

بناء خوارزمية خاصة بالطباعة الهجينة وبرمجتها باستخدام مصمم التطبيقات في بيئة ماتلاب

م. خليل عباس*

د.م المهندس مكي**

الملخص

ظهرت بسبب الحاجة الإنسانية للابتكار أفكار يمكن وصفها بالطفرات العلمية والتي كانت السبب في اختراع أدوات جديدة في العديد من المجالات من بينها النمذجة والتصنيع وأبرز هذه الأدوات في الوقت الحاضر الطباعة ثلاثية الأبعاد والتي تتميز بقدرتها في بناء نماذج معقدة الشكل بخطوات بسيطة وسرعان ما أصبحت هذه التقنية ثورة في تطوير المنتجات وميداناً هاماً للبحث والتطوير لذا تم الاتجاه في هذا البحث نحو إيجاد مفهوم جديد في الطباعة ثلاثية الأبعاد والذي يتمثل بابتكار بنية جديدة يمكن تسميتها بالهجينة لاحتواء بنية النموذج على أكثر من مادة ولهذا الغرض تم تعريف خوارزمية جديدة دعوناها بخوارزمية الطباعة الهجينة مبنية على صيغة رياضية محددة لتوزيع المواد على طبقات النموذج وقد تم بناء البرنامج الذي يعتمد خوارزمية الطباعة الهجينة باستخدام مصمم التطبيقات في بيئة الماتلاب وتم استخدام هذا البرنامج في تخريج ملفات طباعة جديدة للنماذج الهجينة أي ملفات G-code ليتم بعدها التحقق من هذه الملفات باستخدام برامج التقطيع الشائعة.

الكلمات المفتاحية:

الطباعة ثلاثية الأبعاد - الطباعة الهجينة - مصمم التطبيقات - بيئة ماتلاب - لغة ملفات .G-Code

* طالب ماجستير في قسم هـ التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

** مدرس مساعد في قسم هـ التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

Build an Algorithm for Hybrid Printing and Programing it Using App Designer in MATLAB environment

Abstract:

There is ideas that can be described as scientific breakthroughs have emerged because of the human need for innovation, which has been the reason for the invention of new tools in many fields such as modeling and manufacturing. One of the most notably modeling and manufacturing tools at present is 3D printing, which is distinguished by its ability to build complex-shaped models in simple steps. This technology rapidly has become a revolution in product development and an important field for research. This paper, defines a new concept in the 3D printing field which represented by inventing a new structure can be called hybrid because it has more than one material in the model structure therefore a new algorithm was defined. Hybrid printing algorithm based on a mathematical formula to switch the materials through the model layers achieved using a software built in MATLAB environment using App designer, this program used to post new printing files or g-code files for hybrid models then the resulted G-code verified with common slicers.

Key words:

3D printing- Hybrid Printing – MATLAB environment – App designer
- G Code language.

1- المقدمة

تعد الطباعة ثلاثية الأبعاد، ثورة في تطوير المنتجات وتصنيعها لما لها من تطبيقات واسعة ويتم التصنيع بالطباعة ثلاثية الأبعاد من خلال إضافة المادة وتتم من خلال تقطيع النموذج إلى طبقات ليتم بناء كل طبقة تلو الأخرى ليكتمل كامل النموذج [1].

يمكن استخدام القطع المصنعة بالطابعات مفتوحة المصدر لإنتاج قطع ميكانيكية وظيفية والتي تتطلب متانة على الشد مثلها كمثل باقي القطع التجارية ضمن حدود خواصها الميكانيكية [2].

ووصلت تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد لصناعة أطراف اصطناعية للأطفال (سلبية) وتبين أنها ذات مزايا جيدة وبدا أن الأطفال يرفضون الأطراف الأخرى لأسباب منها: قلة الفاعلية، أن تكون غير مريحة، ثقيلة الوزن وغير جذابة وتم اقتراح الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام تقنية الـ FDM لصناعة الأطراف، وتبين أن لها أفضلية من حيث انخفاض التكلفة، خفة الوزن، ديمومتها، وملائمتها لاحتياجات ولتغيرات النمو للطفل [3].

يعد التقدم الحاصل في مجال هندسة النسيج الحيوية مرضاه بتقنيات علاجية لتقليل الألم، وإعادة توليد النسيج والتي تضمن استعادة للبنية والوظيفة وبالتالي استبدال الأعضاء المعطوبة بأعضاء اصطناعية تتمتع بالوظائف الكاملة [4].

إن من أكثر الأمراض التي تشكل تهديداً على صحة الكائن الحي هي هشاشة العظام والتهاب المفاصل وضعف العمود الفقري، ويعد الهيكل العظمي بيتاً للعديد من السرطانات كسرطان الثدي والبروستات إذ يحصل امتزاز للخلايا السرطانية إلى العظام وتعد تقنيات RP بتطوير كل من النسيج والأعضاء الاصطناعية وأيضاً في محاكاة البنى المعقدة للمواد الحيوية [4].

ويحظى البثق متعدد المواد في الطباعة ثلاثية الأبعاد بالاهتمام نظراً لعدد الاحتمالات التي يوفرها [5]، خصوصاً عند استخدامه لتقليل أو إلغاء عمليات التجميع.

وقد أنشأت طابعات ذات رأسين لطباعة النموذج بألوان مختلفة وتقليل عمليات التجميع ثم زاد تعداد رؤوس الطابعة حتى وصلت إلى أربع رؤوس أو أكثر بهدف تسريع عملية الإنتاج ثم برزت الحاجة إلى استخدام بنية داعمة من مادة أخرى غير المادة الأصلية من أجل دعم بنية النموذج وتسهيل إزالة المادة الداعمة بعد الانتهاء من طباعة المنتج ثم طرحت هذه الفكرة بشكل غير مؤطر لطباعة منتجات تحوي على مواد متعددة بهدف الاستفادة من تكامل خواص موادها [5].

وبعدها ظهرت تقنية الطباعة رباعية الأبعاد والتي تعتمد بشكل أساسي على الطباعة ثلاثية الأبعاد ويضاف لها الزمن كبعد رابع لابتكار منتجات ذكية تستجيب لتأثيرات خارجية ميكانيكية أو حرارية أو كيميائية والتي يمكن أن تكون من مادة واحدة ذكية أو أكثر [6].

نستنتج مما سبق أن الطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية حديثة العهد نسبياً وقد يختلف العلماء والباحثين في تحديد الشكل الأمثل لهذه التقنية لأنها قيد التطور المستمر ولكن ما يُتفق عليه هو أنها تقانة المستقبل نظراً لانخفاض تعقيدها وكلفتها بشكل عام، ولنا هنا أن نعيد طرح مشكلة هذا البحث لكونها نواة جديدة في سبيل تقدم هذه التقنية إذ إنها تشكلت بتكامل مجموعة من المفاهيم الخاصة بهذه التقنية حتى لو أن عدد من الأبحاث السابقة قد اقتربت من هذه المشكلة البحثية إلا أنه لم يتم تأطير المشكلة العلمية بناءً على نموذج رياضي واضح يشكل الأساس ومن هنا ينشأ التعريف بالطباعة الهجينة ويجعل من الممكن وضع خوارزمية واضحة لها.

2- هدف البحث ومبرراته

تطوير خوارزمية جديدة بالكامل تتيح طباعة الطبقات باستخدام أكثر من مادة وذلك بغية تعريف الطباعة الهجينة مما يضيف طريقة جديدة كلياً في الطباعة ثلاثية الأبعاد.

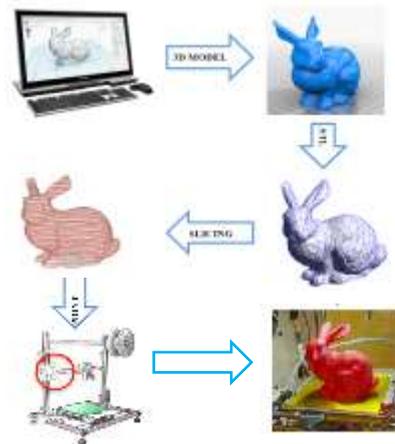
3- مواد وطرق البحث

- برنامج Matlab 2020b ويستخدم كبيئة للبرمجة.

- ملف CAD بصيغة STL ويستخدم كملف للتقطيع والاختبار.
 - برنامج تقطيع Replicator G 0040 لتوليد ملفات الـ G-CODE.
 - برنامج ideaMaker 3.3.0 لاستعراض ملفات الطباعة بعد عملية التهجين.
- 4- مراحل الطباعة ثلاثية الأبعاد وتعريف بالطباعة الهجينة

توصف عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد بالتسلسل التالي [1]:

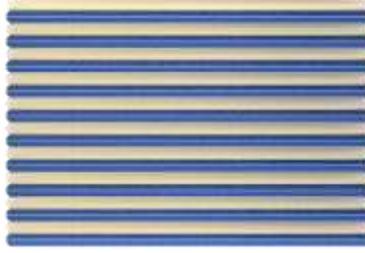
- 1- الحصول على ملف CAD للقطع سواء كانت بنمذجة القطع باستخدام برامج الرسم، أو من خلال معدات الهندسة العكسية.



شكل 1 تسلسل عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد

- 2- تحويل ملف CAD إلى ملف ذو لاحقة STL والذي يسمح بتكوين قاعدة أساسية لإجراء الحسابات من أجل تقطيع الشكل ثلاثي الأبعاد إلى طبقات.
- 3- معالجة ملف STL ومن ثم ترحيله إلى الآلة وضبط بارامترات البناء.
- 4- عملية البناء المؤتمتة والتأكد من عدم وجود أخطاء أثناء العملية.
- 5- إزالة القطع من الآلة، وتنظيفها من عناصر الدعم وإجراء عملية المعالجة اللاحقة.
- 6- إنهاء القطع لتصبح جاهزة للتطبيق.

نقصد بالطباعة الهجينة بأنها طباعة ثلاثية الأبعاد لبني متعددة المواد كل مادة تختلف عن الأخرى من حيث المواصفات والنوع بحيث تترتب هذه المواد وفق ترتيب جديد غير معرّف بالبنية الاصلية وبتنوع عنها البنية الهجينة.

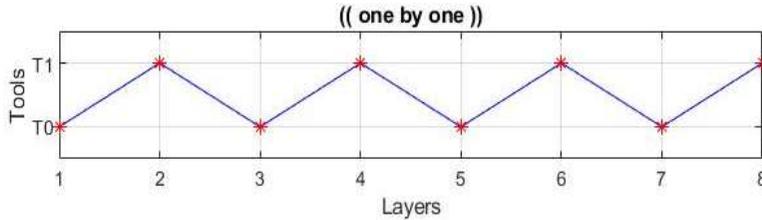


شكل 2 بنية افتراضية هجينة ثنائية المواد

وتتم هذه العملية من خلال تبديل الأدوات أثناء عملية الطباعة ليتغير بذلك نوع المادة المستخدمة في بناء الطبقة بالاعتماد على صيغة رياضية تصف عملية التبديل بين الأدوات.

5- الصيغة الرياضية وتصميم النموذج الهجين

يقصد بتصميم البنية الهجينة هو توزيع الأدوات على طبقات النموذج على شكل نسق متتالي متكرر، حيث كل أداة تستخدم لبناء طبقة أو عدد من الطبقات تتبادل فيما بينها بشكل متتالي حتى الوصول إلى الطبقة الأخيرة في النموذج، وبناءً على ذلك يمكن أن نجد عدداً من التصاميم لكل بنية منها ما يحقق تساويًا في نسبة المواد ومنها ما لا يحقق ذلك ومنه نجد أن العلاقة الرياضية تكون متغيرة الشكل وذلك حسب تصميم البنية المعتمد ولكن تبقى السمة المميزة لهذا النوع من البنى هي التكرارية.



شكل 3 مخطط تبديل الأدوات وفق التصميم الهجين

فبفرض لدينا مجموعة كبيرة يرمز لها بـ T وعدد عناصرها يساوي عدد طبقات النموذج L فإنها ستمتلك عدداً من المجموعات الجزئية $segments$ كل مجموعة جزئية S_{unit} هي شعاع له طول موحد ومحدد وهو S والتي تتكرر على طول المجموعة T بمقدار k .

$$T_{segments} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(k,1)} \times S'_{unit} \quad (1)$$

بحيث لكل S_{unit} مجالين جزئيين S_{unit1} ، S_{unit2} طول كل منهما m ، n على الترتيب أي أن كل S_{unit} هي عبارة عن مجموعتين متتاليتين طولهما يعتمد على النسق المتبع وقيم عناصرهما تساوي قيمة الأداة حسب النسق.

$$S_{unit1(m,1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(m,1)} * TA_{(1,1)} \quad (2)$$

$$S_{unit2(n,1)} = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{(n,1)} * TB_{(1,1)} \quad (3)$$

TA : هو رقم أداة البدء.

TB : هو رقم الأداة التالية.

$$S_{unit(m+n,1)} = \begin{bmatrix} S_{unit1} \\ S_{unit2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

يمكن القول عن S_{unit} أنه شعاع واحدة النسق الهجين.

بفرض أن التوزيع 1:2 بالتالي فإن طول S النسق يساوي 3 وبفرض قيمة الأداة للمادة الأولى هي 0 وللثانية هي 1 فسيكون شعاع واحدة النسق الهجين بعد تحويله إلى مصفوفة على اعتبار أن شعاع واحدة النسق لكل من الأدوات ثابت بالشكل التالي:

$$S_{unit(3,1)} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

بفرض أن T مصفوفة تعبر عن نموذج عدد طبقاته 6 نجد عدد المجالات الجزئية الممكنة هي 2 مجالات جزئية ويتطبيق المعادلة 1 نجد الحل بالشكل التالي:

$$T_{segments} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}_{(2,3)}$$

المصفوفة السابقة لا تربط بشكل مباشر رقم الأداة مع رقم الطبقة الهدف وإنما تبدو بالشكل التالي:

$$T_{segments} = \begin{bmatrix} l_1 & \dots & l_s \\ l_{s+1} & \dots & l_{(2*s)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{(k-1)*s+1} & \dots & l_{k*s} \end{bmatrix}_{(k,s)} \quad (5)$$

ولتحويل المصفوفة السابقة ذات الأبعاد (k,s) إلى مصفوفة سطرية من الشكل (1,L) يرمز كل موقع منها إلى رقم الطبقة وقيمة هذا الموقع تساوي إلى رقم الأداة الواجب استخدامها في هذه الطبقة يمكن إيجاد الصيغة الرياضية العامة لتوزيع الأداة الأولى على أساس رقم الطبقة بشكل مصفوفة سطرية وفق النسق الهجين من العلاقة:

$$f_{t1}(u, v_1) = r + m * (u - 1) + n * (u - 1) + v_1 \quad \forall u \in \{1, k\} \& v_1 \in \{1, n\} \quad (6)$$

$$T_{c(1,f_{t1})} = T1 \quad (7)$$

بحيث أن T1 هو رقم أداة البدء

و f_{t1} دالة تحديد مواقع الأداة الأولى في المصفوفة السطرية للنموذج الهجين.

في حين أن u رقم المجموعة الجزئية من مجموعات النموذج الهجين

و v_1 ترتيب الأداة ضمن المجموعة الجزئية (رقم العنصر في النسق الهجين للأداة الأولى)

و r إزاحة من بعدها يبدأ توزيع الأدوات
والصيغة الرياضية العامة لتوزيع الأداة الثانية على أساس رقم الطبقة بشكل
مصفوفة سطرية وفق النسق الهجين من العلاقة:

$$f_{t2}(u, v_2) = r + m * u + n * (u - 1) + v_2 \quad \forall u \in \{1, k\} \& v_2 \in \{1, m\} \quad (8)$$

$$T_{c(1, f_{t2})} = T2 \quad (9)$$

بحيث أن $T2$ هو رقم الأداة الثانية.

و f_{t2} دالة تحديد مواقع الأداة الثانية في المصفوفة السطرية للنموذج الهجين
و u رقم المجموعة الجزئية من مجموعات النموذج الهجين
و v_2 ترتيب الأداة ضمن المجموعة الجزئية (رقم العنصر في النسق الهجين للأداة
الثانية)

$$k = \frac{L}{S}, S = m + n. \quad (10)$$

m عدد طبقات النسق الأول.

n عدد طبقات النسق الثاني.

L العدد الكلي لطبقات النموذج.

و بتطبيق المعادلات السابقة على المثال المذكور آنفاً نجد:

$$T = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1]$$

6- خوارزمية الطباعة الهجينة وتصميم التطبيق

ونقصد بها الخوارزمية المستخدمة في توليد بنية النموذج وهي ترتيب لسلسلة من
العمليات المنطقية والحسابية وسلسلة من الإجراءات التي يتم العمل وفقها بغية الوصول
لنموذج الهجين انطلاقاً من نموذج أحادي المادة.

يتم توليد مسارات الطبقات المتباينة المواد وفقاً لبرنامج الخوارزمية الذي يعتمد على تقطيع ملف تشغيل الآلة الـ G-Code الأصلي مع الاحتفاظ ببارامترات الطباعة المستخدمة في طباعة النموذج الأصلي من حيث عدد الطبقات المستخدمة، اتجاه طباعة الألياف الداخلية (مسار الملء للبنية الداخلية)، عرض الجدران الخارجية، قطر رأس البثق المستخدم ومراعاة معدلات التغذية، درجات الحرارة وتراجع فيلم المادة عند الانتقالات.

مما سبق نجد أنه من المتطلبات الأساسية لعمل خوارزمية الطباعة الهجينة هي القدرة على التكيف مع أي نموذج مطلوب تهجينه وأيضاً يجب أن تراعى النقاط التالية:

- 1- القدرة على قراءة ملفات الـ G-Code الخاصة بالطباعة ثلاثية الأبعاد التي تعمل بتقنية النمذجة بترسيب المصهور الـ FDM وفترة هذه الملفات.
- 2- القدرة على إجراء الحسابات لتراجع فيلم المادة عند عملية تبديل الأدوات والانتقال من طبقة لأخرى.
- 3- القدرة على إعادة تخريج البيانات السابقة كملف G-Code جديد.

وبهذا يجب كتابة برنامج [7] يستطيع القيام بمجموعة من المهام التي من ضمنها استخدام خوارزمية الطباعة الهجينة بالدرجة الأولى بالإضافة إلى مجموعة من الأوامر والمهام التي تقيم صحة أداء هذه العملية ومنها:

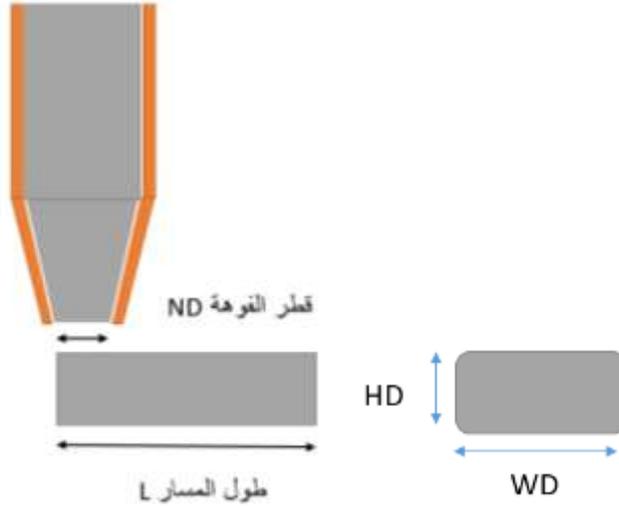
- 1- إمكانية إظهار الكود ومسارات الطباعة للنموذج الأصلي.
- 2- إمكانية حساب تقدم الفيلم وتراجع الفيلم لكل من النموذج الأصلي والهجين.
- 3- إمكانية استخدام ملفات نصية خاصة تتضمن أوامر تهيئة وإنهاء عملية الطباعة مع القدرة على تعديل صيغة تبديل الأداة لاستخدامها عند اختلاف نوع الطابعة.
- 4- إمكانية التعديل على معدلات التغذية تبعاً للأداة المستخدمة.

باستخدام بيئة الماتلاب تمت كتابة دالة `hyb_algo` بحيث تكون متغيرات دخل الدالة هي رقم أداة البدء، رقم الأداة الثانية، عدد الطبقات، عدد طبقات المادة الأولى من النسق

الهجين وعدد طبقات المادة الثانية من النسق الهجين أما بالنسبة للخرج فهو عبارة عن مصفوفة تبديل الأدوات على طبقات النموذج ويمكن كتابة الكود بالشكل التالي:

```
function [Toollist]=
hyb_algo(starttool,nexttool,nol,div1,div2)
    %% hybrid based DISTRIPUTION
    l=nol;
    % get number of layers
    m=div1;n=div2;
    % get disruption of tool 2 and tool 1
    sttool=starttool;
    % set start tool
    if sttool==0
        c=zeros(1,l);
        % create zeros array
        ndtool=1;
        % set second tool
    elseif sttool==1
        c=ones(1,l);
        % create ones array
        ndtool=nexttool;
        % set second tool
    else
        disp('not recognized tool')
        return;
    end
    %% calculation
    s=m+n;
    % vector length item
    k=round(l/s);
    % num of periods
    for ii=1:k
        a=m+(s*(ii-1));
        % series format
        for jj=a+1:a+n
            c(jj)=ndtool;
            % assign tools
        end
    end
    %% trim results
    c=c(1:l);
    Toollist=c;
end
```

ولحساب مقدار التقدم E لفيلم المادة على اعتبار أن التقانة المستخدمة هي تقانة الـ FDM تم استنتاج معادلاته من الشكل على اعتبار أن حجم المادة قبل البثق يساوي حجمها بعد البثق من أجل نفس معدل التدفق:



شكل 4 مقطع فيلم المادة المرسب

$$dE = \frac{4 \times H_D \times N_D \times FL_D \times L}{\pi \times D_F^2} \quad (13)$$

D_F قطر فيلم المادة المستخدم

FL_D نسبة معدل التدفق

H_D ارتفاع الطبقة

W_D عرض المسار المرسب

N_D قطر فوهة البثق

تستخدم المعادلة 13 من أجل كل جزء من المسار لذلك تكون قيمة E هي قيمة تراكمية متزايدة يتخللها تراجع وعودة إلى نفس القيمة أثناء الانتقالات غير الفعالة

في حين تم توليد ملف الـ G-Code للنموذج قبل عملية التجهين باستخدام برنامج Replicator G 0040 ليتم استخدام ملف الـ G-Code كملف مصدر لتوليد نموذج هجين بعد قراءته على اعتبار الطابعة المستخدمة مفتوحة المصدر لما لها من ميزات وقدرة في التحكم بملف التشغيل الـ G-Code [8-9].

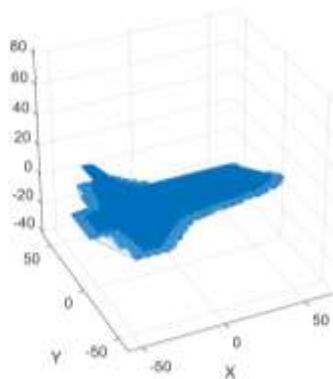
```

** This GCode was generated by ReplicatorG 0040 **
** using Smoothie (3.0) **
** for a Dual-Extruder (1) Replicator **
** on 20200620 20:18:48 (+0800) **
**** start gcode for The Replicator (dup head) ****
M103 (enable BTT)
M73 P0 (enable build progress)
G21 (set units to mm)
G20 (set positioning to absolute)
M300 S 118 T0 (set M3P temperature)
M304 S200 T0 (set extruder temperature) (temp updated by procdetect)
**** target heating ****
G160 X Y Z (save XY axis coordinates)
G161 Z F (save Z axis minimum)
G162 Z (set Z to 0)
G11 Z (force Z to 0)
G161 Z F (save Z axis minimum)
M122 X Y Z A B (physical stored home offsets for XYZAB axis)
**** end homing ****
G1 A:110 E:V:74 Z:100 F:3000 D (move to starting position)
G150 X20 Y20 Z20 A20 B20 (lower stepper shafts when feeding)
M6 T0 (set for hotend, and 1400 for main temperature)
G150 M127 V127 Z48 A127 B127 (Set Stepper motor 'val' to defaults)
M300 R1.0 T0
G20 A:110 E:V:74 (Position heaters)
G1 Z0.5 (Parker+heats)
M300 R0.0 (Set Extruder speed)
M301 (Start Extruder)
G4 P0.000 (Change filament)
**** end of M61 gcode ****
****=====skidcharge gcode ****=====
****start= 13.03.14 version**
    
```

شكل 7 برنامج الطباعة الهجينة (واجهة القراءة)

7- النتائج

بعد أن تم تحميل ملف الـ G-CODE في البرنامج وقراءته أصبح من الممكن إظهار مسارات الطباعة الأصلية من خلال البرنامج وكما هو مبين في الشكل 7 حيث يظهر مسارات الملء بالإضافة إلى مسار قاعدة النموذج أو ما يسمى الطوافة:



شكل 8 مسارات ملف الطباعة للبنية الأصلية

ليتم بعدها تنفيذ توليد النموذج الهجين برمجياً باستخدام البرنامج التي تمت برمجته وفق خوارزمية الطباعة الهجينة وبناءً على الصيغة الرياضية 3.4 وتظهر الأشكال 10,9 و11 جداول للمقارنة بين كل طبقة من البنية الأصلية مع كل طبقة من البنية الهجينة.

شكل 9 برنامج الطباعة الهجينة (واجهة جداول المقارنة)

شكل 10 برنامج الطباعة الهجينة (جدول البنية أحادية المادة)

أوامر G	إحداثيات مسار الطباعة			سرعة الطباعة	تقدم فيلم المادة
G	X	Y	Z	F	E
1	-43.8600	-8.0900	4.6700	1800	NaN
1	NaN	NaN	NaN	1200	NaN
1	NaN	NaN	NaN	NaN	2.1281e+03
1	NaN	NaN	NaN	1800	NaN
NaN	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
1	-43.8600	-8.3800	4.6700	600	2.1281e+03
1	36.2300	-8.2800	4.6700	600	2.1320e+03
1	42.2300	-7.5800	4.6700	600	2.1323e+03
1	46.9800	-6.5600	4.6700	600	2.1326e+03
1	49.4200	-5.7900	4.6700	600	2.1327e+03
1	51.6900	-4.8100	4.6700	600	2.1328e+03
1	53.6300	-3.8200	4.6700	600	2.1329e+03
1	56.8800	-1.6900	4.6700	600	2.1331e+03

Z	4.671
Tool number	0

رقم الأداة المستخدمة

شكل 11 برنامج الطباعة الهجينة (جدول البنية الهجينة)

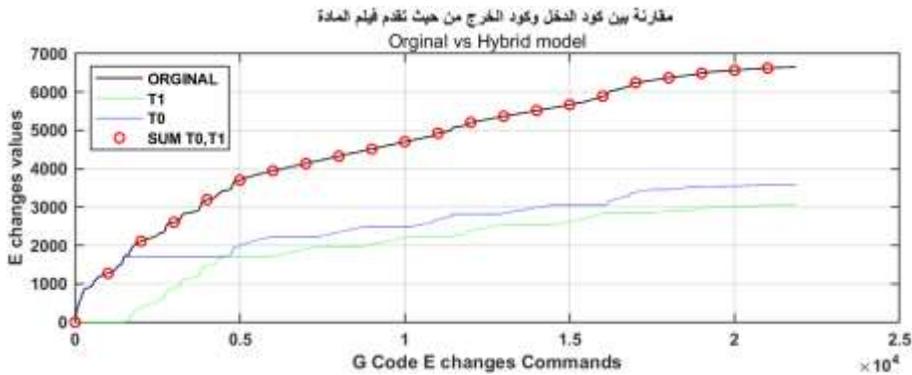
وبحساب مقدار تقدم فيلم المادة لكل من النموذج الأصلي ومقدار تقدم الفيلم لكل من الأدوات الأولى T1 والثانية T0 يمكن التأكد من أن عملية القراءة والتهجين تمت بشكل صحيح.

تظهر المخططات البيانية في الشكلين 12 و 13 محورين أولهما المحور E changes values ويعبر عن مقدار تغير تقدم فيلم المادة فيما يظهر المحور G Code E changes أوامر تقدم فيلم المادة وتراجعه أثناء طباعة كامل النموذج.

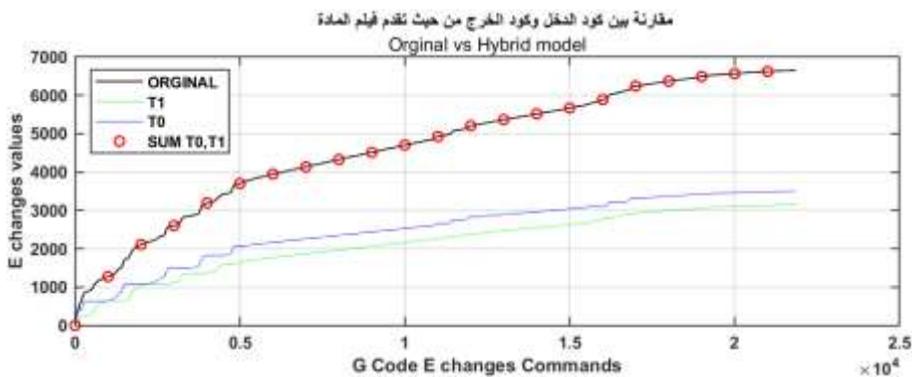
في الشكل 10 تم تنفيذ عملية التهجين بنسبة 5 طبقات للأداة الأولى مقابل 5 للأداة الثانية ويظهر تغير تقدم فيلم الأداة T0 باللون الأخضر فيما تغير تقدم فيلم الأداة T1 باللون الأحمر وبما أن حجم المادة المستخدم في النموذج الأصلي يجب أن يساوي حجم المادة المستخدم في النموذج الهجين وعلى اعتبار أن لكل من النموذجين الأصلي والهجين بارامترات الترسيب ذاتها بالتالي قيمة تقدم الفيلم ككل في كل من النموذجين يجب أن تكون

متساوية وبناءً على ذلك عند أية نقطة من نقاط المحور الأفقي يجب أن يكون مجموع تغير تقدم فيلم الأداة الأولى و تغير تقدم فيلم الأداة الثانية مساوياً لتغير تقدم فيلم الأداة الوحيدة المستخدمة في النموذج الأصلي وهو ما يظهره الشكل 12 حيث يظهر مجموع تغيرات تقدم فيلم الأداة الأولى في النموذج الهجين على شكل دوائر تنطبق بشكل تام على الخط الظاهر باللون الأسود وهو العائد إلى النموذج الأصلي.

فيما يظهر الشكل 13 تصميم لنموذج هجين آخر حيث تم تنفيذ عملية التهجين بنسبة طبقة واحدة للأداة الأولى مقابل طبقة واحدة للأداة الثانية بهدف التأكد من أن عملية التهجين يكمن تعميمها لأي تصميم يطلب.

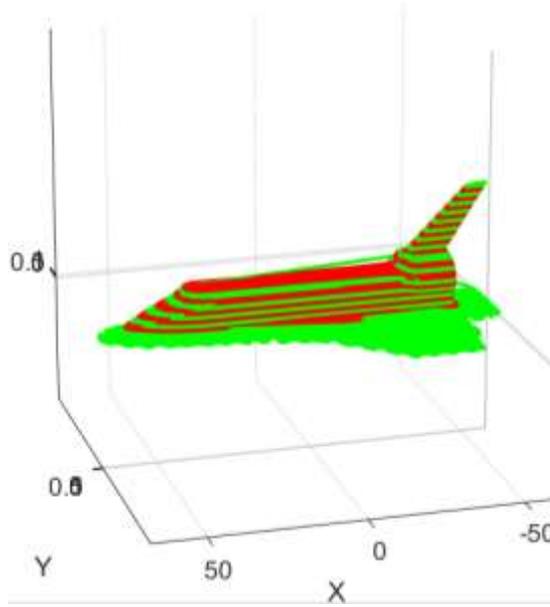


شكل 12 تقدم فيلم المادة الخاص بتصميم نموذج هجين 5 لـ 5



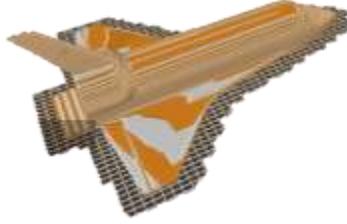
شكل 13 تقدم فيلم المادة الخاص بتصميم نموذج هجين 1 لـ 1

ومن هنا يمكن القول بأن عمل خوارزمية الطباعة الهجينة وفق النموذج الرياضي الموضح صحيح ودقيق وشامل لأي تصميم يراد تنفيذه من أجل نفس پارامترات ترسيب المسار للنموذج. يظهر الشكل 14 مسارات الطباعة الخاصة بالنموذج الهجين باستخدام الخوارزمية المطورة حيث تم اختيار لون مختلف لكل أداة وذلك ضمن بيئة التطبيق.

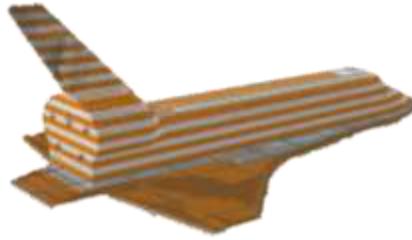


شكل 14 مسارات الطباعة الهجينة

إن جميع العمليات السابقة التي تمت برمجتها بدءاً من رسم مسارات النموذج الأحادي المادة مروراً بإظهار جداول المقارنة بين البنيتين الأحادي والهجين وتوليد مخططات تقدم فيلم المادة وانتهاءً بإظهار مسارات النموذج الهجين الخاص بالطباعة الهجينة، ما هي إلا عملية محاكاة داخل البرمجية المطورة الخاصة بالطباعة الهجينة كما أظهرت الأشكال 8,9,10,11,12,13,14 لذا من الضروري إتمام عمل المحاكاة باستخدام برامج تقطيع معروفة وشهيرة لذا تم تخريج ملف النموذج الهجين بصيغة G-code للحصول على البيئة الهجينة ولمعاينة هذه البنية تم استخدام برنامج ideaMaker وهو برنامج لتقطيع ملفات ال STL وتخريج ملفات G Code للطابعات ومعاينتها حيث يقوم البرنامج بالتمييز بين الأدوات المستخدمة من خلال الألوان المختلفة للأدوات كما هو ظاهر بالشكلين 15 و16.



شكل 15 نموذج الاختبار بعد استخدام الخوارزمية وفق تصميم (1 ل 1)



شكل 16 نموذج الاختبار بعد استخدام الخوارزمية وفق تصميم (5 ل 5)

نوع العملية	زمن المعالجة للنموذج 1-1 مقدراً بالثانية	زمن المعالجة للنموذج 5-5 مقدراً بالثانية
قراءة الملف الأصلي	19.82	19.82
توليد مخطط تبديل الأدوات	0.0007	0.0006
حلقة معالجة البيانات	20.105	20.043
تحويل البيانات الرقمية الخاصة بالنموذج الهجين إلى نص	52.505	46.693
الكتابة إلى الملف الهدف	0.0964	0.0198
مجموع الأزمنة	93.395	86.576

جدول 1 الأزمنة الخاصة بعمل برمجية الطباعة الهجينة



شكل 17 آلية توزيع أزمنة المعالجة

أما بالنسبة لأزمنة العمليات الخاصة بهذا البرنامج فقد تم الحصول عليها من خلال تعليمات خاصة ببرنامج الـ MATLAB وهي كما يبين الجدول 2 والشكل 17 وأعلى زمن هو لعملية التحويل إلى ملف G-CODE لأن خلال هذه العملية يتم التعامل مع جميع البيانات الرقمية وتحويلها لشكل نصي وفق تنسيق محدد خاص بالطباعة أي وفق تشفير خاص.

إن حجم برنامج الطباعة الهجينة يقارب 2860 سطر برمجي أي ما يقارب 45.1KB ويعالج جميع البيانات باستخدام نواة واحدة من أنوية المعالج. حجم ملفات الاختبار 1320 KB وعدد طبقات النموذج 150 طبقة ومع ملاحظة أن حجم الملف بعد التوليد للنموذج الهجين (1-1) 960 KB بينما حجمه للنموذج الهجين (5-5) وصل إلى 952 KB.

8- الاستنتاجات والتوصيات

أولاً: الاستنتاجات

- تظهر نتائج عمل الخوارزمية المطورة نجاحها في استخدام العلاقة الرياضية بغية تهجين النموذج أحادي المادة وتحويله إلى نموذج هجين مكون من مادتين مختلفتين وما يدعم ذلك هو مقارنة مقدار تقدم فيلم المادة بين كل من النموذج الأصلي والنموذج الهجين بالإضافة إلى معاينة النموذج الهجين في بيئة التطبيق وأيضاً باستخدام برنامج ideaMaker.

- يزداد زمن تشغيل النموذج وذلك بسبب تغير معدل التغذية من جهة وتبديل الأدوات من جهة أخرى.
- الذاكرة والزمن المطلوبين لعملية تهجين النموذج يعتمد على شكل النموذج المراد تهجينه أي على حجم ملف التشغيل للنموذج الأصلي ويصل استخدام التطبيق إلى حوالي 512 MB من الذاكرة RAM.

ثانياً: التوصيات

- إنجاز مجموعة من الاختبارات باستخدام مجموعة من المواد المختلفة وفق مفهوم الطباعة الهجينة المبتكر بغية بحث الخواص الميكانيكية للنماذج الهجينة
- تطوير علاقات رياضية لتصاميم هجينة تستخدم أكثر من أداتين.
- بما أن برنامج Matlab مخصص للأغراض البحثية يمكن برمجة الخوارزمية باستخدام لغات برمجة أخرى تساعد في تقليل كلفة المعالجة في الحاسب وتجعلها أكثر قابلية للاستثمار.

المراجع

1. Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies [Internet]. New York, NY: Springer New York; **2015** Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-2113-3/>
2. Tymrak BM, Kreiger M, Pearce JM. Mechanical properties of components fabricated with open-source 3-D printers under realistic environmental conditions. Mater Des. **2014** Jun;58:242–6
3. Kalita SJ. Rapid prototyping in biomedical engineering: structural intricacies of biological materials. In: Biointegration of Medical Implant Materials [Internet]. Elsevier; **2010**. p. 349–97. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781845695095500136/>
4. Burn MB, Ta A, Gogola GR. Three-Dimensional Printing of Prosthetic Hands for Children. J Hand Surg. **2016** May;41(5):e103–9.
5. Singh R, Kumar R, Farina I, Colangelo F, Feo L, Fraternali F. Multi-Material Additive Manufacturing of Sustainable Innovative Materials and Structures. Polymers. **2019** Jan 4;11(1):62
6. Momeni F, M.Mehdi Hassani.N S, Liu X, Ni J. A review of 4D printing. Mater Des. **2017** May; 122:42–79
7. Develop Apps Using App designer-MATLAB & Simulink – mathworks.com [Internet]. Available from: <https://mathworks.com/matlab/app-designer.html/>
8. Comparing Open-Source and Low-Cost 3D Printers with Commercial Products - additive3d.com [Internet]. Available from: <https://additive3d.com/comparing-open-source-low-cost-3d-printers-commercial-products/>

9. G-code – rewrap.org [Internet]. Available from:
<https://rewrap.org/wiki/G-code/>

There is ideas that can be described as scientific breakthroughs have emerged because of the human need for innovation, which has been the reason for the invention of new tools in many fields such as modeling and manufacturing. One of the most notably modeling and manufacturing tools at present is 3D printing, which is distinguished by its ability to build complex-shaped models in simple steps. This technology rapidly has become a revolution in product development and an important field for research. This paper, defines a new concept in the 3D printing field which represented by inventing a new structure can be called hybrid because it has more than one material in the model structure therefore a new algorithm was defined. Hybrid printing algorithm based on a mathematical formula to switch the materials through the model layers achieved using a software built in MATLAB environment using App designer, this program used to post new printing files or g-code files for hybrid models then the resulted G-code verified with a common slicer.

