصفوفة HoQ. وذلك من خلال التعرف على دور تطبيق هذه التكنولوجيا فى تحديد احتياجات العملاء وأهميتها النسبية من ناحية، وكذلك دورها فى تحديد العلاقات المتبادلة بين هذه الاحتياجات والمتطلبات الفنية لمحرك بدء التشغيل من ناحية أخرى. وقد توصلت نتائج هذه المناقشة إلى أن دراسة ذلك التأثير يتطلب إجراء محاكاة مفصلة لأداء مكونات محرك بدء التشغيل التى تعكسها تكنولوجيا التوأم الرقمى، والناتجة عن "رصد observe" لتفاعل العملاء مع المحرك عبر أجهزة الاستشعار –كما سبقت الإشارة، حيث أوضح مهندس الميكانيكا أن هذه التكنولوجيا توفر معرفة متعمقة حول أداء محرك بدء التشغيل من خلال قدرتها على تحقيق مايلى:

- تتبع تكرار عملية بدء التشغيل: يقوم التوأم الرقمى بمراقبة وتسجيل عدد مرات استخدام محرك بدء التشغيل عملياً فى الوقت الفعلى، والتى توفر نظرة ثاقبة حول أداء المحرك. فكلما زاد هذا العدد، كلما زادت فرص تعرضه للتآكل والتدهور التدريجى لمكوناته.

- تحديد مدة التدوير: يساعد التوأم الرقمى على تسجيل المدة الزمنية التى يستغرقها محرك بدء التشغيل لإكمال عملية تدوير المحرك الأساسى، والتى تعد بمثابة مؤشراً للأداء. فإذا كانت مدة التدوير قصيرة باستمرار، فيشير ذلك إلى أن محرك بدء التشغيل يحقق أداءً فعالاً. أما إذا كانت مدة التدوير أطول من المعتاد، فقد يكون ذلك بمثابة تحذير مبكر حول الاخفاقات المحتملة فى الأداء.
- حساب معدل استهلاك الطاقة: يوفر التوأم الرقمى قياساً للطاقة المستهلكة measuring the energy consumed كل مرة يتم فيها بدء التشغيل، وهو ما يوفر نظرة ثاقبة حول كفاءة الطاقة اللازمة لبدء التشغيل. ليس هذا فحسب، فهو ايضاً يحقق مراقبة لفترات توقف العمل Idle Time–الفترات التى لا يكون فيها محرك بدء التشغيل قيد الاستخدام–، مما قد يؤثر على اعتبارات استهلاك الطاقة.
- حساب مقاومة بدء التشغيل: يدعم التوأم الرقمى إجراء تحليل المقاومة Resistance analysis ، وهو تحليل يحسب القوة المعاكسة التى يواجهها محرك بدء التشغيل أثناء محاولته تشغيل المحرك الأساسى. ويعد هذا التحليل ذا أهمية كبيرة فى مرحلة تصميم الجيل التالى لتحديد عزم الدوران الذى يحقق التغلب على هذه المقاومة.

وعلى ذلك، وفى ضوء منصة الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى لمحرك بدء التشغيل، أجرى مدير التصميم –بمساعدة أحد موظفى تكنولوجيا المعلومات– محاكاة لأداء محرك بدء التشغيل فى ضوء مختلف أنماط الاستخدام. وقد تم مناقشة نتائج هذه المحاكاة مع مجموعة التركيز، وخلصت إلى ما يلى:

أوضح مدير التصميم أن التوأم الرقمى يوفر فهم أعمق لاحتياجات العملاء بناء على القدرات المعرفية الناتجة عن تتبع السياق والتعرف على أنماط الاستخدام. فتحقيق أولى احتياجات العملاء "سرعة الإستجابة لبدء التشغيل" –على سبيل المثال– تتم فى إطار التعرف على المدة الزمنية التى يستغرقها محرك بدء التشغيل لإكمال عملية تدوير المحرك الأساسى وحساب القوة المعاكسة التى قد يواجهها، وهو ما يساعد على تحديد التعديلات اللازمة التى تضمن تحقيق الاحتياجات بشكل موثوق حتى فى ظل ظروف الاستخدام الصعبة. وفيما يتعلق بتحديد الأهمية النسبية لاحتياجات

العملاء فى ظل تطبيق التوأم الرقمى، أفاد مهندس التطوير أن المحاكاة التى أجريت فى ضوء الإصدار التجريبى تمت لنفس حجم العينة التى أجريت عليها استطلاعات الرأى لتحديد الأهمية النسبية فى الوضع الحالى. ويوضح الجدول رقم (٤-٦) نتائج تحديد متوسط أهمية كل رغبة لدى العملاء فى ضوء هذه المحاكاة.

جدول رقم (٤-٦)

احتياجات العملاء وأهميتها النسبية فى ضوء تكنولوجيا التوأم الرقمى

احتياجات العملاء ورغباتهم	متوسط درجة أهمية كل رغبة لدى العملاء	الأهمية النسبية لكل رغبة (٪)
سرعة الإستجابة لبدء التشغيل	٥	٢٢,٧
استمرار تتابع الحركة	٤	١٨,٢
الحفاظ على جودة المحرك الأساسى	٥	٢٢,٧
انخفاض الصيانة المطلوبة	٤	١٨,٢
انخفاض مستوى الضوضاء	٤	١٨,٢
إجمالى	**٢٢**	**١٠٠**

وأضاف كل من مدير التصميم ومهندس التطوير، أن الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى يوفر امكانية إجراء تحليل شامل لنتائج المحاكاة بهدف تقديم توصيات بشأن مكونات محرك بدء التشغيل الأكثر تأثيراً على احتياجات العملاء. وفى ضوء هذا التحليل قامت مجموعة التركيز بتحديد مدى مساهمة كل مكون من هذه المكونات فى تحقيق تلك الاحتياجات. حيث تم الاعتماد على ذات المستويات الأربعة التى تم الاعتماد عليها فى بناء مصفوفة HoQ فى القسم الأول لتحديد مدى قوة العلاقات المتبادلة بين احتياجات العملاء ومكونات محرك بدء التشغيل والمتمثلة فى "علاقة قوية – علاقة متوسطة – علاقة ضعيفة – لا توجد علاقة"، واستخدام المقاييس "٥ ، ٣ ، ١ ، ٠" على الترتيب للتعبير عن كل مستوى من مستويات العلاقات المذكورة. وفى ضوء ذلك تم حساب وزن أهمية كل مكون فى تلبية احتياجات العملاء (WI_k) والوزن النسبى لتلك الأهمية (RW_K)[١]. وبناء مصفوفة HoQ لمحرك بدء التشغيل فى ضوء تكنولوجيا التوأم الرقمى والموضحة بالشكل رقم (٤-٣).

[١] تم توضيح معادلتى حساب وزن أهمية كل مكون فى تلبية احتياجات العملاء وأهميته النسبية تفصيلاً عند بناء مصفوفة HOQ بالوضع الحالى قبل تطبيق المنظومة المقترحة، وذلك بالبند ١/٤ من المبحث الرابع.

قوة العلاقات (SR_{ik})
٥ علاقة قوية
٣ علاقة متوسطة
١ علاقة ضعيفة
٠ لا توجد علاقة

احتياجات العملاء ورغباتهم	درجة أهمية احتياجات العملاء ورغباتهم (DI_i)	المتطلبات الفنية (مكونات محرك بدء التشغيل)							
		الملف الكهربائى Solenoid	عضو الإنتاج Armature	ملف المجال Field Coil	ذراع الدفع Drive lever	عمود الدفع Drive shaft	المكبس Plunger	ترس البينيون Pinion	مبيت أمامى وخلفى Front & Rear Housing
سرعة الإستجابة للبدء	٥	٥	٥	٥	٣	٣	٣	٣	
استمرار تتابع الحركة	٤	٥	٣	٣	٥	٥		٥	
الحفاظ على جودة المحرك الأساسى	٥	٥	٥	٥				٣	٥
انخفاض الصيانة المطلوبة	٤	٥	٣	٣					٣
انخفاض مستوى الضوضاء	٤	٥			٣	٣	١		
الأهمية المطلقة للمتطلبات الفنية		١١٠	٧٤	٧٤	٤٧	٤٧	١٩	٥٠	٤٥	٤٦٦
الأهمية النسبية (٪) (الوزن النسبى Rw_k)		٢٣,٦	١٥,٩	١٥,٩	١٠,٠	١٠,١	٤,١	١٠,٧	٩,٧	١٠٠

الشكل رقم (٤-٣)

مصفوفة بيت الجودة HoQ لمحرك بدء التشغيل فى ضوء تكنولوجيا التوأم الرقمى

٢- مرحلة التحليل الوظيفى فى ظل التوأم الرقمى

أوضح الخبراء المشاركون فى مجموعة التركيز أثناء إجراء المقابلة معهم أنه فى إطار ما يوفره التوأم الرقمى من اتصالات تفاعلية ديناميكية بين محرك بدء التشغيل المادى ومثيله الافتراضى على مدار دورة الحياة بما فيها مرحلة التشغيل، يتم توفير سجلات لأعطال الجيل

الأخير من المحرك والتى تنتج عن مراقبة فعلية لأدائه. وفى هذا الشأن أفاد مهندس التطوير أن سجلات الأعطال الناتجة عن تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى تحقق معرفة عملية شاملة لمهندسى القيمة حول الأسباب الجذرية لحدوث أعطال كل مكون من مكونات محرك بدء التشغيل واكتشاف العلاقة الارتباطية بين تلك الأعطال، وكذلك تحديد معدل تكرارها. وفى ضوء الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى، أوضح المشاركون بمجموعة التركيز للباحثة مثالاً لبيانات سجل الأعطال التى قد تنتج عن مراقبة وتتبع التوأم الرقمى لأحد محركات بدء التشغيل خلال ١٠٠٠ ساعة عمل. وقد كانت نتائج تلك البيانات كما يوضح الجدول رقم (٤-٧).

جدول رقم (٤-٧)

بيانات سجل الأعطال الخاصة بأحد محركات بدء التشغيل فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى

المكون	أسباب الأعطال Causes of Failure	تكرار الأعطال Failures Frequency على مدار ١٠٠٠ ساعة عمل	معدلات الأعطال فى الساعة[١] Failure rate per hour
الملف الكهربائى Solenoid	خلل ميكانيكى Mechanical fault	١٣	٠,٠٢
	ارتفاع درجات الحرارة Overheating	٧	
عضو الإنتاج Armature	ارتفاع الجهد Voltage spikes	٩	٠,٠١٤
	الأعطال المتعلقة بالتثبيت Installation-Related Failures	٥	
ملف المجال Field winding	ارتفاع درجات الحرارة Overheating	١٠	٠,٠١٧
	ارتفاع الجهد Voltage spikes	٧	
ذراع الدفع Drive lever	سوء المحاذاة Misalignment	١٢	٠,٠١٦
	أخطاء التجميع Assembly errors	٤	
عمود الدفع Drive-shaft	تآكل Corrosion	٨	٠,٠٠٨
المكبس Plunger	عيوب تصنيع Manufacturing defect	٨	٠,٠٠٨
ترس البينون Pinon	تآكل ميكانيكى Mechanical wear and tear	٧	٠,٠٠٧
مبيت أمامى وخلفى Front & Rear	تآكل Corrosion	١	٠,٠١٢

[١] معدل الأعطال فى الساعة = تكرار الأعطال على مدار ساعات العمل / عدد ساعات العمل

المكون	أسباب الأعطال Causes of Failure	تكرار الأعطال Failures Frequency على مدار ١٠٠٠ ساعة عمل	معدلات الأعطال فى الساعة[١] Failure rate per hour
Housing	شقوق وفشل هيكلى Crack and Stractal	٩	
	الأعطال المتعلقة بالتثبيت Installation-Related Failures	٢	

وتعد نتائج سجلات الأعطال بمثابة توجيه أولى لعملية تحسين القيمة فى هذه المرحلة، حيث يوفر التوأم الرقمى لمهندسى القيمة امكانية محاكاة كافة أنماط أعطال المكونات فى ضوء تكلفة كل مكون، ومن ثم التعرف على المكونات الأكثر عرضة للأعطال وتحديد ما يلزم لتفاديها عند تصميم الجيل التالى –وهو ما سيتضح تفصيلاً فى المرحلة التالية. وبعد إجراء تلك المحاكاة ، تأتى خطوة حساب مؤشر القيمة لكل مكون من مكونات المحرك من ناحية –كما يتضح من الجدول رقم (٤–٨)– وتحديد الفجوة التكاليفية بين التكلفة الحالية لكل مكون والتكلفة المستهدفة على مستوى المكون من ناحية أخرى –كما يتضح من الجدول رقم (٤–٩)، كما يلى:

جدول رقم (٤–٨)

مؤشر القيمة لمكونات محرك بدء التشغيل وإجراء تحسين القيمة فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى

المكون	الأهمية النسبية للمكون لدى العميل[١] (٪) (١)	نسبة تكلفة المكون إلى إجمالى تكلفة المكونات[٢] (٪) (٢)	مؤشر القيمة (١)÷ (٢)	الإجراء الذى يحقق تحسين القيمة	
				تخفيض التكلفة	تحسين الأداء
الملف الكهربائى	٢٣,٦	٢١,٨	١,٠٨		✓
عضو الإنتاج	**١٥,٩**	١٤,٥	١,١٠		✓
ملف المجال	**١٥,٩**	١٤,٤	١,١٠		✓
ذراع الدفع	**١٠,٠**	٩,١	١,٠٩		✓
عمود الدفع	**١٠,١**	٨,٨	١,١٥		✓
المكبس	**٤,١**	٣,٦	١,١٣		✓
ترس البينون (ترس صغير)	**١٠,٧**	١٠,٢	١,٠٥		✓
مبيت أمامى وخلفى	**٩,٧**	١٧,٦	٠,٥٥	✓	

وبناء على الجدول السابق، يتضح أن المبيت هو المكون الذى يقل مؤشر قيمته عن الواحد الصحيح، الأمر الذى يستلزم معه ايجاد أفضل بدائل لتخفيض تكلفته، وفى إطار تحديد اتجاهات

[١] يمكن الرجوع إلى الشكل رقم (٤–٣)

[٢] يمكن الرجوع إلى الجدول (٤–١)

تحسين القيمة تم حساب فجوة التكاليف الخاصة بكل مكون من مكونات محرك بدء التشغيل من خلال مقارنة التكلفة الحالية لكل مكون بالتكلفة المستهدفة، وهو ما يتضح من الجدول رقم (٤-٩).

جدول رقم (٤-٩)

حساب فجوة التكاليف لكل مكون من مكونات محرك بدء التشغيل فى ظل تكنولوجيا التوأم الرقمى

(القيمة بالدولار)

المكون	الأهمية النسبية للمكون لدى العميل[١] (٪) (١)	التكلفة الحالية للمكون[٢] (٢)	التكلفة المستهدفة على مستوى المكون[٣]	فجوة التكاليف (التكلفة الحالية- التكلفة المستهدفة)
الملف الكهربائى	٢٣,٦	٨٥,٠٠	٨٨,٥٠	(٣,٥٠)
عضو الإنتاج	١٥,٩	٥٦,٥٠	٥٩,٦٢	(٣,١٢)
ملف المجال	١٥,٩	٥٦,٠٠	٥٩,٦٢	(٣,٦٢)
ذراع الدفع	١٠,٠	٣٥,٥٠	٣٧,٥٠	(٢,٠٠)
عمود الدفع	١٠,١	٣٤,٥٠	٣٧,٨٧	(٣,٣٧)
المكبس	٤,١	١٤,٠٠	١٥,٣٨	(١,٣٨)
ترس البينون (ترس صغير)	١٠,٧	٤٠,٠٠	٤٠,١٣	(٠,١٣)
مبيت أمامى وخلفى	٩,٧	٦٨,٥٠	٣٦,٣٨	٣٢,١٢
		٣٩٠	٣٧٥	١٥

وفى هذا الشأن أكد الخبراء المشاركون أن تطبيق التوأم الرقمى يساعد على توجيه جهود التفكير الإبداعى لمهندسى القيمة نحو اتجاهى تحسين القيمة -خفض التكلفة وتحسين الأداء- من خلال دعم فرص تحسين أداء محرك بدء التشغيل الناتجة من مراقبة دقيقة لهذا الأداء على مدار دورة حياة الجيل الأخير. وفى إطار ذلك، أفاد المشاركون أنه فى إطار تطبيق التوأم الرقمى يمكن توجيه العمل فى المرحلة التالية من مراحل هندسة القيمة فى اتجاهين: الاتجاه الأول تخفيض تكلفة المبيت، باعتباره المكون الوحيد الذى مازال يحقق مؤشر قيمة أقل من الواحد الصحيح ومن ثم

[١] يمكن الرجوع إلى الشكل رقم (٤-٣)

[٢] يمكن الرجوع إلى الجدول (٤-١)

[٣] التكلفة المستهدفة لكل مكون = إجمالى التكلفة المستهدفة للمنتج (٣٧٥) × الأهمية النسبية لكل مكون (بالشكل رقم (٤-٣))

يحقق فجوة تكلفة موجبة. أما الاتجاه الثانى فهو تحسين أداء باقى المكونات تباعاً باعتبارها تحقق مؤشر قيمة أكبر من الواحد الصحيح. وستكون الأولوية لدراسة دور التوأم الرقمى فى تحسين أداء الملف الكهربائى، باعتباره أهم مكون من مكونات محرك بدء التشغيل من وجهة نظر العملاء (وفقاً لمصفوفة HoQ الموضحة بالشكل رقم (٤-٣) تصل أهمية الملف الكهربائى إلى ٢٣,٦٪).

٣- **مرحلة التفكير الإبداعى والابتكارى فى ظل التوأم الرقمى:** أوضح الخبراء المشاركون فى مقابلة مجموعة التركيز، أنه فى ظل تطبيق التوأم الرقمى ستتوافر المزيد من الفرص لخلق مزيداً من الأفكار الإبداعية التى تدعم عمليات تحسين القيمة من خلال تقديم اقتراحات تصميمية لتحسين أداء مكونات محرك بدء التشغيل، جنباً إلى جنب مع تلك التى تدعم تخفيض التكلفة. وفى ضوء ما توصلت إليه نتائج المرحلة السابقة يتم تركيز جهود التفكير الإبداعى نحو إيجاد أفضل البدائل التى تحقق خفضاً لتكلفة المبيت، وتحسيناً لأداء الملف الكهربائى، كما يلى:

أولاً: تخفيض تكلفة مبيت محرك بدء التشغيل فى ظل تطبيق التوأم الرقمى:

بدايةً، توفر تكنولوجيا التوأم الرقمى دعماً لمهندسى القيمة عند إجراء هذه المرحلة من خلال تحديد الأعطال التى واجهت الجيل الأخير من مبيت محرك بدء التشغيل وأسبابها ومعدل تكرارها. بالإضافة إلى تقديم توصيات بالحلول التى تحد منها عند تصميم الجيل التالى، كما تدعم تنفيذ تلك الحلول.

وفى هذا الشأن أفاد مهندس الميكانيكا أنه بالرجوع إلى سجل الأعطال وجد أن معظم أعطال مبيت محرك بدء التشغيل ناتجة عن شقوق وفشل هيكلى، وأفاد أن التوأم الرقمى يدعم إجراء تحليل الإجهاد Fatigue Analysis وهو تحليل يكشف الضرر الهيكلى الذى يحدث عندما يتعرض المبيت للأحمال الدورية[١]. فالنتائج عالية الإجهاد تشير إلى حدوث تصدع أو تشقق فى هيكل المبيت. ومن خلال المراقبة الديناميكية لأداء مبيت الجيل الأخير لمحرك بدء التشغيل التى يحققها التوأم الرقمى، تتوافر وسيلة أكثر دقة لاستقراء مستوى الإجهاد فى كافة أجزائه، وكذلك التعرف على بداية ظهور التصدع ومدى انتشاره والضرر الناتج عنه. ويعزز تحسين دقة قياس الضرر الهيكلى للمبيت قدرة مهندسى القيمة على تحديد بدائل التصميم -استبدال المادة الخام المصنعة للمبيت وهى مادة الألومنيوم Aluminum بمادة البولى أميد المقواة بالألياف الزجاجية Glass fiber-reinforced polyamide (GFRP) أو مادة الفولاذ Steel أو مادة حديد الزهر Cast-

[١] تحدد الأحمال الدورية الضغوط المتكررة repeated stresses وشدة تلك الضغوط stress intensities التى تتعرض لها المكونات الهيكلية للمبيت.

iron– التى تخفض مستوى الإجهاد المتوقع لمبيت الجيل الجديد من المحرك إلى أدنى حد ممكن فى اتجاه تخفيض تكلفته مع تحسين مستوى أداءه.

ثانياً: تحسين أداء الملف الكهربائى لمحرك بدء التشغيل فى ظل تطبيق التوأم الرقمى:

أفاد كل من مهندسى الميكانيكا والتطوير أثناء مقابلة مجموعة التركيز، أنه فى ضوء توصيات التوأم الرقمى الناتجة عن سجل الأعطال الوارد بالجدول رقم (٤-٧) يمكن توجيه عملية تحسين مستوى أداء الملف الكهربائى فى اتجاهين: الأول يتعلق بتحديد دقيق لدرجة الحرارة القصوى التى يعمل عندها الملف بكامل طاقته، حيث قد تتسبب درجات الحرارة العالية[١] داخل الملف فى فقدان خصائصه المغناطيسية وتوقف العمل. وأضافا أنه فى كثير من الأحيان يتم الاعتماد على مراقبة طاقة الإدخال input power والتيار current والجهد voltage لتوفير معلومات حول درجة حرارة الملف، إلا أنه عادة ما تعطى نتائج غير دقيقة. فى حين أن الاعتماد على تكنولوجيا التوأم الرقمى يحقق مراقبة وتتبع لدرجة حرارة الملف الكهربائى عبر المستشعرات وإجراء تقييم تشخيصى diagnostic evaluation لها باستمرار، وهو ما يتيح الكشف عن درجات الحرارة الحالية والتنبؤ بها مستقبلاً. ومن ثم ضمان ألا تتعدى درجة حرارة الملف درجة الحرارة القصوى.

أما الإتجاه الثانى فيتعلق بتخفيض احتمالات حدوث خلل ميكانيكى، وخاصةً ذلك الناتج عن تلف المحامل (رولمان البلى). وفى هذا الشأن أوضح مهندس الميكانيكا أن التوأم الرقمى يقوم بتحديد مصادر الاهتزاز والانبعاثات الصوتية وقياسها، ومقارنة النتائج بالقياسات المسجلة ببداية العمر الإنتاجى للملف. وهو الأمر الذى يوفر أساساً معرفياً لتقييم أداء الملف الكهربائى فى الواقع الفعلى– قياس مصادر الاهتزاز.

٤- **مرحلة التقييم فى ظل التوأم الرقمى:** أكد مدير التصميم أن إجراء محاكاة للبدائل المقترحة التى تم التوصل إليها فى المرحلة السابقة من خلال الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى لمحرك بدء التشغيل يساهم فى تحديد المجموعة المثلى من الإجراءات التى يؤدى اتخاذها إلى تحسين أداء الملف الكهربائى لمحرك بدء التشغيل، حيث أنها تتم فى ضوء عرض تمثيلى دقيق وواضح للأجزاء المكونة للملف مصحوبة بتقدير تفصيلى لتكلفة كل جزء من أجزائه.

وفى ذات السياق، أضاف كل من مهندسى الميكانيكا والتطوير أن عملية تقييم بدائل تخفيض تكلفة المبيت فى ضوء تحليل الإجهاد Fatigue Analysis الذى يدعمه العمل فى ظل التوأم الرقمى, قد يساهم فى تحسين قدرة فريق القيمة على اختيار البديل الأفضل. ففى إطار عملية

[١] يرجع ارتفاع درجة حرارة الملف إلى عدة أسباب من بينها أن تكون ظروف بيئة عمل الملف غير متوافقة مع تلك المحددة بمواصفات التصميم.

تقييم استبدال المادة الخام للمبيت من مادة الألومنيوم إلى مادة البولى أميد المقواة بالألياف الزجاجية (GFRP) باعتباره البديل الذى يحقق خفضاً للتكلفة وتحسيناً للأداء كما تم التوضيح تفصيلاً بالقسم الأول من هذا المبحث، فإن محاكاة المبيت المُصنع من مادة GFRP فى ظل عدة متغيرات من بينها مستوى الإجهاد Fatigue Level المتوقع ومواصفات بيئة التشغيل والتكلفة الحالية، مع الأخذ فى الاعتبار الجوانب الميكانيكية والحرارية للتشغيل، سيسمح بتحديد دقيق لسُمك جدار المبيت المناسب. وقد أفاد كل من مهندس الميكانيكا ومقدر التكلفة –فى ضوء الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى لمحرك بدء التشغيل – أنه فى ضوء نتائج المحاكاة يمكن تخفيض سُمك جدار المبيت قيد الدراسة بمقدار ٣٠ جراماً وهو ما يحقق خفضاً للتكلفة الكلية للمبيت بنسبة تصل إلى ٦٪ تقريباً، هذا بالإضافة إلى نسبة الخفض ١٥٪ الناتجة عن استبدال المادة الخام المصنعة بمادة (GFRP) لتصل نسبة الخفض فى إجمالى التكلفة إلى ٢١٪.

وفى إطار ذلك تم حساب التكلفة على مستوى المكونات للتعرف على تأثير اعتماد مقترح هندسة القيمة فى ضوء تكنولوجيا التوأم الرقمى على الوصول إلى التكلفة المستهدفة، وهو ما تم توضيحه بالجدول رقم (٤-١٠).

جدول رقم (٤-١٠)

تحديد فجوة التكاليف لكل مكون فى ظل البديل المقترح فى ضوء تكنولوجيا التوأم الرقمى

(القيمة بالدولار)

المكون	تكلفة المكونات فى ظل البديل المقترح (١)	التكلفة المستهدفة على مستوى المكون[1] (٢)	فجوة التكاليف (١)-(٢)
الملف الكهربائى	٨٥,٠٠	٨٨,٥٠	(٣,٥٠)
عضو الإنتاج	٥٦,٥٠	٥٩,٦٢	(٣,١٢)
ملف المجال	٥٦,٠٠	٥٩,٦٢	(٣,٦٢)
ذراع الدفع	٣٥,٥٠	٣٧,٥٠	(٢,٠٠)
عمود الدفع	٣٤,٥٠	٣٧,٨٧	(٣,٣٧)
المكبس	١٤,٠٠	١٥,٣٨	(١,٣٨)
ترس البينون	٤٠,٠٠	٤٠,١٣	(٠,١٣)
مبيت أمامى وخلفى	[2]٥٤,١٢	٣٦,٣٨	١٧,٧٤
	٣٧٥,٦٢	**٣٧٥**	**٠,٦٢**

[1] يمكن الرجوع إلى جدول (٤-٩)

[2] فى إطار البديل المقترح تنخفض التكلفة الحالية بنسبة ٢١٪ (١٥٪ الناتجة عن استخدام مادة GFRP+ ٦٪ الناتجة عن تخفيض سمك جدار المبيت)= ٦٨,٥٠- (٦٨,٥٠× ٢١٪) =٥٤,١٢ دولار.

ومن خلال الجدول السابق يتضح أن تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى قد ساهم فى تخفيض تكلفة محرك بدء التشغيل وتحقيق التكلفة المستهدفة والمقدرة–إلى حد كبير– فى ضوء امكانيات التكنولوجيا.

٣/٤ تحليل نتائج تطبيق المنظومة المقترحة لاختبار الفرض الرئيسى للبحث

تطلب اختبار الفرض الرئيسى للبحث توضيح مساهمة تكنولوجيا التوأم الرقمى فى دعم الهدف من تطبيق أساليب الإدارة الاستراتيجية للتكلفة بمرحلة تصميم محرك بدء التشغيل، وهو ما تم التوصل إليه من خلال النقاط التالية:

١- يدعم تطبيق المنظومة المقترحة تحديد التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل من خلال توفير امكانية محاكاة مسببات حدوث التكلفة على مدار دورة حياة الجيل الأخير للمحرك، والتى تساهم فى التحديد الدقيق لهدف خفض التكلفة القابل للتحقق عند تصميم الجيل الجديد. فقد اتضح من الدراسة أنه فى ضوء التقديرات المتوقعة من الإصدار التجريبى للتوأم الرقمى يمكن زيادة مستوى خفض التكلفة الممكن تحقيقه لمحرك بدء التشغيل بنسبة قد تصل إلى ٢٥٪.

٢- يدعم تطبيق المنظومة المقترحة تحقيق التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل ومكوناته من خلال دعم الهدف من أسلوب هندسة القيمة، والذى يتمثل فى تحقيق المستوى المستهدف لتكلفة المحرك عبر تحديد مواطن التكلفة غير الضرورية وايجاد بدائل ابتكارية لتخفيضها مع الحفاظ على مستوى الأداء. وذلك من خلال:

- توفير تمثيل وظيفى للأجزاء المكونة لمحرك بدء التشغيل فى ظل تكلفة كل مكون، حيث تتوافر بيانات عن كافة المكونات مع تحليل للأسباب التى أثرت على أداء هذه المكونات – إن وجدت– خلال مراحل دورة حياة الجيل الأخير ومدى تأثر الوظيفة التى يؤديها كل مكون بتلك الأسباب بالتفصيل.
- امكانية إجراء محاكاة دقيقة لأداء مكونات محرك بدء التشغيل وتكلفة كل مكون خلال مراحل دورة حياة الجيل الأخير فى ظل ظروف الاستخدام الفعلية. وفى ضوء نتائج المحاكاة يتم تقديم توصية لتوجيه عملية تحسين القيمة بالجيل الجديد من محرك بدء التشغل إما خفضاً للتكلفة أو تحسيناً للأداء أو كلاهما.
- توفير المزيد من الفرص لخلق مزيد من الأفكار الإبداعية التى تدعم عمليات تحسين القيمة من خلال تقديم اقتراحات تصميمية لتحسين أداء مكونات محرك بدء التشغيل جنباً إلى جنب مع تلك التى تدعم تخفيض التكلفة.

٣- يدعم تطبيق المنظومة المقترحة تحقيق التكلفة المستهدفة على مستوى محرك بدء التشغيل ومكوناته من خلال دعم الهدف من تطبيق مصفوفة QFD، والمتمثل فى تحقيق المستوى المستهدف لتكلفة المحرك فى ضوء مستوى الأداء الذى يتوقعه العملاء. ويتحدد هذا المستوى عبر تقييم أهمية كل مكون من مكونات المحرك فى تلبية احتياجات العملاء. وذلك من خلال:

- تحقيق رؤية أكثر شمولاً حول الاحتياجات الضمنية للعملاء والناتجة عن تقييمهم لأداء المحرك فى ظل سيناريوهات التشغيل المختلفة. بالإضافة إلى تقييم أهمية هذه الاحتياجات عبر تحديد اتجاه الاحتياجات المشتركة.
- تقديم مؤشرات حول أداء مكونات محرك بدء التشغيل ناتجة عن رصد لتفاعل العملاء مع المحرك عبر أجهزة الاستشعار. وتوفير بيانات فعلية حول سيناريوهات تشغيله مع إجراء تحليل شامل لهذا التفاعل، وتقديم توصيات لمهندسى القيمة بشأن المكونات الأكثر تأثيراً على احتياجات العملاء.

وقد تمثلت نتائج العمل فى ظل المنظومة المقترحة فى تحقيق مستوى خفض التكلفة المحدد فى ضوء تكنولوجيا التوأم الرقمى من خلال دعم أهداف هندسة القيمة ومصفوفة QFD. وذلك عبر خفض سُمك جدار المبيت (باعتباره المكون الذى يقل مؤشر قيمته عن الواحد الصحيح ويحقق فجوة تكلفة موجبة) بمقدار ٣٠ جراماً، وهو ما حقق خفضاً للتكلفة بنسبة وصلت إلى ٦٪ تقريباً. وتحسين مستوى أداء الملف الكهربائى (باعتباره أهم مكون من مكونات محرك بدء النشغيل من وجهة نظر العملاء، حيث وصلت الأهمية النسبية له إلى٢٣,٦٪) من خلال تتبع درجة حرارة الملف عبر المستشعرات وتقييمها باستمرار للكشف عن درجات الحرارة الحالية والتنبؤ بها مستقبلاً. بالإضافة إلى تحديد مصادر الاهتزاز والانبعاثات الصوتية وقياسها، ومقارنة النتائج بالقياسات المسجلة ببداية العمر الإنتاجى للملف.

وفى ضوء النتائج السابقة يتضح للباحثون أن تطبيق تكنولوجيا التوأم الرقمى يساهم فى تحسين قدرة أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة محرك بدء التشغيل على تحقيق الهدف من تطبيقها. وهو ما يعنى قبول الفرض الرئيسى للبحث، والذى ينص على أنه: توجد علاقة بين استخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى وتحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة المنتج بمرحلة التصميم.

قائمة المراجع

أولا : المراجع العربية

أ- الرسائل العلمية:

١- آية محمد سيد محمد، "منظومة مقترحة لاستخدام تكنولوجيا التوأم الرقمى (Digital Twin) فى تحسين فعالية أساليب الإدارة الاستراتيجية لتكلفة تصميم المنتج لدعم استدامة الأرباح"، **رسالة دكتوراه غير منشورة**، كلية التجارة – جامعة الأزهر، ٢٠٢٤.

ثانيا : المراجع الأجنبية

A-Books

1- Yang, M., Rana, P. & Evans, S., (2018), "***Engineering for Sustainable Value***", First Edition, Switzerland.

2- Zhang, M., Fangyuan, S., Liu, M., & Tao, F., (2020), "***Digital Twin Driven Smart Product Design Framework***", First Edition, United Kingdom.

B-Periodicals

1- Ahn, H., Clermont, M., & Schwetschke, S., (2018), "Research on Target Costing: Past, Present and Future", ***Management Review Quarterly,*** Vol. 68, No. 3: 321-354.

2- AL-Khasawneh, S. M., Jrairah, T. S., & Endut, W. A., (2019), "The Relationship between Target Costing Method and Pricing- Development of Products in Industrial Companies", ***International Business and Accounting Research Journal,*** Vol. 2, Issue. 3: 107- 118.

3- Alawaed, H. M. A. (2022), "Integration of Quality Function Deployment, Target Costing and Value Engineering to Improve Product Value (Applied Research in the State Company for Textile Industries /Hilla Textile Factory), ***World Economics and Finance Bulletin,*** Vol. 9, No. 1: 51-62.

4- Arnemann, L., Winter, S., Quernheim, N., Grieser, P., Anderl, R., & Schleich, B., (2023), "Information Model to Return Data of Digital Twins into Product Design", ***Procedia CIRP***, Vol. 116, No. 1: 173-178.

5- Becker, D. M., & Gaivoronski, A. A., (2017), "Optimization Approach to Target Costing Under Uncertainty with Application to ICT-Service", ***International Journal of Production Research,*** Vol. 56, No. 5: 1904-1917.

6- Bellalouna, F., (2022), "Case Study for Design Optimization Using the Digital Twin Approach", ***Procedia CIRP***, Vol. 100, No. 1: 595-600.

7- Dahooie, J. H., Dehshiri, S. J. H., Banaitis, A., & Binkytė-Vėlienė, A., (2020), "Identifying and Prioritizing Cost Reduction Solutions in the Supply Chain by Integrating Value Engineering and Gray Multi-Criteria Decision-Making", ***Technological and Economic Development of Economy,*** Vol. 26, No. 6: 1311-1338.

8- Danso, H., & Kwadwo, R. O., (2020), "Assessment of Value Engineering Implementation in the Ghanaian Construction Sector", ***Journal of the Institution of Engineers,*** Vol. 101, No. 1: 7-17.

9- Darmawan, H., Purba, H., Rezeki, R., Hidayat, N., Siregar, A., Retna, F., & Aisyah, A., (2017), "Product Development Strategy with Quality Function Deployment Approach: A Case Study in Automotive Battery. ***Management Science Letters,*** Vol. 7, No. 12: 601-610.

10- Dehe, B., & Bamford, D., (2017), "Quality Function Deployment and Operational Design Decisions– a Healthcare Infrastructure Development Case Study", ***Production Planning & Control,*** Vol. 28, No. 14: 1177-1192.

11- Durmaz, Y., & Dusun Z. D., (2016), "Importance of Strategic Management in Business", ***Expert Journal of Business and Management,*** Vol. 4, Issue. 1: 38-45.

12- El-Dalahmeh, S., (2018), "Extent of Implementing Target Costing and Value Engineering Approach to Reducing Costs: A Survey in Jordanian Shareholding Companies for Food Industries", ***Asian Journal of Finance & Accounting,*** Vol. 10, No. 1: 390-406.

13- Erkoyuncu, J. A., Amo, I. F., Ariansyah, D., Bulka, D., & Roy, R., (2020), "A Design Framework for Adaptive Digital Twins", ***CIRP annals-Manufacturing Technology,*** Vol. 69, No. 1: 145-148.

14- Farsi, M., Ariansyah, D., Erkoyuncu, J. A., & Harrison, A., (2021), "A Digital Twin Architecture for Effective Product Lifecycle Cost Estimation**.** ***Procedia CIRP,*** Vol. 100, No. 1: 506- 511.

15- Ghosh, D., Olewnik, A., Lewis, K., Kim, J., & Lakshmanan, A., (2017), "Cyber-Eempathic Design: A Data-Driven Framework for Product Design", ***Journal of Mechanical Design,*** Vol. 139, No. 9: 1-18.

16- Ginting, R., & Ishak, A., (2020), "An Integrated of AHP–QFD Methodology For Product Design: A Review", ***Industrial Engineering Scientific Journal,*** Vol. 8, No. 1: 69 -78.

17- Gua, Y., Heb, S., (2019), "Target Costing as a Facilitating Method for Aerospace Product Development", ***International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR),*** Vol. 44, No. 2: 75 -86.

18- Haron, N. Z., & Kairudin, F. L. M. (2012), "The application of quality function deployment (QFD) in the design phase of industrialized building system (IBS) apartment construction project", ***European International Journal of Science and Technology***, Vol. 1, No. 3: 56-66.

19- He, B., & Bai, K. J., (2021), "Digital Twin- based Sustainable Intelligent Manufacturing: A Review", ***Advances in Manufacturing***, Vol. 9, No. 1: 1- 21**.**

20- Kissi, E., Boateng, E. B., Adjei-Kumi, T., & Badu, E., (2016), "Principal Component Analysis of Challenges Facing the Implementation of Value Engineering in Public Projects in Developing Countries", ***International Journal of Construction Management,*** Vol. 17, No. 2: 1-10.

21- Lapinskienė, V., & Martinaitis, V., (2017), "The Development of Conceptual Building Design Technology, Using Quality Function Deployment and Axiomatic Design", ***Future of Lithuania***, Vol. 9, No. 4: 462-469.

22- Lee, J., Azamfar, M., Singh, J., & Siahpour, S., (2020), "Integration of Digital Twin and Deep Learning in Cyber-Physical Systems: towards Smart Manufacturing", ***The Institute of Engineering and Technology,*** ISSN 2516-8398: 1- 3.

23- Lim, K. Y. H., Zheng, P., Chen, C. H., & Huang, L., (2020), "A Digital Twin Enhanced System for Engineering Product Family Design and Optimization", ***Journal of Manufacturing Systems,*** Vol. 57, No. 1: 82-93**.**

24- Lima, A. C., Silveira, J. A. G. D., Silva, S. H. F. D., & Ching, H. Y., (2016), "Target Costing: Exploring the Concept and its Relation to

Competitiveness in Agribusiness", ***Custos e @gronegócio on line ,*** Vol. 12, No. 3: 11-25.

25- Liu, J., Zhou, H., Tian, G., Liu, X., & Jing, X. (2019), "Digital Twin-based Process Reuse and Evaluation Approach for Smart Process Planning", ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,*** Vol. 100, No. 5: 619- 634.

26- Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y., (2021), "A Review of Digital Twin in Product Design and Development", ***Advanced Engineering Informatics***, Vol. 48, No. 1: 1-15.

27- Mishra, L., (2016), "Focus Group Discussion in Qualitative Research", ***An International Journal of Educational Technology***, Vol. 6, No. 1: 1-5.

28- Park, C. S., Kim, H. J., Park, H. T., Goh, J. H., & Pedro, A., (2017), "BIM-based Idea Bank for Managing Value Engineering Ideas", ***International Journal of Project Management,*** Vol. 35, No. 4: 699-713.

29- Pazarceviren, S. Y., & Celayir, D., (2013), "Target Costing Based on the Activity-Based Costing Method and a Model Proposal", ***European Scientific Journal,*** Vol. 4, No. 1: 1-21.

30- Qi, Q., & Tao, F., (2018), "Digital Twin and Big Data towards Smart Manufacturing and Industry 4.0: 360 degree comparison", ***IEEE Access,*** Vol. 6, Issue. 1: 3585- 3593.

31- Qi, Q., Tao, F., Zuo, Y., & Zhao, D., (2018), "Digital Twin Service towards Smart Manufacturing", ***Procedia CIRP,*** Vol. 72, No. 1: 237- 242.

32- Rad, K. M., & Yamini, O. A., (2016), "The Methodology of Using Value Engineering in Construction Projects Management", ***Civil Engineering Journal***, Vol. 2, No. 6: 262-269.

33- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020), "Digital Twin: Values, Challenges and Enablers from a Modeling Perspective", ***IEEE Access,*** Vol. 8, No. 1: 21980- 22012.

34- Rodado, N. D., Barrios, O. M., Escorcia, H. D., Paggetti, C., Noffrini, L., & Fratea, N., (2020), "Smart Product Design Process through the Implementation of a Fuzzy Kano-AHP-DEMATEL-QFD Approach", ***Applied Sciences,*** Vol. 10, No. 5: 1-28.

35- Schleich, B., Dittrich, M. A., Clausmeyer, T., Damgrave, R., Erkoyuncu, J. A., Haefner, B., & Wuest, T., (2019), "Shifting Value Stream Patterns

along the Product lifecycle with digital twins. ***Procedia CIRP***, Vol. 86, No. 1: 3-11.

36- Selim, E. A. M., Abd el Rahman Meetkees, O., & Hagag, M. R., (2017), "Value Engineering (VE) Application in Infrastructure Projects by Public-Private Partnerships(PPPs)", ***International Journal of Applied Engineering Research,*** Vol. 12, No. 20: 367-375.

37- Shikata, H., Yamashita, T., Arai, K., Nakano, T., Hatanaka, K., & Fujikawa, H., (2019), "Digital Twin Environment to Integrate Vehicle Simulation and Physical Verification, ***SEI Technical Review,*** Vol. 88, No. 1: 18-21.

38- Stadtherr, F., & Wouters, M., (2021), "Extending Target Costing to Include Targets for R&D Costs and Production Investments for a Modular Product Portfolio—A Case Study", ***International Journal of Production Economics***, Vol. 232, No. 1: 1-16.

39- Tao, F., Sui, F., Liub, A., & Qi, Q., (2018), "Digital Twin- Driven Product Design Framework", ***International Journal of Production Research,*** ISSN: 0020-7543: 1- 19.

40- Wang, H., Li, H., Wen, X., & Luo, G., (2021b), "Unified Modeling for Digital Twin of a Knowledge- based System Design", ***Robotics and Computer- Integrated Manufacturing,*** Vol. 68, No. 1: 1-12**.**

41- Wang, Y., Ren, W., Li, Y., & Zhang, C., (2021a), "Complex Product Manufacturing and Operation and Maintenance Integration based on Digital Twin", ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,*** Vol. 117, No. 1: 361-381.

42- Wang, Y., Wang, X., & Liu, A., (2020), "Digital Twin-Driven Analysis of Design Constraints", ***Procedia CIRP***, Vol. 91, Issue. 1: 716-721.

43- Wolniak, R., (2018), "The Use of QFD Method Advantages and Limitation", ***Production Engineering Archives,*** Vol. 18, No. 1: 14- 17.

44- Wu, C., Chen, T., Li, Z., & Liu, W., (2021a), "A Function-Oriented Optimizing Approach for Smart Product Service Systems at the Conceptual Design Stage: A Perspective from the Digital Twin Framework, ***Journal of Cleaner Production,*** Vol. 297, No. 1: 1- 20.

45- Wu, C., Zhou, Y., Pessôa, M. V. P., Peng, Q., & Tan, R., (2021b), "Conceptual Digital Twin Modeling based on an Iintegrated Five-

Dimensional Framework and TRIZ Function Model", ***Journal of manufacturing systems***, Vol. 58, No. 1: 79-93.

46- Yang, J., Baeg, H., & Moon, S., (2014), "Utilization of Contradiction for Creating Design Alternatives in Construction Value Engineering", ***KSCE Journal of Civil Engineering,*** Vol. 18, No. 2: 355-364.

47- Yang, S., Liu, J., Wang, K., & Miao, Y., (2016), "An Uncertain QFD Approach for the Strategic management of logistics services. ***Mathematical Problems in Engineering***, Vol. 2016, No. 1: 1-10.

48- Yükçü S., & Koçakoğlu Ö. G., (2015), "Target Cost approach as a Tool in Supply Chain Management: A Case Study", ***Accounting and Auditing Review,*** ISSN: 1307-6639: 1- 30.

49- Zhang, Z. J., Gong, L., Jin, Y., Xie, J., & Hao, J., (2017), "A Quantitative Approach to Design Alternative Evaluation based on Data-Driven Performance Prediction***. Advanced Engineering Informatics***, Vol. 23: 52-65.

50- Zheng, P., & Lim, K. Y. H., (2020), "Product Family Design and Optimization: A Digital Twin-enhanced Approach", ***Procedia CIRP***, Vol. 93, No. 1: 246-250.

51- Zheng, Y., Yang, S., & Cheng, H., (2019), "An Application Framework of Digital Twin and its Case Study", ***Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing,*** Vol. 10, No. 1: 1141 - 1153.

B-Thesis

1- Alkhereibi, A. H., (2017), "A Framework for Value Engineering Methodology Application Using Building Information Modeling (BIM)", ***Master Thesis,*** The Islamic University Gaza, Palestine.

2- Shaik, I., (2019), "Utilizing a Modern Quality Function Deployment Process in Ship Modularization", ***Master thesis,*** Aalto University, Finland.

C- Conferences

1- Abburu, S., Berre, A. J., Jacoby, M., Roman, D., Stojanovic, L., & Stojanovic, N., (2020), "Cognitive Digital Twins for the Process Industry", ***In Proceedings of the Twelfth International Conference on Advanced Cognitive Technologies and Applications***, Nice, France: 25-29. Retrieved on 10-12-2021, From

https://www.researchgate.net/profile/Dumitru-Roman/publication/343235789_Cognitive_Digital_Twins_for_the_Process-Industry.pdf

2- Detzner, A., & Eigner, M., (2018), "A Digital Twin for Root Cause Analysis and Product Quality Monitoring", ***In Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference***: 1547-1558. Retrieved on 12-2-2022, From ***https://www.designsociety.org/publication/40558/A+DIGITAL+TWIN+FOR+ROOT+CAUSE+ANALYSIS+AND+PRODUCT+QUALITY+MONITORING***

3- Habe, H., Li, B., Weißenberg, N., Cirullies, J., & Otto, B., (2019), "Digital Twin for Real-Time Data Processing in Logistics", ***In Artificial Intelligence and Digital Transformation in Supply Chain Management: Innovative Approaches for Supply Chains. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)***, Berlin, Germany: 4-28. Retrieved on 12-2-2022, From ***https://www.econstor.eu/handle/10419/209367***

4- Ishak, A., Ginting, R., & Malik, A. F., (2020), "Integration of quality function deployment (QFD) and value engineering in improving the quality of product: A literature review", ***In AIP Conference Proceedings (AIP Publishing LLC, Vol. 2217, No. 1), United States of America***: 1-7. Retrieved on 15-10-2020, From ***https://www.researchgate.net/profile/Aulia_Ishak/publicationt-A-literature-review.pdf***

5- Morandotti, D., & Pelosi, A., (2018), "Toward Digital Twin and Simulation-Driven New Product Development***. In RD Management Conference,*** Milan, Italy: 1-14. Retrieved on 12-1- 2022, From ***https://www.researchgate.net/profile/Dario-Simulation-Driven-New-Product-Development.pdf***

6- Nawar, E A., Backar, S. H., El-Dardiry, M. A., (2017)," Integration of Blitz Quality Function Deployment and Fuzzy Analytical Hierarchy Process in Product Development", ***Proceedings of 85th ISERD International Conference***, Egypt: 73-77. Retrieved on 11-12-2020, From ***https://www.researchgate.net/publication/325719347t***

7- Suteja, T. J., Karim, A., Yarlagadda, P. K., & Yan, C., (2017), "Estimating Life Cycle Cost for a Product Family Design: The Challenges", ***IOP Conference Series: Materials Science and***

Engineering, Volume 273, International Conference on Informatics, Technology and Engineering 2017 (InCITE 2017), ***Indonesia***: 1-7. Retrieved on 12-1-2020, From ***https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/245/1/012026/pdf***

8- Voell, C., Chatterjee, P., Rauch, A., & Golovatchev, J., (2018), "How Digital Twins Enable the Next Level of PLM–A Guide for the Concept and the Implementation in the Internet of Everything Era", ***In IFIP International Conference on Product Lifecycle Management***, Turin, Italy: 238-249. Retrieved on 4-3-2022, From ***https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-01614-2_22***

9- Wao, J., & Mqsi, S., (2015), "A review of the value engineering methodology: Limitations and solutions for sustainable construction", ***In 55th SAVE International Annual Conference: SAVE Value Summit***, ***United States of America***: 1-8. Retrieved on 15-11-2020, From ***https://www.researchgate.net/publication/279298044_/link/5591ca2608ae15962d8e339b/download***

10- Wao, J., Ries, R., Flood, I., & Kibert, C., (2016), "Refocusing value engineering for sustainable construction", ***In 52nd ASC Annual International Conference Proceedings United States of America***: 1-10. Retrieved on 20-11-2020, From ***https://www.researchgate.net/publication/304549946_Refocusing_Value /link/5773409408aeef01a0b6659d/download***

D- Internet:

1- CPA Canada, Chartered Professional Accountants of Canada, (2015), "Managing Environmental Sustainability Using Target Costing Principles": 1-40. Retrieved on 6-9-2020, From ***https://www.Managing-Environmental-Sustainability-Using-Target-Costing-Principles-March-2015%20(2).pdf***

2- DHL Trend Research, (2020), "Digital Twins in Logistics: A DHL Perspective on the Impact of Digital Twins on the Logistics Industry ": 1-39. Retrieved on 17-8-2020, From ***https://www.dhl.com/content/dam/dhl/global/core/documents/pdf/glo-core-digital-twins-in-logistics.pdf***

3- Egbuhuzor, C. A., Akpeekon, B., & Edom, G. O., (2019), "Target Costing and Value Engineering": 1-20. Retrieved on 6-10-2020, From

https://www.researchgate.net/publication/335224106_Target_costing_and_value_engineering/link/5d5851e745851545af4c1448/download

4- HELLA, (2021), "Starters and Alternators Product Expertise", **HELLA White paper**: 1-14, Retrieved on 11-5-2023, From *https://www.hella.com/hella-ae/assets/media/Alternator-and-Starters.pdf*

5- Lee, J., (2023), "What is the Strength-to-Weight Ratio, and Why Does it Matter to Engineers?" Retrieved on 12-6-2023, From *https://www.china-machining.com/blog/strength-to-weight-ratio/*

6- Lohrey, J., (2017), "The Disadvantages of Quality Function Deployment". Retrieved on 12-11-2020, From *https://bizfluent.com/info-8705664-disadvantages-quality-function-deployment.html*

7- Saravi, M., Newnes, L., Mileham, A. R., & Goh, Y. M., (2019), "Estimating Cost at the Conceptual Design Stage to Optimize Design in Terms of Performance and Cost": 1-9. Retrieved on 15-10-2020, From *https://repository.lboro.ac.uk/ndownloader/files/17190629/1*

8- SAVE, The Society of American Value Engineers, (2020), "About Value Engineering": 1-9. Retrieved on 12-11-2020, From *https://www.value-eng.org/page/AboutVE*

9- Siemens, Siemens Industry Software, (2020), "Simulation & Digital Twin", 1-28. Retrieved on 15-1-2022, From *https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:ce77eef2-3ae4-4910-9d88-e57697aa0196/SimulationDigitalTwinOutlook2030.pdf*

10- Slagmulder, R., (2018), "Target Costing". Retrieved on 15-10-2020, From *https://phdessay.com/target-costing/*

11- The Institute of Chartered Accountants of India, (2019), "Strategic Cost Management and Performance Evaluation":1- 316. .Retrieved on 13-11-2020, From *https://www.srinivasaacademy.com/downloads/266/203_Paper-5Part-C.pdf*

12- Xia, L., Jianfeng, L., Zhang, H., Xu, M., Li, Z., & Wang, S., (2021), "A DTMEs- Based Digital Twin System Construction Method for Smart Factory": 1-27. Retrieved on 15-10-2021, From *https://www.researchsquare.com/article/rs-633211/latest.pdf*

13- Zhejiang Songtian Automotive Motor, (2023), "Starter Motor Detention and Function". Retrieved on 14-5-2023, From *https://sontianmotor.com/starter-motor-definition-and function/#What_is_Starter_Motor*