

تصميم وتصنيع قالب تثبيت مقلة العين للتدريب الجراحي باستخدام تقنية النمذجة السريعة

عبد الله الهادي شاهين

كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الصناعية مصراتة، ليبيا
shahhen106@gmail.com

الحسن أبو بكر الزعولك

كلية التقنية الصناعية، قسم هـ. الكهروميكانيكية مصراتة، ليبيا
hasanzalok@gmail.com

عبد العظيم سالم باله

كلية التقنية الصناعية، قسم الهندسة الصناعية مصراتة، ليبيا
Abduladim_bala@cit.edu.ly

تستخدم الطباعة ثلاثية الأبعاد في العديد من المجالات كالصناعات الهندسية مثل صناعة السيارات والطائرات، وفي العمارة مثل بناء المساكن الجاهزة، والصناعات الطبية مثل نمذجة الصور الطبية لأعضاء جسم الإنسان الداخلية، كما أشارت الدراسات الحديثة إلى الشروع في طباعة الأعضاء البشرية الحية بهدف إنتاج أعضاء بديلة [3].

وتتميز الطباعة ثلاثية الأبعاد عن غيرها من تقنيات التصنيع التقليدية بالدقة الفائقة والجودة العالية للمجسمات التي تقوم الطابعات بصناعتها؛ وذلك لإعتمادها الكامل على السيطرة الرقمية للحاسوب. كما أنها تتيح تصنيع تصاميم معقدة في عملية إنتاجية واحدة توفر خلالها الكثير من الجهد والمال والوقت، في حين تحتاج التقنيات التقليدية إلى تدخل الكثير من العمليات الإنتاجية لتحقيق نفس الهدف [4]. في بداية ظهور هذه التقنية، كانت قلة المواد الخام المناسبة، التحدي الأكبر الذي واجهه التقنيون وحدهم من انتشارها. ولكن مع تطور الأبحاث استطاعت الشركات المتخصصة من إضافة العديد من المواد، الأمر الذي فتح الباب على مصرعيه أمام التقنية لإقتحام تطبيقات جديدة كانت غير ممكنة بسبب محدودية المواد وعدم ملائمتها لكثير من التطبيقات [5].

وبناء على توقعات الشركات المتخصصة في مجال الطباعة ثلاثية الأبعاد فإن السنوات القادمة ستشهد العديد من التطورات والابتكارات الجديدة في مجال الطابعات ثلاثية الأبعاد 3D وهو ما سيزيد قدرتها على الاستمرار في مختلف المجالات الصناعية والخدمية خصوصاً مع زيادة الفهم من مختلف الشركات لضرورة إحلال هذه التقنية الذكية بدلاً عن التقنيات التقليدية [6].

يهدف هذا البحث إلى إلقاء الضوء على أحدث تقنيات التصنيع الذكية وما أحدثته من قفزة نوعية في عالم التصنيع في مختلف التطبيقات. ونشر المعرفة حول هذه التقنية الحديثة وما يمكن أن تقدمه من خدمات نوعية يستفيد منها الإنسان في إنتاج منتجات معقدة بتكلفة منخفضة وفي زمن قياسي يصعب منافستها باستخدام تقنيات التصنيع التقليدية. كما يهدف البحث إلى تقديم مثال عملي لإنتاج منتج نهائي يعرض من خلاله ما تتمتع به هذه التقنية من إمكانيات عالية تحقق توفير قيم للجهد والمال والوقت وتمكن من إنتاج منتجات معقدة التصميم والتعديل في تصميماتها بدون أي كلفة إضافية.

1. التصنيع بالإضافة

التصنيع بالإضافة (AM) أو النمذجة السريعة (Rapid Prototyping) هما مصطلحان يشيران إلى ذلك المجال من العمليات الصناعية التي يتم فيها بناء المنتج عن طريق إضافة طبقات من المادة طبقة فوق الأخرى ابتداء من القاعدة وانتهاء بالقمة، وهذه الطريقة في بناء النماذج يشار إليها بالمصطلح التصنيع بالإضافة. أما مصطلح النمذجة السريعة فهو فيه إشارة إلى سرعة هذه التقنية في بناء النماذج مهما بلغت درجة تعقيدها خلال عملية إنتاجية وحيدة، على عكس ما يتم في الطرق التقليدية التي لا مناص فيها من استخدام عدة عمليات لإنتاج نفس المنتج وهذا يترتب عليه زمن وكلفة يفوقان بكثير ما هو عليه الحال في تقنية التصنيع بالإضافة.

نظراً لإعتماد التقنية اعتماداً كلياً على السيطرة الحاسوبية في بناء منتجاتها، وأسلوب عملها المعتمد على إضافة المادة حسب المسارات التي يحددها الحاسوب، فإن التغيير في التصميم لأي منتج لا يضيف أي تكلفة إضافية للمنتج. لهذا السبب فإن هذه التقنية فعالة جداً في الأنظمة الإنتاجية المعتمدة لأسلوب الإنتاج حسب الطلب، في حين أن التقنيات التقليدية تصلح للإنتاج الكمي الذي يعتمد إنتاج كميات كبيرة لنفس المنتج (التصميم).

لقد كانت بداية ظهور هذه التقنية في عام 1980 حيث قام المهندس الياباني تشارلس هال (Charles Hull) الذي كان يعمل في أحد الشركات الأمريكية بولاية كاليفورنيا العاملة في تصنيع المنتجات البلاستيكية من البوليمرات الحساسة

المخلص—تقنية النمذجة بالصبور والترسيب هي أحد تقنيات التصنيع بالإضافة أو ما يعرف بالطباعة ثلاثية الأبعاد. تقنية جديدة اقتحمت جميع المجالات الصناعية والخدمية، انتشر استخدامها بشكل واسع وذلك لما لها من قدرات كبيرة مستمدة من قدرات الحاسبات الآلية، فهي قادرة على تصنيع المنتجات ذات التصاميم المعقدة وفي عملية إنتاجية واحدة وبدون الحاجة لأي مهارات يدوية ولا قوالب تشكيل. اختص هذا البحث بتوظيف هذه التقنية لإنتاج أحد المعدات الطبية (قالب تثبيت مقلة العين لغرض التدريب الجراحي والتخطيط للعمليات) المستخدمة في قسم طب وجراحة العيون بمستشفى الطوارئ مصراتة، وذلك لتلبية إحتياج المستشفى لهذه المعدة بسبب عدم توفرها بالسوق المحلي وارتفاع تكلفة استيرادها من الخارج. لقد تم استخدام أسلوب الهندسة العكسية في تصميم القالب بالإعتماد على الصور المتاحة في الأسواق الإلكترونية وتحقيق ما طلبه الأطباء من خصائص ووظائف إضافية على ما موجود بالمنتجات المتاحة بالسوق العالمية. تم إنتاج النسخة الأولى للقالب واختيارها على مرحلتين؛ الأولى التأكد من مقاسات القالب والثانية اختبار الوظيفة التي تمت في المستشفى بمعرفة الأطباء أصحاب العلاقة وكانت النتائج مرضية جداً، باستثناء بعض التعديلات التي تحسن من أداء القالب. تم إصدار النسخة الثانية من المنتج متضمنة كل التعديلات والإضافات التي طلبتها الجهة المستخدمة وإضافة تعديلات أخرى قيمة حسنت من أداء المنتج. كما تم احتساب الكلفة الكلية للقالب وإعادة تقييمه بطريقتين؛ الأولى تضمنت إستهلاك وجه مرة ثانية للجهة المستخدمة وكانت النتائج ممتازة، والثانية عن طريق مقارنته بمنتجات مماثلة، حيث أشارت نتائج المقارنة إلى كفاءة التقنية العالية جداً في إنتاج منتجات مناسبة وبتكلفة منخفضة جداً.

Fused Deposition Modeling

الكلمات المفتاحية: Flashprint, Flashforge Pro, Solid Works, Eye Holder.

1. المقدمة

تعد تقنية التصنيع بالإضافة (Additive Manufacturing) الثورة الصناعية الرابعة التي تم فيها استبدال المهارات اليدوية بالسيطرة الرقمية (الحاسوب). شملت هذه الثورة استخدام التقنيات الذكية مثل الطباعة ثلاثية-3 (D Printing)، أو إنتاج منتجات ذكية مثل الروبوتات وأتمنة المصانع والعمليات الإنتاجية. فالطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية مبتكرة تمكنك من إنشاء المجسمات من نموذج رقمي يتم الحصول عليه عن طريق استخدام برمجيات التصميم بمساعدة الحاسوب (CAD)، أو عن طريق الماسح الضوئي ثلاثي الأبعاد أو عن طريق المواقع الإلكترونية التي تعرض تصاميم جاهزة [1]. تنطوي عملية الطباعة على تحويل النموذج (التصميم) الرقمي إلى سلسلة من الشرائح الأفقية عن طريق استخدام برامج معدة لذلك. تقوم الناسخة بطباعتها عن طريق بناء طبقات (دقيقة جداً لا يتجاوز سمكها أجزاء من المليمتر) متراكبة واحدة فوق الأخرى من مادة مجهزة بطرق مختلفة [2].

استلمت الورقة بالكامل في 15 فبراير 2021 وروجعت في 5 أبريل 2021 وقبلت للنشر في 6 أبريل 2021،

ونشرت وماتحة على الشبكة العنكبوتية في 29 أبريل 2021.

ت. خصائص ومواصفات المنتج

من خلال مناقشة الجهة المستخدمة للمنتج تم تحديد الخصائص والمواصفات المطلوب توفرها بالمنتج وذلك لتلبي احتياجات المستخدم ويقوم بالمهمة على أكمل وجه وهي محددة في النقاط التالية:

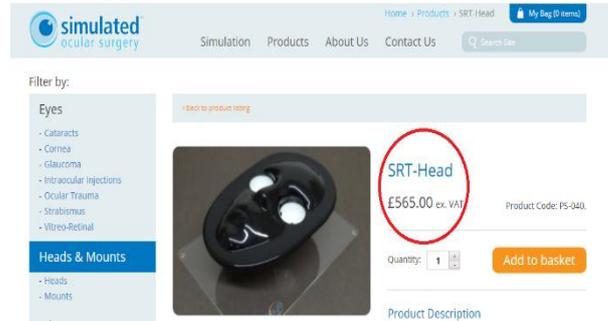
1. ثبات قالب التثبيت على المنضدة عند العمل عليه.
 2. الحفاظ على هيئة العين الكروية ومنعها من الارتخاء والتفلطح.
 3. توجيه سائل التنظيف إلى نقطة مخصصة للتصريف ومنعه من التسرب على سطح القالب.
 4. تصريف سائل التنظيف عبر قناة مخصصة إلى وعاء تجميع السائل.
- لقد تم أخذ جميع توصيات المستخدم المشار إليها في النقاط السابقة كما يلي:
1. نظراً لخفة وزن المادة الخام المستخدمة يعاني المنتج من سهولة الحركة وعدم استقراره أثناء العمل عليه مما يكون مصدر إزعاج للمستخدم. وللتغلب على هذه المشكلة تم تصميم التجويف الهلالي على نهايتي القالب ليتم ملئها لاحقاً بكتل حديدية تُخَطَّب بمادة لاصقة لتعمل على زيادة وزن القالب ودعم استقراره. كما تم تصميم غطاء هلامي الشكل أيضاً لغلق التجويف كما هو موضح بالمساقط المبينة بالشكل (6).

2. تصميم شفة دائرية بارتفاع 2mm على حافة حوض العين لمنع تسرب سائل التنظيف وتوجيهه إلى قناة التصريف كما هو موضح بالشكل (6). تعمل هذه الشفة على المحافظة على كروية العين ومنعها من الارتخاء والتفلطح.
3. إضافة أنبوب لتصريف السائل المجمع عند نقطة التجميع المتصلة بالشفة. كما تم تصميم أنبوب بشكل منحنى يسمح بتوصيله بأنابيب مطاطية لنقل السائل. تم توجيه أنابيب التصريف لتقابل فتحات لتسمح بمرور الأنابيب من تحت قاعدة القالب. كما تم ضبط عمق الأنبوب تحت مستوى سطح القالب ليكون أقل من ارتفاع قاعدة الإرتكاز حتى لا تعيق استقرار القالب ويسمح بتصريف السائل بكل سلاسة. تم تصميم نهاية الأنبوب بقطر أقل من قطره الأصلي ليسهل ربطه بخرطوم مطاطي لنقل السائل كما هو موضح بالشكل (6).

2. تصميم قالب تثبيت مقلة العين

أ. قالب تثبيت مقلة العين Eye Holder

قالب تثبيت مقلة العين هو عبارة عن قاعدة تصنع من مادة بلاستيكية تستخدم لتثبيت عين حيوان مختبرات (خروف) تُجرى عليها عمليات التدريب والتخطيط للعملية الجراحية قبل تنفيذها على عين المريض. يفتقد قسم طب وجراحة العيون بمستشفى الطواري مصراتة لوجود هذه المُعدة. ونظراً لإرتفاع تكلفة توريدها من السوق الخارجي؛ يقوم الأطباء بالمستشفى بتنفيذ عمليات التدريب والتخطيط بدون هذه المعدة مما يجعل العملية صعبة جداً أو شبه مستحيلة نظراً لسطحها الخارجي الزلق. الشكل (4) يوضح أحد المثبتات المعروضة بالأسواق الإلكترونية. وكما هو مبين فإن تكلفة شراء قالب التثبيت 565 جنيه استرليني، وهذه التكلفة عالية جداً.

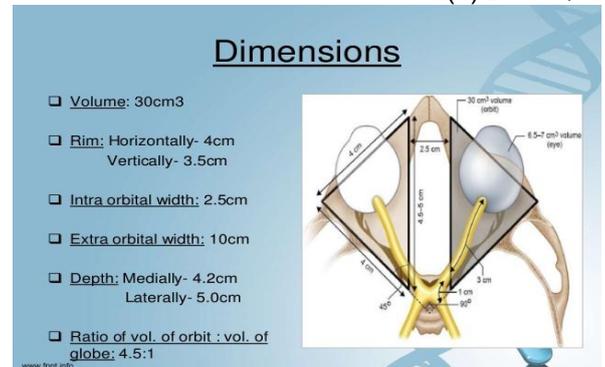


شكل (4) قالب تثبيت مقلة العين [27]

ب. مواصفات القالب

لغرض التصميم تم تحديد مواصفات المنتج والتي كانت على قسمين الأول يتعلق بتحديد المقاسات اعتماداً على مقاسات عين الإنسان البالغ (مقاربة لمقاسات عين الخروف بعمر 6 أشهر). أما القسم الثاني فهو يتعلق بتحديد المواصفات والخصائص التي يطلبها المستخدم في المنتج.

1. مقاسات قالب تثبيت مقلة العين
- تم تحديد مقاسات القالب إنطلاقاً من مقاسات الجزء المباشر للعين والذي أطلقنا عليه حوض العين، حيث تم تحديد مقاساته من مقاسات مقلة العين بالإنسان البالغ المبينة بالشكل (5).



شكل (5) أبعاد عيني الإنسان البالغ [28]

كما هو موضح بالشكل حجم العين يتراوح من 6.5 إلى 7 سم³ وحسب المواصفات التي طلبتها الجهة المستخدمة أن يغمر الحوض نصف العين تقريباً لكي يتسنى للطبيب العمل على الجزء العلوي الذي يكون خارج الحوض. بالرغم من أن العين ليست كروية الشكل، إلا أنه تم اعتبارها على أساس أنها كرة بحجم 6.5 سم³، وعلى هذا الأساس تم حساب قطر دائرة العين كما يلي:

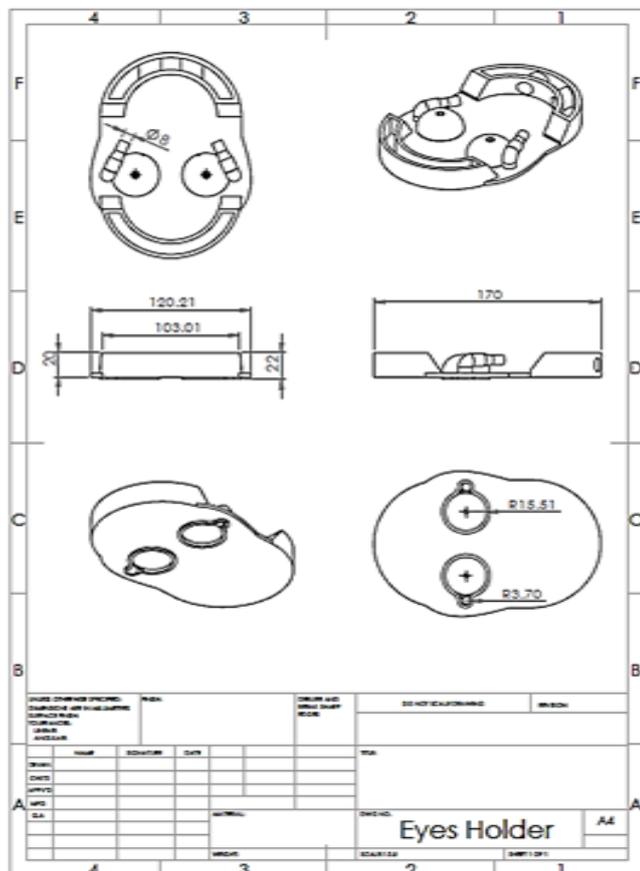
وعلى هذا الأساس تم طباعة جزء الحوض فقط لإختباره بشكل عملي. أشارت النتائج إلى الحاجة لزيادة نصف القطر؛ فتم تعديله إلى 15.5 ملم. على ضوء مقاسات الحوض تم تحديد باقي المقاسات حسب ما هو موضح بالشكل (5) بما يحقق النقطتان التاليتان:

- أن تكون مساحة سطح القالب المحيطة بالحوض متوسطة بما يعادل أو أكبر بقليل من مساحة سطح وجه الإنسان البالغ.
- أن يكون إرتفاع أرجل القالب بما يسمح بتمرير أنبوب التصريف، مع عدم المبالغة في إرتفاعه فيُضِر بمسألة الإستقرار المطلوبة.

3. طباعة القالب

أ. إنتاج البرنامج التشغيلي للتصميم (G-Code)

بعد تجهيز التصميم النهائي للقالب تم حفظه على الصورة STL لكي يصبح معرف لدي برامج التشريح. ولتنفيذ مهمة التشريح وإصدار البرنامج التشغيلي تم استخدام برنامج التشريح (FlashPrint V4.4.0). لضبط إعدادات البرنامج تم



الشكل (6) المساقط الأساسية لتصميم قالب تثبيت مقلة العين

اعتماد جميع القيم الافتراضية للبرنامج باستثناء بعض المتغيرات المهمة كما هي مبينة بالجدول (1) والتي من شأنها أن تحقق الخصائص المطلوبة في المنتج وهي كما يلي:

الجدول (1) قيم معاملات عملية الطباعة التي تم تغييرها من القيم الافتراضية

المتغير	سمك الطبقة [ملم]	نسبة التعبئة [%]	درجة حرارة البثق [°م]	درجة حرارة منصة العمل [°م]	سرعة التعبئة [ملم/ث]
القيمة	0.2	100&20	230	105	50

1. دعم متانة النموذج. لتحقيق أعلى متانة ممكنة للقالب؛ تم اعتماد الإعدادات التالية:

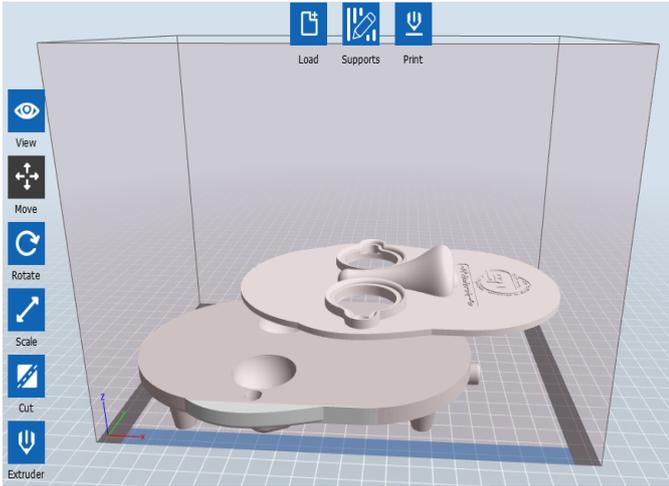
- اعتماد نسبة التعبئة 20% لجسم اللب القالب، على أن تنجز الطبقات العلوية والسفلية بنسبة 100%؛ بهذا نكون قد حققنا المتانة الكافية للقالب مع تقليل زمن الطباعة إلى أقل حد ممكن.
- رفع درجة حرارة البثق ومنصة العمل إلى 225 م°، 65 م° على التوالي؛ لزيادة سيولة المادة فهذه تعزيز عملية الاندماج بين الأنسجة والطبقات المتجاورة أثناء عملية الطباعة.
- اعتماد المستوى المتوسط لسرعة (50 ملم/ث) التعبئة لتحقيق طرح منظم للمادة أثناء عملية البناء؛ لتحقيق أكبر مساحة تماس ممكنة بين الأنسجة والطبقات المتجاورة وبالتالي تُعزز عملية الاندماج بين الأنسجة فيؤدي ذلك لتقوية النموذج. كما يساعد استخدام السرعة المتوسطة في حفظ المادة من التدهن الحراري (Thermal degradation) نتيجة لتعرضها للحرارة فترة أطول من اللازم عند استخدام سرعة طباعة بطيئة [29].

2. دعم المقاسات

- من أهم العوامل التي تؤثر في دقة مقاسات منتجات تقنية النمذجة بالصهر والترسيب سمك الطبقة؛ فالعمل بسمك طبقة رفيع يدعم بشكل كبير كلاً من دقة المقاسات، نعومة السطح والخصائص الميكانيكية للنموذج، غير أنها تطيل زمن الطباعة بشكل كبير. وحسب ما أشارت إليه كثير من البحوث [30, 31] فإن سمك الطبقة المثالي يتراوح ما بين 0.2 إلى 0.3 ملم. ولتحقيق نوع من التوازن بين دعم دقة المقاسات وتقليل زمن الطباعة تم اعتماد القيمة 0.2 ملم.
3. تقليل زمن الطباعة

نظراً لكبر حجم القالب بالنسبة لحيز بناء الطباعة فإن عملية الطباعة تتم حسب تقديرات برنامج التشريح في 7 ساعات و34 دقيقة؛ وهذا يُعد زمن طويل قد تتعرض فيه عملية الطباعة إلى مؤثرات خارجية قد توقف العملية؛ مثل توقف المصدر الكهربائي؛ لذلك تم تجزئة القالب إلى جزئين باستخدام وظيفة القطع المتاحة في برنامج التشريح FlashPrint كما هو مبين بالشكل (7). بالإضافة إلى تسريع عملية الطباعة (عن طريق استخدام طابعتين، كل طباعة تقوم بتنفيذ أحد الأجزاء) فإن تجزئة القالب توفر وبشكل كبير المادة الخام التي سنحتاج استخدامها في حالة طباعته كجزء واحد؛ وذلك لوجود نتوءات من الجهتين (الأمامية والخلفية) الأمر الذي يتطلب استخدام كمية كبيرة من مادة الدعم لبناء هذه النتوءات. وباستخدام هذه الطريقة يمكن طباعة كل جزء بحيث تكون الجهة الخالية من أي نتوءات ملاصقة لمنصة العمل. ويتم خلال عملية التشطيب لصق الجزئين بمادة لاصقة للتجميع، مع ملاحظة أن مساحة السطح الكبيرة تُأمين التصاق قوي جداً لا يمكن فصله.

بعد إطلاق وتنفيذ أمر التشريح ومعاينة تتابع شرائح النموذج التي كونها البرنامج، تم معاينة التقديرات الميدانية لزمن الطباعة وطول سلك المادة الخام فكانت على النحو التالي: زمن الطباعة 7 ساعات و34 دقيقة، وتحتاج الطباعة إلى مادة خام بطول 24.76 متر من سلك بقطر 1.75mm من مادة (Polylactic acid) (PLA). بعد فحص شرائح النموذج تم الموافقة عليها، فتم توليد البرنامج التشغيلي (G-Code) تلقائياً وتخزينه في الصورة x3g. على ذاكرة الطباعة الخارجية SD.



الشكل (7) قطع القالب إلى جزئين لتسريع عملية الطباعة

ب. تنفيذ عملية الطباعة

لقد تم تنفيذ عملية الطباعة باستخدام الطباعة موضحة بالشكل (8) والتي تحمل الموصفات التالية: طباعة ثلاثية الأبعاد FLASHFORGE PRO، حجرة البناء ذات أبعاد (Z، Y، X) 250×145×150 ملم، باثق بفوهة قطرها 0.4 ملم.

بعد أن تم تنفيذ جميع الإجراءات التحضيرية للطباعة المتمثلة في تحميل السلك، ضبط استواء منصة العمل، تحميل الملف الحامل للتصميم، تم إطلاق أمر الطباعة، ثم متابعة تنفيذ الطباعة لعملية الطباعة ومراقبة تدفق سلك المادة الخام حتى نهاية العملية وإنتاج النموذج كما هو موضح بالشكل (9).

ت. عملية التشطيب

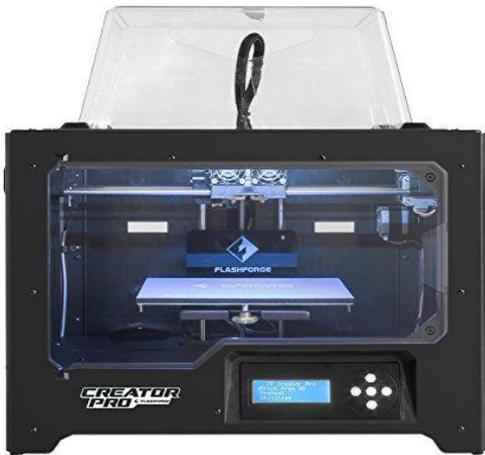
تمت عملية التشطيب بإزالة الروش البسيطة المتصلة بحواف القالب وإزالة المادة الداعمة المستخدمة لبناء أنابيب التصريف، ثم لصق الجزئين ببعضهما باستخدام مادة لاصقة، ثم تعبئة التجاويف الهلالية بالكتل الحديدية والغراء.

ث. اختبار التصميم

تضمنت مرحلة اختبار المنتج عدة مراحل تزامنت مع عملية التصميم والتصنيع كما هو موضح في الفقرات التالية:

1. اختبار مقاسات حوض العين

قبل البدء في تنفيذ القالب وعلى اعتبار أن حوض العين هو الجزء الأهم، وأن الوظيفة التي يقوم بها القالب تتركز في هذا الجزء، بات من الأهمية بمكان أن تكون مقاساته مطابقة تماماً للمواصفات؛ ليحافظ على استقرار وكروية العين ومنعها من التقلع. وإقتصاداً في المادة الخام تم طباعة الحوض فقط واختباره عملياً بوضع عين خروف حقيقية كما هو موضح بالشكل (10) وكانت النتائج ممتازة، مع ملاحظة الحاجة إلى توسيع قطر دائرة الحوض كما تم الإشارة إليه في الفقرة 2-ب وتم اعتمادها من الطبيب المختص.



شكل (8) الطباعة FLASHFORGE PRO

الجدول (3) التقييم العملي لوظيفة القالب من قبل أطباء المستشفى

المهمة	مناسب	غير مناسب	التعديل المطلوب
1 هل مساحة القالب مريحة لعمل الطبيب؟	✓		
2 هل سمك منصة القالب مناسبة؟	✓		
3 هل شفة ضبط كروية العين كافية وفعالة؟ هل الشفة كافية لضبط السائل؟	✓		
4 هل قطر أنابيب التصريف مناسبة لربطها بأنابيب التصريف؟	✓		تعديل قطر نهاية أنابيب التصريف لكي يمكن توصيلها بأنبوب كيس تجميع البول وبدون وجود تسرب
5 هل اتجاه أنابيب التصريف مناسبة؟	✓		
6 هل ارتفاع قاعدة القالب مناسبة	✓		
7 هل القالب ثابت ومستقر عند العمل؟	✓		
8 هل التقب الموجود بقاعدة حوض العين مناسب؟	✓		
9 هل هناك أي تعديل مطلوب لم يذكر	----	----	إضافة شكل الأنف لسطح القالب ليستخدمه الطبيب كنقطة ارتكاز ليده عند العمل وذلك لمنع إي اهتزاز صادر من جسم الطبيب

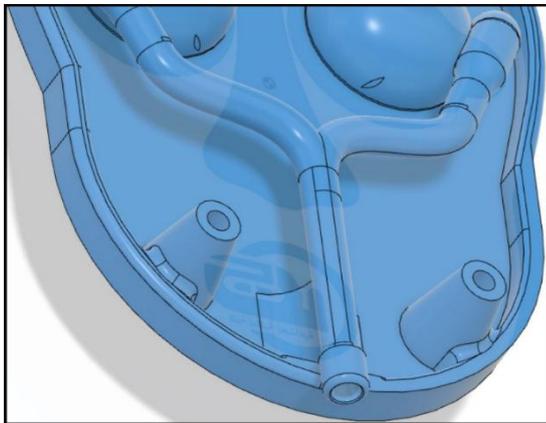


الشكل (9) المنتج النهائي لقالب تثبيت مقلة العين



الشكل (10) اختبار مقاسات وفاعلية الحوض حامل مقلة العين

منع أي تسريب للسائل. كما يمكن إضافة غراء أو أي مادة لاصقة تزيد من ثبات الأنبوب.
3. إضافة شكل الأنف على سطح القالب.
تم إضافة شكل الأنف بارتفاع وبمساحة مناسبة لتوفير نقطة ارتكاز ليده الطبيب عند العمل؛ لمنع انتقال الحركة والاهتزازات الناتجة من جسم الطبيب إلى الأداة التي يستخدمها عند تنفيذ العملية. الشكل (15) يوضح التعديل.



الشكل (11) تعديل تصميم أنابيب التصريف



الشكل (12) نهاية أنبوب كيس التصريف

2. اختبار مقاسات القالب

بعد التأكد من فاعلية حوض القالب، تم طباعة النموذج كاملاً وفحص جميع المقاسات ومقارنتها بالتصميم وكانت نتائج المقارنة كما هو موضح بالجدول (2).

الجدول (2) مقارنة مقاسات القالب المنفذ مع مقاسات التصميم

الصف [ملم]	قطر الحوض	عمق الحوض	طول المنصة	عرض المنصة	ارتفاع شفة البوتقة	قطر انبوب الصرف
التصميم	31.35	22	170	120	2	8
القالب	31.2	22	170	120	2	8

3. اختبار الأداء والوظيفة

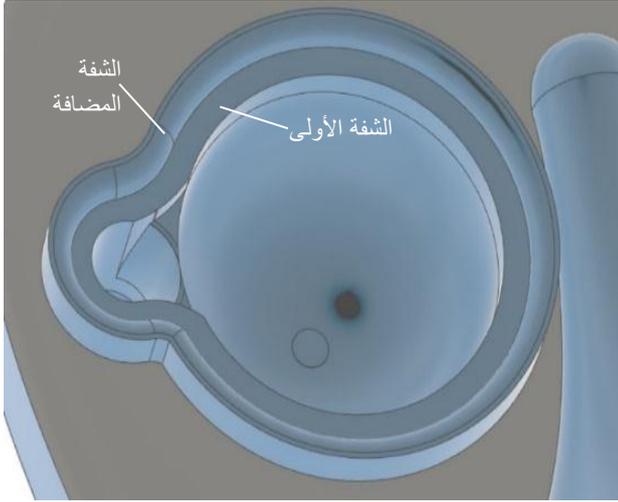
تم اختبار القالب عملياً لمدة أسبوعان داخل قسم العيون بالمستشفى من قبل عدة أطباء بالقسم وكانت نتائج الإختبار حسب ما هو مبين بجدول التقييم (3).
لقد تم أخذ ملاحظات المستخدمين بعين الإعتبار مع إضافة بعض التعديلات الأخرى التي من شأنها أن تعزز جودة أداء القالب.

ج. تعديل التصميم

بعد إجراء الإختبار العملي لوظيفة القالب وتحديد التعديلات التي طلبها المستخدم وإضافة تعديلات أخرى تحسن من أداء القالب كما هو مبين بالنقاط التالية:

1. تعديل تصميم أنابيب التصريف من أنبوبين إلى أنبوب واحد. حتى لا يحتاج المستخدم إلى ربط القالب بكيسين تجميع؛ تم مد الأنابيب ليلتقيان في نهاية واحدة كما هو موضح بالتصميم المعدل الشكل (11).
2. تعديل تصميم نهاية أنبوب التصريف.

لتحقيق توصيل مضبوط وبدون تسرب بين نهاية أنبوب التصريف الخارج من حوض القالب ووصلة الربط المثبتة بكيس التجميع المبينة بالشكل (12)، ونظراً لكون وصلة كيس التجميع مصنوعة من مادة بلاستيكية صلبة وقاسية وكذلك أنبوب التصريف الخارج من القالب مصنوع من مادة صلبة أيضاً؛ فيكون من الصعب منع تسرب السائل بشكل كامل. ومن باب عدم تعقيد التصميم وخفض الكلفة الكلية للقالب؛ تم نزع الوصلة الصلبة من أنبوب كيس التجميع كما هو مبين بالشكل (13)، فأصبحت نهاية الأنبوب مرنة بالشكل الذي يحقق اتصال تداخلي (تم مراعاة مقاسات النهايتين) مع نهاية أنبوب تصريف القالب الذي تم تصميمه على هيئة مخروط كما هو موضح بالشكل (14) والتي تمكن من حشر أنبوب كيس التجميع بشئ من القوة، وبذلك يمكن



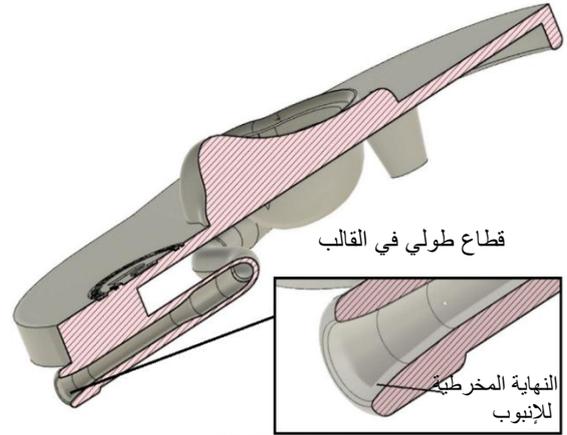
الشكل (16) إضافة شفة ثانية لتوجيه سائل التنظيف



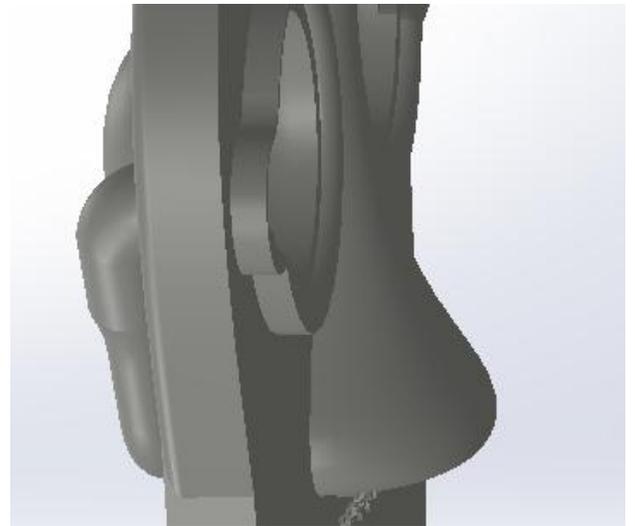
الشكل (13) نهاية أنبوب كيس التجميع بعد نزع الوصلة



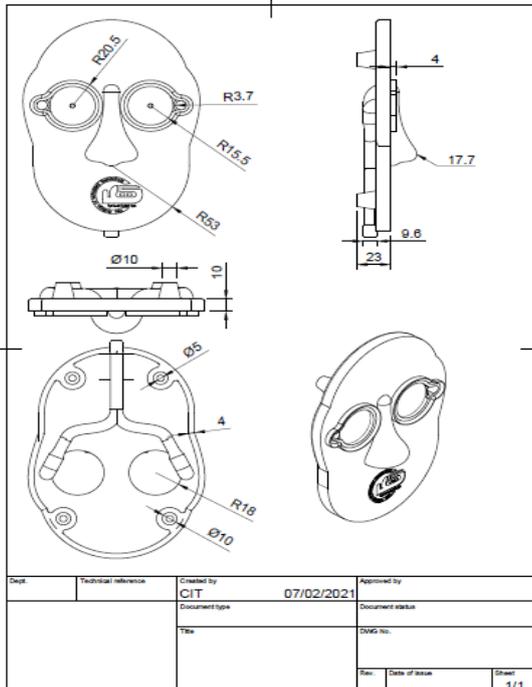
الشكل (17) إضافة شعار الجهة المصنعة



الشكل (14) تعديل تصميم نهاية أنبوب التصريف للقالب



الشكل (15) إضافة أنف للقالب



الشكل (18) المساقط الرئيسية لتصميم القالب بعد تنفيذ التعديلات

4. إضافة شفة توجيه سائل التنظيف.
نظراً لضرورة بقاء الشفة الأولى قريبة جداً من حافة حوض العين لمنع العين من التفلطح، الأمر الذي يمنعها من السيطرة الكاملة على السائل؛ لذلك تم إضافة شفة ثانية على بُعد 5 ملم من الشفة الأولى كما هو موضح بالشكل (16)؛ لمنع انتشار أي مقدار من السائل المستخدم.
5. إضافة شعار الجهة المصنعة على سطح القالب.
تم إضافة الشعار بطريقة لا تؤثر على وظيفة القالب بحيث تكون محفورة على السطح العلوي للقالب. الشكل (17) يوضح الشعار.

- الشكل (18) يوضح المساقط الرئيسية لتصميم القالب بعد تنفيذ التعديلات.
- والشكل (19) يوضح القالب بشكله النهائي بعد طباعته.



الشكل (19) قالب تثبيت مقلة العين للتدريب الجراحي بعد الطابع

4. قسط الإستهلاك للطابعة.
يقدر العمر الافتراضي للطابعات من سنتين إلى ثلاث سنوات؛ على أساس متوسط عمل يومي بمعدل 5 ساعات يومياً. أي بمعنى آخر: يجب على المستثمر إسترجاع ثمن الطابعة في النهاية العمر الافتراضي للطابعة. تم تقدير العمر الافتراضي للطابعات على أساس الفترة الزمنية التي تفقد فيها الطابعة كفاءتها الإنتاجية، وتطور التقنية وظهور تقنيات أحدث [35]. تقدر قيمة الإستهلاك للطابعة في الساعة على النحو التالي:
ثمن الطابعة 799 دولار = $4.48 \times 799 = 3899.12$ دينار [36].
القسط السنوي للطابعة = $3 \times 3899.12 = 1193.17$ دينار.
عدد ساعات العمل السنوية = $303 - 365 = 303$ يوم عمل
 $1515 = 5 \times 303 =$ ساعة عمل سنوياً.
القسط الإستهلاك في الساعة = $0.79 = 1193.17 \div 1515$ دينار/ساعة.
5. إستهلاك الكهرباء.
تعمل الطابعة بمعدل استهلاك للكهرباء يقدر بـ 0.350 كيلوواط.
تكلفة استهلاك الكهرباء = (القدرة بالكيلو واط × عدد ساعات العمل × تعريفة الكهرباء) ÷ 100 = التكلفة بالدينار.
 $0.18 = 100 \div (7 \times 7.5 \times 0.35) =$ دينار
6. خسائر فشل عملية الطابعة.
من الأمور المتوقع حدوثها ومن الواجب أخذها بعين الإعتبار عند احتساب كلفة المنتج هي؛ حالات فشل عملية الطابعة لعدة أسباب منها: إنقطاع التيار الكهربائي، إلتواء النموذج بسبب كبر حجمه، انفصاله عن منصة العمل، وغيرها من الحوادث التي يمكن أن تسبب فشل عملية الطابعة قبل إنجازها. يتم تقدير قيمة هذا القسط كنسبة من التكلفة الكلية للمنتج على أن تعادل نسبة الفشل المتوقع و التي تتفاوت حسب حجم وتعقيد النموذج؛ وهي تقدر بنسبة 20% تقريباً من التكاليف المباشرة (المادة الخام؛ فني التشغيل، قسط الإستهلاك، إستهلاك الكهرباء) كما هو موضح بالجدول (4). [35]

4. تقدير التكلفة

تم تقدير التكلفة كحاصل جمع لستة عناصر رئيسية كما يلي [32]:

$$0.2 \times (0.18 + 5.93 + 38.4 + 12.05) = 11.436 \text{ دينار}$$

الجدول (4) التكلفة الكلية لإنتاج قالب تثبيت مقلة العين

ت	التكلفة/الوحدة	تكلفة الوحدة	المستهلك	القيمة
1	التصميم	12 دينار/ساعة	10 ساعات	120
2	المادة الخام	0.13 دينار/الجرام	92.74 جرام	12.05
3	فني التشغيل	5.12 دينار/ساعة	7:30 ساعة	38.4
4	قسط الإستهلاك	0.79 دينار/ساعة	7:30 ساعة	5.93
5	إستهلاك الكهرباء	0.07 دينار/كيلوواط	7:30 ساعة	0.18
6	خسائر فشل الطابعة	20% من قيمة التكاليف المباشرة		11.44
	التكلفة الإجمالية			167.99 دينار

5. التقييم النهائي للقالب

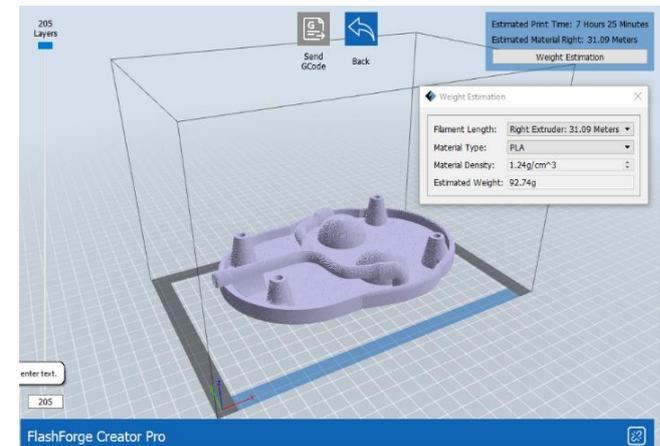
تم تقييم المنتج باتباع بطريقتين مختلفتين: الأولى عن طريق الإختبار العملي الميداني للقالب من قبل الجهة المستخدمة، والثانية عن طريق المقارنة مع نفس المنتج متاح في السوق العالمية.

أولاً: التقييم الميداني

لقد تم إعداد استبيان طرحت فيه مجموعة من الأسئلة المباشرة التي وجهه للجهة المستخدمة عن التعديلات التي تم إضافتها للقالب ومدى استفادتهم منها فكانت كما هو مبين بالجدول (5).

الجدول (5) استبيان موجه لأطباء قسم طب وجراحة العيون بمستشفى الطواري مصراة

ت	التعديل	مفيد	غير مفيد	ملاحظات
1	إضافة شفة ثانية للسيطرة على سائل التنظيف	✓		
2	إضافة الأرجل مصممة لإضافة قواقع مطاطية لتحقيق استقرار أفضل.	✓		
3	تعديل أنابيب التصريف من أنبوبين إلى أنبوب واحد.	✓		
4	تمديد أنبوب التصريف إلى خارج محيط القالب.	✓		
5	إضافة شكل الأنف كنقطة ارتكاز ليد الطبيب لمنع وصول الإهتزازات لعدة الجراحة.	✓		
6	تقييم عام			ممتاز



الشكل (20) تقديرات برنامج الترخيص لزمان وطول ووزن المادة الخام

- [2] Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83(1-4), 389-405.
- [3] Jamróz, W., Szafraniec, J., Kurek, M., & Jachowicz, R. (2018). 3D printing in pharmaceutical and medical applications—recent achievements and challenges. Pharmaceutical research, 35(9), 176.
- [4] Attaran, M. (2017). The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. Business Horizons, 60(5), 677-688.
- [5] Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., ... & Blackburn, J. (2019). Progress in additive manufacturing on new materials: A review. Journal of Materials Science & Technology, 35(2), 242-269.
- [6] Wu, B., Myant, C., & Weider, S. (2017). The value of additive manufacturing: future opportunities. Imperial College London, Briefing Paper, (2).
- [7] Savini, A., & Savini, G. G. (2015, August). A short history of 3D printing, a technological revolution just started. In 2015 ICOHTEC/IEEE international history of high-technologies and their socio-cultural contexts conference (HISTELCON) (pp. 1-8). IEEE.
- [8] Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2016). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83(1-4), 389-405.
- [9] Hu, J. (2017, August). Study on STL-based slicing process for 3D printing. In Proceedings of the 28th Annual International, Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference. Austin TX, August (pp. 7-9).
- [10] Peng, T., Kellens, K., Tang, R., Chen, C., & Chen, G. (2018). Sustainability of additive manufacturing: An overview on its energy demand and environmental impact. Additive Manufacturing, 21, 694-704.
- [11] <https://www.myminifactory.com/>
- [12] Hu, J. (2017, August). Study on STL-based slicing process for 3D printing. In Proceedings of the 28th Annual International, Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference. Austin TX, August (pp. 7-9).
- [13] Junk, S., & Kuen, C. (2016). Review of open source and freeware CAD systems for use with 3D-printing. Procedia CIRP, 50, 430-435.
- [14] Amorim, P. H. J., de Moraes, T. F., Rezende, R. A., da Silva, J. V. L., & Pedrini, H. (2016). Medical imaging for three-dimensional computer-aided models. Tissue Engineering and Regeneration. 3D Printing and Biofabrication. Ovsianikov A, Yoo JJ, Mironov V (Eds). Springer, Switzerland.
- [15] Brühshwein, A., Klever, J., Hoffmann, A. S., Huber, D., Kaufmann, E., Reese, S., & Meyer-Lindenberg, A. (2020). Free DICOM-Viewers for Veterinary Medicine. Journal of digital imaging, 33(1), 54-63.
- [16] Xu, J., Ding, L., & Love, P. E. (2017). Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing. Automation in Construction, 76, 85-96.
- [17] Najmon, J. C., Raeisi, S., & Tovar, A. (2019). Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. In Additive manufacturing for the aerospace industry (pp. 7-31). Elsevier.
- [18] Pan, X., Chen, K., & Chen, D. (2014, May). Development of rapid prototyping slicing software based on STL model. In Proceedings of the 2014 IEEE 18th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD) (pp. 191-195). IEEE.
- [19] Shah, A., Raza, A., Hassan, B., & Shah, A. S. (2015). A review of slicing techniques in software engineering.
- [20] Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. Procedia Manufacturing, 10, 791-803.

ثانياً: المقارنة مع المنتج المستورد
لقد تم اختيار القالب المعروف بالشكل (4) كنموذج للمنتج المتاح بالسوق العالمية [27]، فكانت نتائج المقارنة كما هو مبين بالجدول (6).

الجدول (6) مقارنة بين القالب المنتج بتقنية FDM مع أحد القوالب المعروضة بالسوق العالمية

ت	السمات	المستورد (بريطانيا)	المطبوع (FDM)
1	السيطرة على انسياب سائل التنظيف	لا يوجد	سيطرة تامة
2	تصريف سائل التنظيف	لا يوجد	قناة تصريف تنقل السائل إلى كيس تجميع
3	الثبات والاستقرار	ممتاز	ممتاز
4	محكاة تفاصيل الوجه	ممتاز	جيد جداً
5	التشطيب الخارجي	ممتاز	جيد
6	التكلفة	565 جنيه استرليني (3531.25 دينار)	167.9 دينار

6. الإستنتاجات

من خلال المبحث النظري والتطبيق العملي للتقنية موضوع البحث وما تولدت منها من خبرات نظرية وعملية استنتج الباحثون النقاط التالية:

1. تُصنف أنظمة التصنيع بالإضافة من أنظمة التصنيع حسب الطلب، فتغيير مقاسات أو تصميم المنتج لا يضيف أي تكلفة جديدة للمنتج باستخدام هذه التقنية مما يسهل على المصممين تحقيق النجاح في إنتاج منتجات جديدة.
2. تتميز تقنية التصنيع بالصبور والترسيب (FDM) بانخفاض التكلفة مقارنة بتقنيات التصنيع بالإضافة الأخرى، بشرط استخدامها في أنظمة الإنتاج حسب الطلب.
3. عند الشروع في تصميم أي منتج، يجب توسيع النقاش مع المستخدم وتحديد مواصفات المنتج بدقة وبكل وضوح لتقليل عدد مرات إعادة التصميم والتصنيع.
4. أثبتت الاختبارات العملية للقالب من قبل الجهة المستخدمة تحقيق النقاط التالية:
 - تحقيق استقرار أكبر من ذي قبل، مع استواء سطح القالب نظراً لتوفر أرجل مصممة بطريقة تُؤمن تركيب القواقع البلاستيكية بشكل ثابت.
 - تحقيق سيطرة كاملة على سائل التنظيف المستخدم مما يسمح للطبيب استخدام سائل التنظيف بدون أي قيود، مع بقاء سطح القالب جافاً وغير ملوث.
 - حققت إضافة شكل الأنف نقطة ارتكاز ممتازة ليد الطبيب مما يمكنه من مواصلة العمل لمدة طويلة والتخلص بشكل كامل من إي اهتزازات يمكن أن تنتقل إلى أداة الجراحة.
 - حقق تعديل أنبوب التصريف توفيراً في استخدام أكياس التجميع من (كيسين إلى كيس واحد فقط)، بالإضافة إلى التخلص من كثرة الأنابيب المتصلة بالقالب والتي يمكن أن تكون مصدر إزعاج للمستخدم. كما أضافت عملية تمدد أنبوب التصريف إلى خارج مساحة القالب سهولة ربط الأنبوب ونزعه مع عدم الحاجة إلى تحريك القالب كما كان في السابق.
5. بالمقارنة مع القالب المستورد يمكن ملاحظة القيمة التقنية والإقتصادية للقالب المقترح.
6. وفر استخدام تقنية النمذجة بالصبور والترسيب حفظ هائل في تكلفة القالب عن شرائه من السوق الدولي مبلغ قدره (3363.35 دينار). وهو مبلغ يعادل إنتاج 20 قالب باستخدام التقنية.

7. التوصيات

من خلال التحديات التي واجهها الباحثون أثناء تنفيذ المنتج، وما لمسه من قدرات وإمكانات التقنية موضوع الدراسة رأي الباحثون التوصية بالنقاط التالية:

1. دراسة معاملات عملية النمذجة (FDM) المؤثرة في جودة السطح الخارجي للمنتج، الأمر الذي يساهم في تحسين المظهر الخارجي للقالب.
2. دراسة وتصميم المسار التكنولوجي والعمليات الإنتاجية اللازمة لنقل المنتج إلى الإنتاج الكمي.
3. استخدام التقنية في مجالات طبية أخرى مثل نمذجة للصور الطبية.

المراجع

- [1] Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. (2018). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. Composites Part B: Engineering, 143, 172-196.

- [29] عبدالعظيم باله. (2021). دراسة استقصائية حول الضبط الأمثل لمعاملات تقنية النمذجة بالصبور والترسيب بهدف تعزيز الخصائص الميكانيكية لمنتجاتها. مجلة البحوث الأكاديمية/مصر، العدد السابع عشر. 74-85.
- [30] Kaveh, M., Badrossamay, M., Foroozmehr, E., & Etefagh, A. H. (2015). Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes. *Journal of materials processing technology*, 226, 280-286.
- [31] Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2016). Optimization of fused deposition modeling process parameters for dimensional accuracy using I-optimality criterion. *Measurement*, 81, 174-196.
- [32] [https://www.payscale.com/research/US/Job=Computer_Aided_Design_\(CAD\)_Drafter/Hourly_Rate/41dfd007/SolidWorks8:00_PM/2/10/2021](https://www.payscale.com/research/US/Job=Computer_Aided_Design_(CAD)_Drafter/Hourly_Rate/41dfd007/SolidWorks8:00_PM/2/10/2021).
- [33] https://filament2print.com/gb/blog/18_3D-printing-costs.html 8:00 PM, 2/10/2021.
- [34] <https://www.facebook.com/Nmdaja3D/about>. 2/10/2021.
- [35] <https://www.ideagen.com/thought-leadership/blog/what-is-copq-the-ultimate-guide-to-calculating-understanding-and-reducing-your-costs-of-poor-quality>, 8:00 PM, 2/10/2021.
- [36] https://www.amazon.ca/gp/offer-listing/B00I8NM6JO/ref=dp_olp_NEW_mbc?ie=UTF8&condition=NEW/8:00_PM/2/10/2021
- [21] Coogan, T. J., & Kazmer, D. O. (2017). Bond and part strength in fused deposition modeling. *Rapid Prototyping Journal*.
- [22] Jin, Y., Wan, Y., Zhang, B., & Liu, Z. (2017). Modeling of the chemical finishing process for polylactic acid parts in fused deposition modeling and investigation of its tensile properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 240, 233-239.
- [23] Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M., & Md Akil, H. (2019). Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polymer Reviews*, 59(4), 589-624.
- [24] Salentijn, G. I., Oomen, P. E., Grajewski, M., & Verpoorte, E. (2017). Fused deposition modeling 3D printing for (bio) analytical device fabrication: procedures, materials, and applications. *Analytical chemistry*, 89(13), 7053-7061.
- [25] Boschetto, A., & Bottini, L. (2015). Surface improvement of fused deposition modeling parts by barrel finishing. *Rapid Prototyping Journal*.
- [26] Chennakesava, P., & Narayan, Y. S. (2014, December). Fused deposition modeling-insights. In *Proceedings of the international conference on advances in design and manufacturing ICAD&M (Vol. 14, pp. 1345-1350)*.
- [27] <http://simulatedocularsurgery.com/product/srt-head/>.
- [28] <https://www.slideshare.net/KawshikNag1/orbital-anatomy-109227938>.