تأثير برامج تحليل العناصر المحدودة على جودة تصميم الحشو الداخلي للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد

The effect of finite element analysis programs on the quality of infill design of the 3D printed model

أ.د / جلال سلام

أستاذ بقسم الطباعة والنشر والتغليف - كليه الفنون التطبيقية - جامعه حلوان

Prof. Galal Sallam

Professor, Department of Printing, Publishing and Packaging - Faculty of Applied Arts - Helwan University

أ.د / نيفين عبد العزيز صالح

أستاذ بقسم الطباعة والنشر والتغليف - كليه الفنون التطبيقية - جامعه حلوان

Prof. Nevin Abd-Elaziz Salah

Professor, Department of Printing, Publishing and Packaging - Faculty of Applied Arts - Helwan University

الباحثة / ريهام محمد عبد الحميد

أخصائي فنون بقسم الجرافيك وفنون الإعلان – المعهد العالي للفنون التطبيقية بالسادس من أكتوبر

Researcher. Riham Mohamed Abd-ELhamid

Art specialist, Department of Graphics and Advertising Arts - Higher Institute of Applied Arts, Sixth of October

riham.melnagar@gmail.com

الملخص:

ان الطباعة ثلاثية الابعاد عملية تؤدي الى تصنيع نماذج مجسمة مباشرة باستخدام مواد خام طبقة تلو طبقة في مختلف الاتجاهات معتمدة على تقنية الطباعة المستخدمة من خلال ملف التصميم للنموذج ثلاثي الأبعاد دون استخدام معدات اضافية وبتكلفة اقل من طريقة التصنيع التقليدية.

تعد تقنية النمذجة بالترسيب المنصهر (*FDM*) من افضل تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد و الأكثر انتشارا بأسعار معقولة في السوق كما تعد خيارًا رائعًا للنماذج الأولية السريعة والمنخفضة التكلفة التي يمكن استخدامها لمجموعة متنوعة من التطبيقات كما يمكن أن تكون حلاً مناسبًا للنماذج الوظيفية.

يمكن تصميم النماذج المطبوعة بحيث لا تحتاج الى جمعها معا باستخدام الهندسة المعقدة وبالتالي تصبح تكلفة المواد الخام والتصنيع منخفضة حيث ذلك يؤدى الى تحسين الخصائص الميكانيكية للنماذج المطبوعة مثل القوة والصلابة مما يؤدى الى زيادة جودة أداء النموذج الوظيفي.

ان تحديد عناصر المعايير الاساسية في التصميم مثل (الدعامات والجسور والحشو الداخلي وسمك الجدران) اداه مهمة لنجاح تصميم النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد، وهذه العناصر تكمن في قوة التحمل، بيئة العمل، الثبات الديناميكي والعمر الافتراضي حتى ظروف التخزين كل هذه العناصر تؤثر على جودة النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد.

من ثم تهدف هذه الدراسة الى تحليل وتحقيق نقاط القوة والضعف للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد ومدي تأثير تطبيق المعايير العالمية لتصميم الحشو الداخلي عند تجهيز ملف التصميم على جودة المنتج المطبوع.

ولتحقيق الجودة في النموذج المطبوع تم الاستعانة بالنتائج المحققة من برنامج تحليل العناصر المحدودة (*Finite elements analysis FEA*) باستخدام برنامج *Autodesk Fusion 360* لأجراء تحسينات على تصميم الحشو

الداخلي للنموذج (*infill*) المطبوع بتقنية *FDM*عن طريق تغيير تركيبة الحشو من خلال تغير الكثافة بناءً على قيم الضغط المصاحبة من خلال محاكاه النموذج على البرنامج وثم طباعة النموذج قبل التحسين وبعده واختباره تحت ظروف ضغط تصل الى ٨٥كجم.

الكلمات دالة:
الطباعة ثلاثية الابعاد، النمذجة بالترسيب المنصهر، الحشو الداخلي، برامج تحليل العناصر المحدودة.

Abstract:

3d printing is a process that leads to the manufacture of 3d models directly using layer-by-layer raw materials in various directions depending on the printing technology used through the design file of the 3D model without the use of additional equipment and at a lower cost than the traditional manufacturing method. FDM is one of the best, most popular and affordable 3D printing technology on the market. It is a great choice for fast, low-cost prototypes that can be used for a variety of applications and can also be a suitable solution for functional models.

Printed models can be designed so that don't need to be combined together using complicated engineering and then lower cost that improves the mechanical properties of printed models such as strength and hardness, which leads to improved performance of the functional model with the possibility of reducing the use of raw materials.

Defining the basic standards elements in the design such as (supports, bridging, infill and wall thickness) is an important tool for the successful design of the 3D printed model, and these elements lie in durability, ergonomics, dynamic stability and longevity, even storage conditions. All these elements affect the quality of the 3D printed model.

Then this study aims to analyze and achieve the strengths and weaknesses and the extent of the impact of applying international standards for infill design when preparing the design file on the quality of the printed product. To achieve quality in the printed model, the results attained from finite elements analysis (FEA) to influence the design of the internal structure by locally varying the composition of the infill based upon the associated stress values by using Autodesk Fusion 360 program to simulating the model on the program and then printing the model before and after the improvement and testing it under pressure conditions of up to 85 kg.

المقدمة:

تواجه الطباعة ثلاثية الابعاد التي تعرف باسم التصنيع بالإضافة نمو تكنولوجي كبير وتعد حرية الاختيار في التصميم أحد الحوافز الاساسية لهذا النمو الذي يعد جزء اساسي لعمل اي منتج ويعتبر عنصر اساسي في الطباعة ثلاثية الابعاد حيث انه يتحكم في جودة النموذج النهائي بالإضافة الى توفير فرصًا أكبر في تحسين الخواص الميكانيكية للأجزاء (مثل القوة والصلابة والثبات الديناميكي)، مما يؤدي بدوره إلى رفع جودة المنتج المطبوع مع تقليل الاستخدام للمواد.[٢]

من الفوائد الرئيسية للطباعة ثلاثية الأبعاد أن النماذج المطبوعة قد تكون متشابهة في الشكل الخارجي لكن يمكن أن تكون مختلفة بدرجات متفاوتة من الأجوف[١] ولذلك هي الأفضل حيث ان من منظور الإنتاج هذا يقلل من المواد والتكلفة وكذلك وزن المنتج النهائي، ومن منظور الطباعة فإنها توفر وقتًا ثمينًا لذلك وجود الحشو الداخلي للنموذج المطبوع مهم لرفع جودة النموذج النهائي.[٨]

تتفاوت درجات الحشو الداخلي للهيكل الواحد المطبوع طبقا لاحتياجات الإنتاج حيث ان هذا يقلل المواد والتكلفة وكذلك وزن المنتج النهائي وايضا فإنه يوفر وقتًا ثمينًا و تتضمن التطورات الحديثة في برامج التشريح *slicing software* اختلافات في الكثافة و إمكانية تعديلها يدويا عن طريق ادخال النسبة المئوية للأجزاء الصلبة و المجوفة وتقوم هذه البرامج بمعالجة الحشو الداخلي كتصميم مستقل للاستفادة من تعديل دقة الطباعة والألوان و لكنها هشة في الأداء الميكانيكي؛ لذلك يتم التأثير على تصميم الهيكل الداخلي (الحشو الداخلي) للنموذج باستخدام برامج تحليل العناصر *FEA* لتحقيق اعلى جودة للنموذج المصمم رقميا قبل البدء في الطباعة.[٣]

مشكلة البحث: كيف يمكن تحقيق جودة أفضل وقوة تحمل أكبر للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد من خلال تصميم الحشو الداخلي؟ وما هي معايير التصميم القياسية للحشو الداخلي لرفع جودة النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد؟

اهداف البحث: يهدف البحث رفع جودة النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد من خلال تطبيق المعايير القياسية على تصميم الحشو الداخلي للنماذج المطبوعة بتقنية *FDM* بدون التغير في تصميم الهيكل الخارجي للنموذج.

فروض البحث: يفترض البحث ان تطبيق معايير تصميم الحشو الداخلي للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد واستخدام المحاكاة من خلال برامج تحليل العناصر المحدودة *FEA* لتجهيز ملفات التصميم في الطباعة ثلاثية الابعاد يؤدي الى رفع جوده و قوة تحمل النموذج المطبوع .

منهج البحث: يعتمد البحث على منهجي:

١/المنهج الوصفي: من خلال إجراء دراسة مسحية للمعايير القياسية العالمية لتصميم الحشو الداخلي *INFILL* للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد.

٢/المنهج التجريبي: استخدام احدى برامج تحليل العناصر المحدودة *FEA* للتأثير على تصميم الحشو الداخلي *INFILL* للنموذج المصمم للطباعة ثلاثية الابعاد دون التغير في تصميم الهيكل الخارجي للنموذج.

تنقسم خطوات البحث الى محورين:

المحور الأول الدراسة النظرية: تشمل

1- تعريف الحشو الداخلي

2- معايير تصميم الحشو الداخلي للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد

المحور الثاني الدراسة العملية:

تشمل استخدام برنامج تحليل العناصر المحدودة *FEA* (*Autodesk Fusion 360*) للتأثير على الحشو الداخلي *INFILL* للنموذج المصمم للطباعة ثلاثية الابعاد (تصميم فاتحة الزجاجات *bottle opener*).

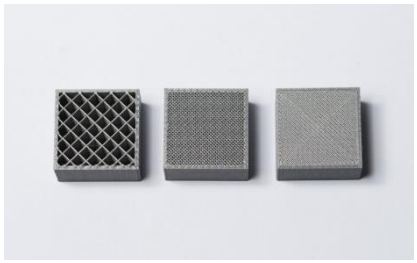
المحور الأول: الدراسة النظرية *Theoretical study*:

الإطار النظري للبحث يستند ان من المعتاد لكي يتم تحقيق افضل جودة للنموذج ثلاثي الابعاد يتم زيادة كثافة الحشو الداخلي للنموذج و بالتالي استخدام اكثر للمواد الخام ،لكن ستظل المشكلة قائمة لان بالرغم من ذلك عندما يتعرض النموذج الى ضغط يتحطم بسهولة ، لذلك تتم دراسة معايير تصميم الحشو الداخلي للنموذج حيث تجعل للمطبوعات بنية واستقرار كبير مما يجعلها ذات قوة تحمل عالية للضغط ويقلل فرص التحطم ولا يجعلها هشة[١] ، كما تتم محاكاة النموذج باستخدام برامج تحليل العناصر المحدودة *FEA* لتحديد الأجزاء الأضعف التي تتعرض لضغط و تؤثر على جودة و قوة تحمل النموذج و

يتم من خلال ذلك زيادة كثافة الحشو الداخلي في هذه الأجزاء مما يؤدي الي جودة افضل للنموذج المطبوع خاصة اذا كان يؤدي مهمة وظيفية.[٢]

أولا تعريف الحشو الداخلي *infill*:[٣]

الحشو الداخلي (*infill*) هي البنية الداخلية للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد بمعنى انه هيكل متكرر لشغل مساحة فارغة داخل النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد، وهذه البنية لا تتم رؤيتها بعد الانتهاء من الطباعة في معظم المطبوعات على الرغم من ان هناك تصميمات للحشو الداخلي ذات مظهر جمالي.



شكل (١) يوضح الحشو الداخلي للنموذج [٣]

ثانيا فائدة الحشو الداخلي *infill* [٨]

1. هناك اغراض اخرى للحشو بالإضافة الي ملء مساحة فارغة من النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد فإنها تلعب دور في جودة المنتج المطبوع من حيث تغير وزن وقوة وصفات النموذج وذلك اعتمادا على المواد المستخدمة لها.
2. بالإضافة الي انه يسمح بالطباعة على الحواف الافقية على مساحة فارغة بشكل موثوق وفعال مما يزيد من جودة النموذج.
3. الحشو الداخلي للنموذج يجعل للمطبوعات بنية واستقرار كبير مما يجعلها ذات قوة تحمل عالية للضغط ويقلل فرص التحطم ولا يجعلها هشة.

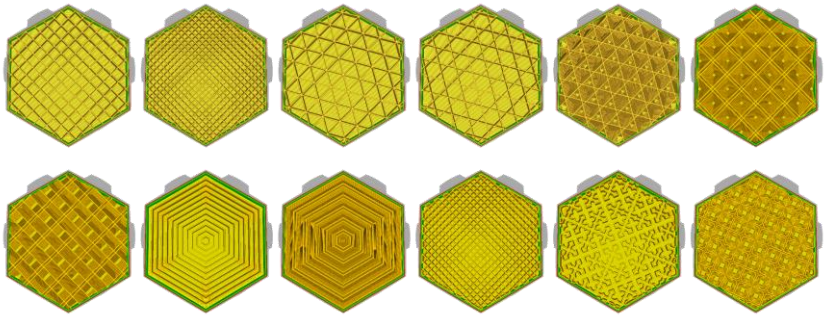
ثالثا المعايير القياسية لتصميم الحشو الداخلي

١/ تصميمات الحشو الداخلي للنموذج: *infill design*

يتم وضع تصميم افتراضي للبنية الداخلية للنموذج المطبوع اثناء عمل التصميم بوجه عام الا ان للحشو الداخلي العديد من التصميمات المختلفة في الانماط والاحجام، ولكل تصميم نقاط قوة وضعف خاصة به وعلى الرغم ذلك يوجد تصميمات قياسية يتم استخدامها، ونظرا لان الحشو الداخلي *infill* تشغل مساحة داخل النموذج المطبوع فإن الحشو المصمم لأداء وظيفي أفضل من المصمم لأداء تجميلي (النماذج الشفافة) فقط.[٧]

تتكون الانماط من الاشكال الاتية:

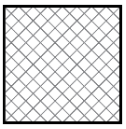
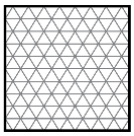
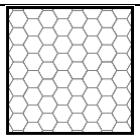
تتضمن انماط الحشو الداخلي للهيكل على العديد من التصميمات مثل *octa* ، *(Archi, Hilbert , Concen , line)* يوضح الشكل تصميمات الحشو الداخلي



شكل (٢) بوضح تصميمات الحشو الداخلي[٩]

وتعد تصميمات *Octa*، *Archi* الافضل من حيث التصميمات الدائرية للحشو الداخلي للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد، بينما تصميمات *Hilbert , 3d honey* الافضل في التصميمات الكتل الموجهة باتجاه محدد[٩].

يوضح جدول١ الانماط الاكثر استخداما والأفضل لرفع جودة تصميمات الحشو الداخلي للنموذج المطبوع ثلاثي الابعاد

انماط وتصميمات الحشو الداخلي	الوصف
	النمط المستطيل: نمط حشو قياسي لطباعة *FDM*. لديه قوة في جميع الاتجاهات وسرعة جيدة للطباعة ويتطلب اقل قدر من الجسور للحصول عليه
	مثلثي أو قطري: يستخدم عندما تكون هناك حاجة للقوة في اتجاه الجدران. المثلثات تستغرق وقتًا أطول قليلاً للطباعة
	الزجزاجي: يسمح للنموذج أن يكون طريًا أو ملتويًا أو مضغوطًا. يمكن أن يكون اختيارًا جيدًا خاصةً مع مادة مطاطية ناعمة أو نايلون ناعم.
	خلية النحل: يجعل النموذج سريع الطباعة وقوي، مما يوفر قوة في جميع الاتجاهات.

جدول (١) يوضح تصميمات الحشو الداخلي[٣]

٢/كثافة الحشو الداخلي: *Infill density*

بعد اختيار تصميم الحشو بما يتناسب مع النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد لضبط الجودة تأتي الخطوة التالية وهي ضبط الكثافة الخاصة به.[٨]

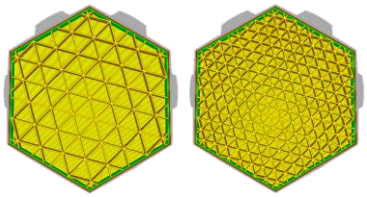
تبدأ ضبط الكثافة بنسبة ٠% وهو ما يعني عدم وجود حشو داخلي الي ١٠٠% وهو مكافئ للطباعة الصلبة المصمتة ويوجد بينهم العديد من القيم التي من خلال ضبطها تؤدي الي ضبط الجودة الطباعية للنموذج.

تؤثر كثافة الحشو الداخلي على وزن النموذج المطبوع وتغير كتلته وتتناسب بشكل طردي فكلما زادت كثافة الحشو الداخلي زاد وزن النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد والعكس كلما قلت الكثافة نتج نموذج ذو وزن خفيف.

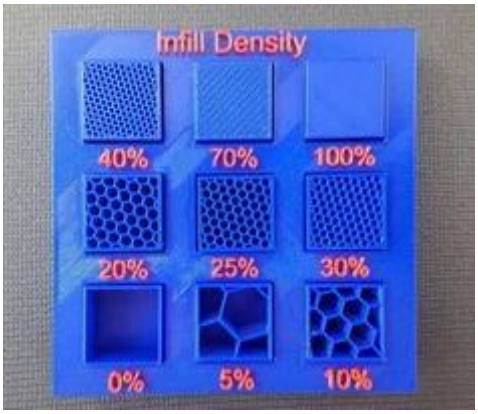
تتراوح الكثافة الشائعة من ٢٥:٢٠ % التي توفر توازن جيد بين المتانة واستهلاك المواد الخام، وإذا كان الحشو لا يؤثر علي جودة النموذج المطبوع فمن الممكن ان تتراوح الكثافة من ١٥:١٠ %.

وفي حالة ان النموذج المطبوع يحتاج الي تصميم حشو داخلي ذو قوه ومتانة فالأفضل استخدام حشو ذو كثافة ٥٠%.

واخيرا عندما يؤدي الحشو الداخلي مهمة وظيفية وقوة وجودة مرتفعة يتم استخدام حشو داخلي ذو كثافة اعلي حتى ١٠٠% لذلك عند ضبط الكثافة واختيار التصميم المناسب بشكل صحيح فإن تصميمات الحشو الداخلي تعطى حجم جيد بين الفجوات ويسمح للطباعة على مساحة فارغة بأقل خطا وجودة اعلى.[٨]



شكل (٣) يوضح النموذج الموجود يمينا انه ذو كثافة اعلي من النموذج الموجود يسارا [٩]



شكل (٤) يوضح كثافات مختلفة لنفس النمط للحشو الداخلي [١٠]

٣/تطبيق معايير التصميم للحشو الداخلي للنموذج المطبوع باستخدام برنامج *Cura* [١٠]

أولا تعريف برنامج *Cura 3d*:

هو برنامج تشريح للطابعات ثلاثية الأبعاد. يحول النموذج ثلاثي الأبعاد إلى طبقات لإنشاء ملف يعرف باسم *G-Code*، وهو الرمز الذي تفهمه الطابعة ثلاثية الأبعاد.[١٠]

G-Code مجرد مستند نصي يحتوي على قائمة من الأوامر للطابعة ثلاثية الأبعاد لقراءتها ومتابعتها مثل درجة الحرارة و اتجاهات الطبقات

ثانيا ضبط اعدادات الحشو الداخلي فيما يتوافق مع المعايير على برنامج *Cura*

1. خطوط الحشو الداخلي *Infill line directions*:

يمكن قياس كثافة الحشو الداخلي برنامج *Cura* بمسافة الخط وليس فقط بالنسبة المئوية حيث تحدد المسافة بين كل خط حشو فيتم قياس الكثافة بتغير المسافة بين خطوط الحشو الداخلي.

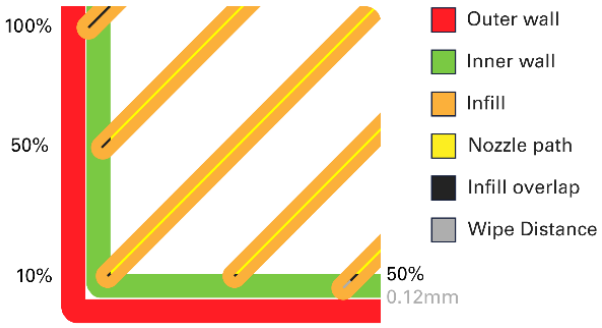
تتم طباعة خطوط الحشو الداخلي بزاوية ٤٥ درجة، في هذه الزاوية تعمل محاور *x* و*y* معا للحصول على أقصى قدر من السرعة دون فقدان في الجودة الطباعية، إذا تتطلب التصميم طباعة الخطوط في اتجاه مختلف، فيمكن ضبط المحاور عند ٠ درجة للرأسية و ٩٠ درجة للأفقية

2. تغير اعداد مكان النمط للحشو الداخلي باستخدام محاور *X,Y* "*infill XY offset*"

لنقل نمط الحشو الداخلي في اي اتجاه سواء الى اليسار او اليمين او اعلى او أسفل يمكن تغير اماكن المحاور *x*، *y*، فإن القيمة الموجبة يتم فيها تحريك المحاور للأعلى واليمين، والقيمة السالبة يتم تحريك المحاور للأسفل واليسار.

3. ضبط اعداد تداخل الحشو مع الجدران *infill overlap percentage*

باستخدام هذا الإعداد، يمكنك التحكم في مقدار التداخل بين الحشو والجدران. يمكن تعيينه كنسبة مئوية أو قيمة حقيقية. عادةً ما تؤدي القيمة الأعلى إلى ترابط أفضل بين الحشو والجدران. ومع ذلك، قد يقلل أيضًا من جودة الصورة المرئية للنموذج، يوفر برنامج *Cura* قيم افتراضية وهي ١٠% تكون مناسبة لضبط الجودة الطباعية.



شكل (٥) يوضح النسب المئوية لضبط التداخل الحشو الداخلي مع الجدران[١٠]

من خلال الشكل يوجد اعداد *wipe distance* لضبط البثق حيث يعمل على ارشاد الطابعة على توقف طباعة الحشو الداخلي قبل البدء في طباعة الجدران.

4. ضبط اعداد ارتفاع طبقة الحشو الداخلي *Infill_layer_thickness*

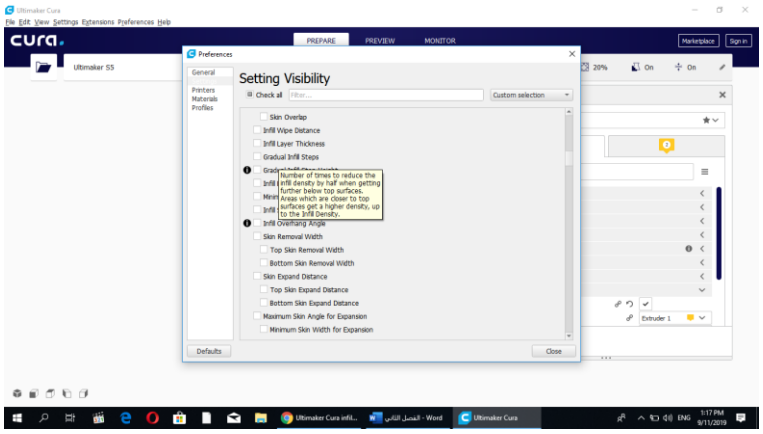
ان سمك طبقة الحشو الداخلي لا يؤثر على الجودة الطباعية للنموذج لذلك إذا كان النموذج يتطلب سمك الحشو الداخلي أكبر يتم ضبط ذلك من خلال اعداد سمك الطبقة *infill layer thickness* لتصبح أكثر سمكا ولا يؤثر على الجودة الطباعية بل يقلل من وقت الطباعة.

علي سبيل المثال عند طباعة نموذج بسمك حشو داخلي ٠،٢مم بينما ارتفاع الطبقة ٠،١مم تقوم الطابعة بطباعة طبقتان من الجدران اولا ثم طباعة الحشو الداخلي.

5. ضبط اعداد خطوات التغير التدريجي لكثافات الحشو الداخلي *gradual infill steps*:

تعمل خطوات التغير التدريجي على تقليل كمية الحشو الداخلي المستخدمة عن طريق تقليل كثافة الحشو في الطبقات السفلي وزيادة كثافة الحشو في الطبقات العليا بالتدريج عن طريق تقسيم نسبة الحشو تدريجا لطبقات الحشو على سبيل المثال إذا

كانت نسبة الحشو ٢٠% تصبح الحشو الداخلي في اعلى ٥ مم في الطبقات الأعلى ٢٠% و١٠% على باقي الطبقات وذلك لتقليل وقت الطباعة.



شكل (٦) يوضح ضبط اعدادات الحشو الداخلي *infill* على برنامج *Cura*

6. ضبط خطوات اعداد تدفق كثافة الحشو الداخلي *Gradual infill steps*

يعمل إعداد التدفق التدريجي لكثافة الحشو الداخلي المستخدمة على تقليل كمية الحشو من خلال تقليل نسبة الحشو في الطبقات السفلى ويتم التقسيم التدفق التدريجي على جزئين مثل عند طباعة نموذج يتم طباعة اول ٥ مم بكثافة ٢٠% فيما أكثر و١٠% لباقي النموذج وذلك لتقليل وقت الطباعة والمواد المستخدمة بجودة عالية.

ضبط اعداد الحشو الداخلي قبل الجدران *infill before walls*:

ربما عند طباعة الجدران قبل الحشو الداخلي ينتج جدران أكثر دقة ولكن زاوية انحدار سيئة الجودة لكن في هذا الاعداد يتم طباعة الحشو الداخلي للنموذج قبل طباعة الجدران مما يؤدي الى جودة طباعية اعلى لزاوية الانحدار وثبات أقوى للجدران مع احتمالية ان نمط الحشو الداخلي يكون مرئ على السطح الخارجي فينتج سطح أكثر صرامة وقوة وذو جودة طباعية اعلى.

اعداد *Minimum infill area* :

يستخدم هذا الاعداد للمساحات الصغيرة حيث يستبدل الحشو الداخلي في الطبقات الرقيقة بقشرة سميكة "*skin*".

المحور الثاني: الدراسة العملية

استخدام برنامج لتحليل العناصر المحدودة *FEA* (*Autodesk Fusion360*) لتأثير على الحشو الداخلي *Infill*للنموذج المصمم للطباعة ثلاثية الابعاد

الهدف من هذه التجربة هو اثبات بانه يمكن تحقيق زيادة في القوة ثلاث مرات ونصف عندما يتم تحديد قيم الاجهاد داخل هيكل النموذج (الحشو الداخلي) من خلال التأثير على تصميم الحشو الداخلي للنماذج المطبوعة بتقنية *FDM* بدون التغير في تصميم الهيكل الخارجي للنموذج وذلك لتحديد الأجزاء الأضعف التي تتعرض لضغط وتؤثر على جودة وقوة تحمل النموذج ويتم من خلال ذلك زيادة كثافة الحشو الداخلي في هذه الأجزاء مما يؤدي الي جودة أفضل للنموذج المطبوع [٤]

أ. تعريف برنامج تحليل العناصر المحدودة (*Finite element analysis FEA*):

هو عبارة عن تقنية رقمية تستخدم في عملية التحقق واختبار المنتج في مرحلة التصميم عن طريق المحاكاة قبل الاختبارات التجريبية، تساعد كثيراً في محاولة الفهم الشامل لسلوك القطعة المصممة، تحت تأثير الأحمالِ المختلفة، وخصوصاً في حالة دراسة القطع ذات الشكل الهندسي المعقد.[٦]

ب. تطبيق برنامج تحليل العناصر المحدودة (*FEA*) على نموذج مصمم للطباعة بتقنية *FDM*:

قامت الدارسة بإدخال النموذج المصمم للطباعة ثلاثية الابعاد على أحد برامج *FEA* للتأثير على تصميم الحشو الداخلي من خلال تغير كثافة تركيبة الحشو بناء على قيم الضغط والاحمال المعرض لها النموذج.

الأدوات المستخدمة:

١_ برنامج *CAD* لتصميم نموذج (فاتحة الزجاجات *bottle opener*).

٢_ برنامج *Autodesk Fusion 360* لأجراء تعديلات على النموذج.

٣_ برنامج *Cura 4.3*لتحويل الملف الى *g-code* لكي تتم الطباعة.

٤_ ماكينة الطباعة *SP3* والمادة الخام *PLA*.

٥_ جهاز لقياس قوة الضغط بالوزن *Universal Testing Machine*.

ج. خطوات إجراء التجربة:

لكي يتم الحصول على نموذج مطبوع ثلاثي الابعاد ذو جودة وقوة ومتانة فمن المعتاد هو زيادة المواد وزيادة كثافة الحشو الداخلي لكن المشكلة ستظل قائمة لان لا داعي من إضافة المزيد من المواد الخام يفضل فقط في المناطق الضعيفة التي تتعرض لأشد ضغط.[٥]

ان دراسة النموذج ومحاكاته يتم فيها تحديد فيه الأجزاء الأضعف تعرف باسم تقنية تحليل العناصر المحدودة*FEA* من خلال برنامج *Autodesk fusion360* يعمل على التأثير على الحشو الداخلي فيما يعرف باسم *Smart Infill* عند تطبيقها على تقنية *FDM* مع ضمان عدم تأثر الهيكل الخارجي للنموذج.

تتكون التجربة من ٥ مراحل:

١/ تصميم النموذج على برنامج *CAD*.

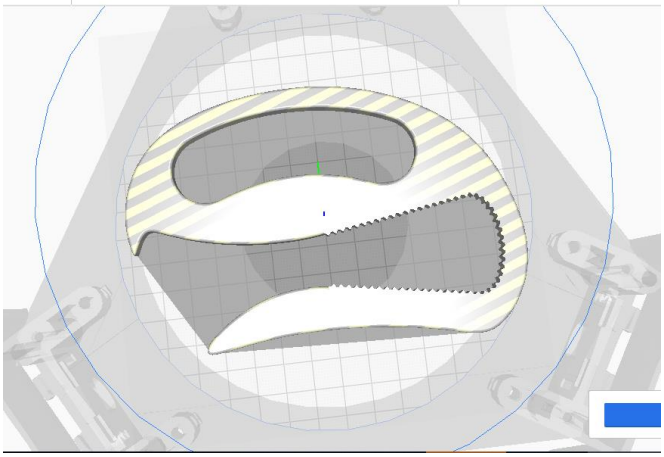
٢/ ادخال النموذج على برنامج *Autodesk Fusion 360*.

٣/ التأثير على تصميم الحشو الداخلي باستخدام *FEA* على برنامج *Autodesk Fusion 360* .

٤/ انتاج *G-code* على برنامج *Cura* وتطبيق المعايير التصميم قبل الطباعة.

١/ تصميم نموذج (فاتحة الزجاجات *bottle opener*):

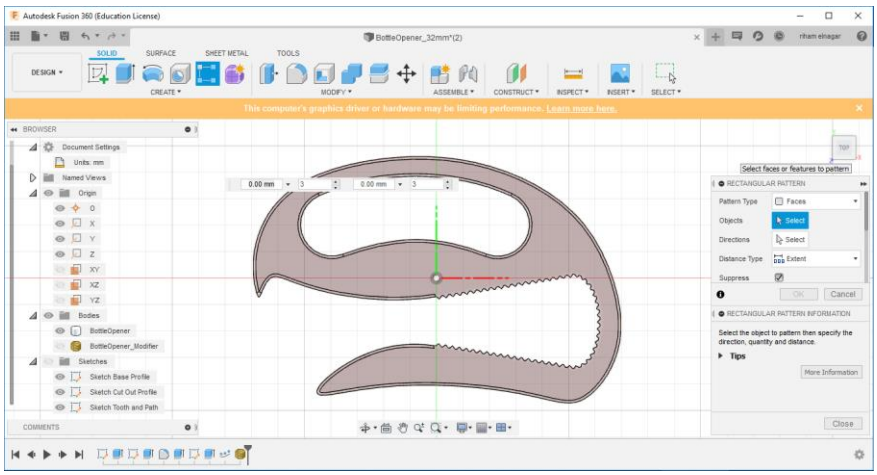
هو عبارة عن تصميم النموذج على برنامج *CAD* من خلال انشاء ملف *STL* للنموذج الذي يوضح هندسة النموذج.



شكل (٧) يوضح تصميم النموذج *Bottle opener*

٢/ ادخال النموذج على برنامج *Autodesk Fusion 360*:

بعد تصميم النموذج يتم ادخال النموذج على أحد برامج تحليل العناصر المحدودة *FEA* و قد تم استخدام برنامج *Autodesk Fusion 360*



شكل (٨) يوضح النموذج على برنامج *Autodesk Fusion 360*

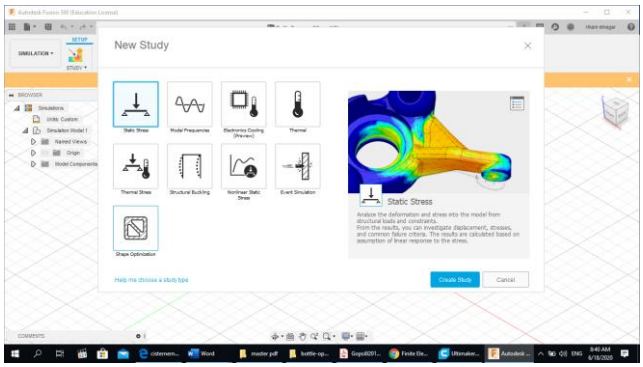
٣/ تصميم الحشو الداخلي *Smart Infill* باستخدام *FEA* على برنامج *Autodesk Fusion 360*

أولا: المحاكاة *Simulation*:

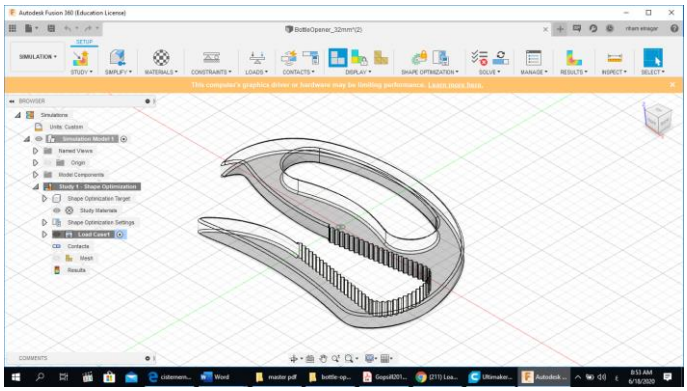
من خلال برنامج*Autodesk Fusion 360* يتم محاكاة التصميم الداخلي للحشو *Infill* لدراسة أضعف جزء للإجراء تحسين للبنية الداخلية للنموذج.

يتم تحليل الابعاد المقترحة لنمط الحشو الداخلي على أساس خوارزمية فيتم تحويل الحشو الداخلي الى شبكة ثلاثية الابعاد ذات درجات مختلفة وذلك من خلال بيانات الايزو وقيم السطح الخارجي لتكوين قيم الكثافة والخصائص الميكانيكية وذلك بناء على تحليلات مختلفة لقيم الضغط المرتبطة بهاو تستغرق مدة المحاكاة من٣٠:٤٥ دقيقة.

و تتم من خلال اختيار اعداد *MODEL →Simulation →Shape optimization*



شكل (٩) يوضح ضبط اعدادات البرنامج لمحاكاة النموذج

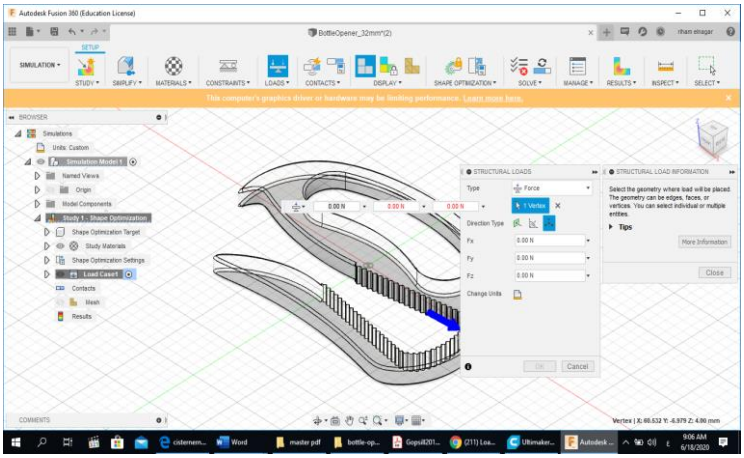


شكل (١٠) يوضح النموذج اثناء المحاكاة

ثانيا: اعداد الضغوط على هيكل النموذج *Structural constraints*:

يتم فيه تحديد مسارات الضغط في النموذج على المناطق التي يكون المرغوب فيها الحصول على كثافة اعلى من الحشو الداخلي لتحمل الضغط، والمسارات الغير معرضة لضغط هي التي يمكن فيها تقليل الكثافة.

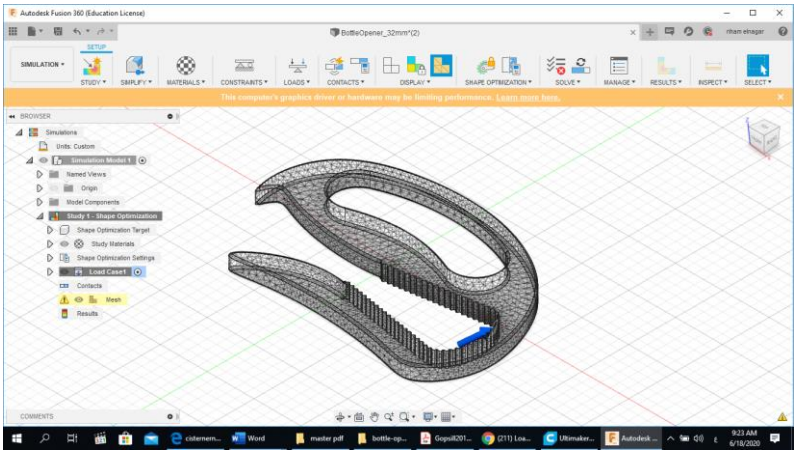
من خلال ضبط اعداد *structural →Fix →Structural constraints load* وضبط الاعدادات في محاور *x,y,z* و ذلك لتحديد نقاط الارتكاز المعرضة للضغط.



شكل (١١) يوضح إشارة السهم للاماكن المعرضة لضغط

ثالثا: انشاء مقياس التصميم الشبكي للحشو الداخلي *Mesh size*

يتم تأسيس مقياس الشبكة للهيكل الداخلي حيث يقوم البرنامج بحساب المعامل في الاتجاهين *x,y* للشبكة و تحديد اطوال الاضلاع للنموذج للتأكد من عدم تداخل الشبكة مع المحيط الخارجي للنموذج عند الطباعة.



شكل (١٢) يوضح مقياس التصميم الشبكي للحشو الداخلي *Mesh size*

ومن خلال اعداد *Shape optimization* تحديد النسبة المئوية للمادة الخام التي يتم استخدامها بناء على البيانات السابقة.

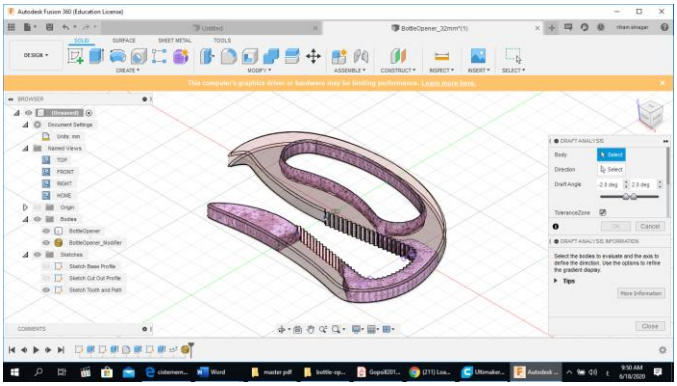
رابعا: التعديل على الحشو الداخلي للنموذج *Modify*

اجراء التحليل *(solve)* والذي يستغرق من ٣٠:٤٥ دقيقة لإنشاء التعديل على كثافة الحشو الداخلي فيما يتناسب مع قيم الضغط حيث يتم فيه خلق مجموعة من النقاط لنمط الحشو الداخلي من خلال اتصال كل نقطة مع خطوط متعددة وفي خطوط تماثل ما يقوم برنامج التقطيع.

شكل (١٣) يوضح توزيع كثافة المواد الخام للنموذج بعد المحاكاة

خامسا تحويل نموذج المحاكاة الي شبكة

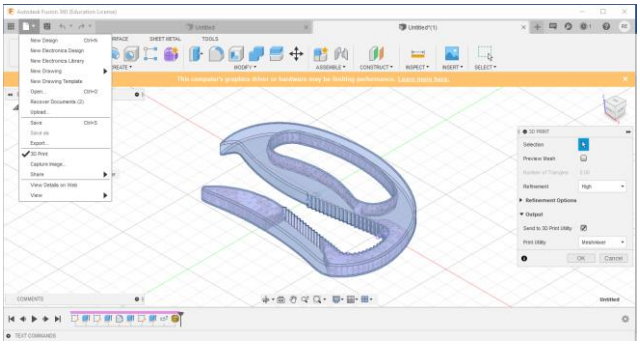
يتم فيها الجمع بين شبكة تحليل العناصر المحدودة بنسبة ١٠٠% مع الجزء الأصلي بنسبة ١٠% وبالتالي لم يعد الحشو طبقة ثنائية الابعاد ثابتة ومكررة طبقة تلو الأخرى بل تم التعديل على نسبة كثافته فيما يتوافق الضغوط المعرض لها النموذج.



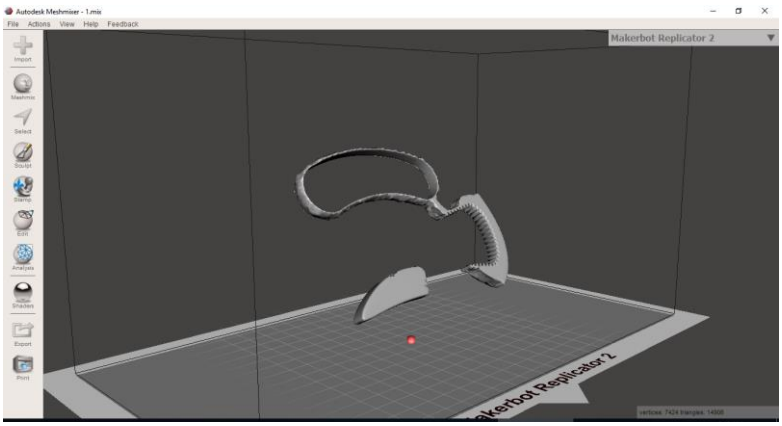
شكل (١٤) يوضح النموذج بعد التعديل والمحاكاة

١٤/ ادراج النموذج على برنامج *Meshmixer*:

تتم هذه الخطوة من خلال قائمة *file* و اختيار *3dprint* و ذلك لإرسال النموذج المحسن مباشرة الي برنامج *Meshmixer* للحصول على النسخة المعدلة لتصميم الحشو الداخلي للاماكن المعرضة للضغط .



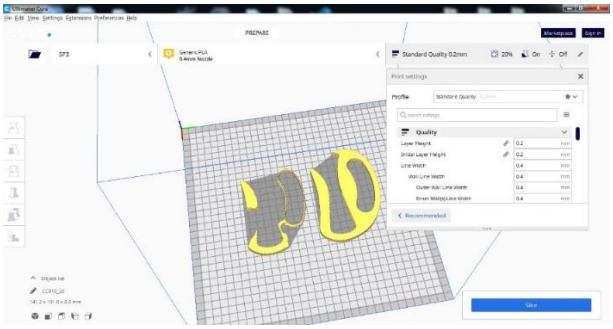
شكل (١٥) يوضح خطوة ارسال النموذج الشبكي الى برنامج *Meshmixer*



شكل (١٦) يوضح النموذج المعدل على برنامج *Meshmixer*

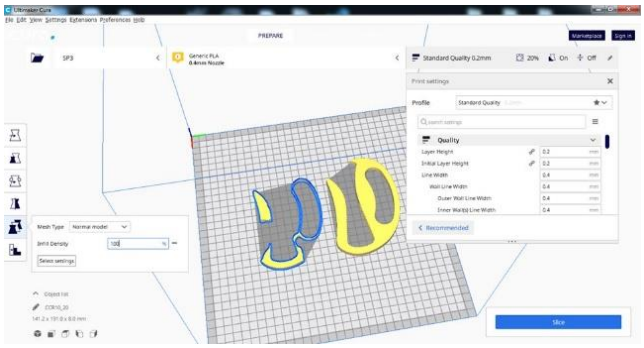
١٥/ انتاج *G-code* على برنامج *Cura*

1) يتم ادخال نسختين للنموذج المصمم النسخة الأولى قبل المحاكاة و النسخة الأخرى بعد المحاكاة ، والقيام بضبط اعدادات الحشو الداخلي *infill* ذلك من خلال اعداد *per model* على برنامج *Cura*.



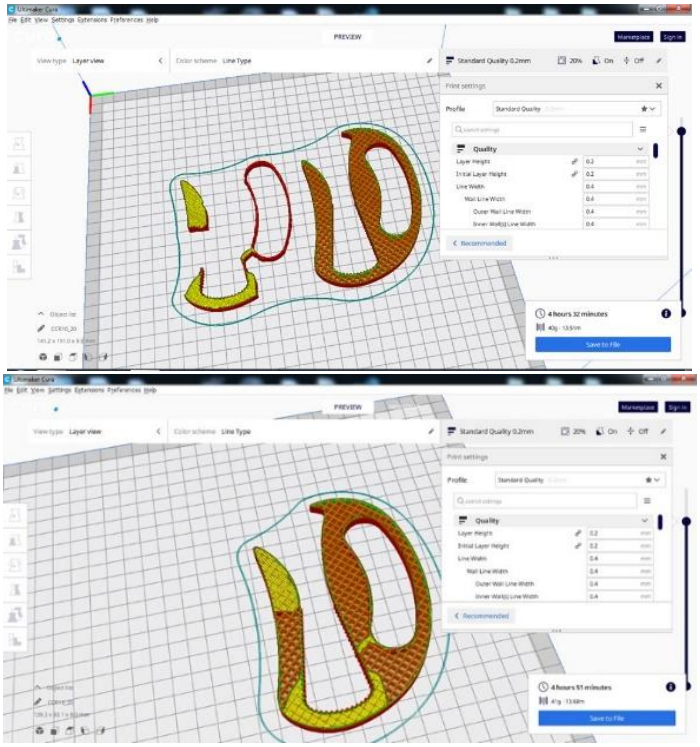
شكل (١٧) يوضح ادراج نسختين النموذج على برنامج

2) من خلال اعداد *per model* يتم التحكم كثافة الحشو الداخلي لكل نسخة حيث يتم اختيار (تحديد) النموذج المعدل وضبط الكثافة بنسبة ١٠٠% اما النسخة الأولى تكون بكثافة ٢٠%.



شكل(١٨) يوضح ضبط كثافة النموذج وفقا لقيم الضغط

3) ثم من قائمة *preview* تم دمج النموذجان معا للحصول على نموذج واحد للطباعة يحتوي على كثافات للحشو الداخلي مختلفة حيث الأماكن المعرضة للضغط تكون مصمتة ذات كثافة ١٠٠% اما باقي النموذج تكون كثافة الحشو الداخلي ٢٠%



شكل(١٩) يوضح النموذج النهائي بكثافات حشو داخلي مختلفة

4) ثم ضبط اعدادات التصميم وفقا لمعايير التصميم مثل ارتفاع الطبقة :٠,٢مم، سمك الجدران :١مم، كثافة الحشو الداخلي الغير معرض لضغط ٢٠%، تصميم الحشو الداخلي المثلثي.

ثم طباعة النموذج على ماكينة الطباعة *SP3* بسرعة ٦٠ مم/ث بفتحة فوهة ٠,٤مم باستخدام المادة الخام *PLA*

د. نتائج التجربة

ولإثبات نجاح التجربة تم طباعة ثلاثة نماذج:

١_ نموذج بكثافة *infill* ٢٠%.

٢_نموذج كامل بكثافة *infill* ٥٠%.

٣_ النموذج المعدل ذو كثافة *infill* للاماكن المعرضة لضغط بنسبة ١٠٠% وباقي النموذج بكثافة ٢٠%.

شكل (٢٠) النموذج ١بكثافة ٢٠%

النموذج٢ بكثافة ٥٠%

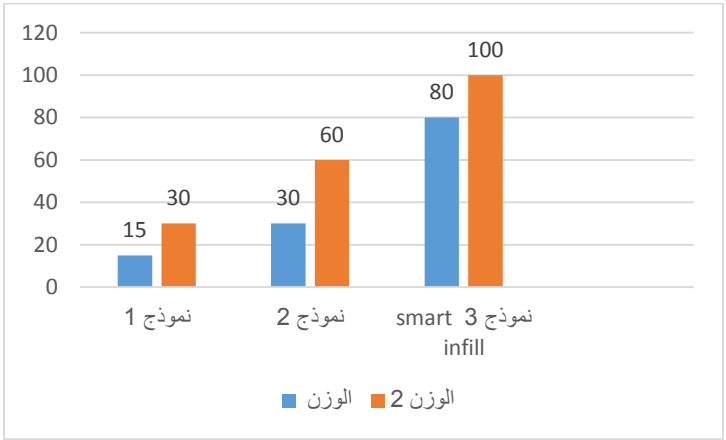
النموذج ٣ بكثافة١٠٠% ،٢٠%

ثم تم اختبار النماذج الغير معدلة على جهاز *Universal Testing Machine* تم التوصل للنتائج الاتية:

١_ تحمل النموذج الأول ذو كثافة *infill* ٢٠% ضغط حتى١٥ كجم بينما فشل تحت ضغط ٣٠كجم.

٢_ تحمل النموذج الثاني ذو كثافة *infill* ٥٠% حتى ضغط ٣٠كجم بينما فشل عند ٦٠كجم.

٣_ عند طباعة النموذج المعدل فيما يعرف ب (*Smart Infill*) ذو كثافة *infill* ١٠٠% للاماكن الصلبة المعرضة لضغط و ٢٠% لباقي أجزاء النموذج فوجدان النموذج تحمل قوة ضغط حتي ٨٥كجم.



شكل (٢١) رسم بياني يوضح قيم الضغط المختلفة المعرضة للنماذج الثلاثة

الرسم البياني يوضح ان عند اختبار النموذج الأول قبل التعديل على جهاز *Universal Testing Machine* ان أقصى قوة ضغط تحملها هي ١٥كجم وانه فشل عند وزن٣٠كجم بينما النموذج الثاني ذو كثافة ٥٠% تحمل قوة حتى ٣٥ كجم وفشل عند ٥٠كجم، بينما النموذج الثالث بعد التعديل على برنامج تحليل العناصر المحدودة اثبت قوة تحمل ومتانه حتى ٨٥ كجم.

النتائج:

١- تتأثر جودة النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد بتطبيق المعايير القياسية عند تصميم النموذج وفقا للتقنية المستخدمة واختيار المادة الخام وكذلك صيغة حفظ الملف.

٢- وضحت التصميمات الحشو الداخلي المتأثرة ب *FEA* أكثر صلابة وتحمل حتى ٨٠ كجم عن التصميم المثلثي.

٣- تصميم الحشو الداخلي المعدل على برنامج *FEA* اقل تأثر للامتداد من التصميم قبل التعديل عند استخدام الشكل المثلثي بكثافة ٢٠%

التوصيات:

١ _ يوصي بعمل محاكاه للنموذج على إحدى برامج *FEA* لتحديد الأجزاء الأضعف المعرضة لضغط وذلك لزيادة جودة النموذج المطبوع ويوفر المواد الخام.

٢ _ يوصي بالاهتمام بتطبيق معايير تصميم الحشو الداخلي لما له تأثير على قوة وجودة النموذج المطبوع ثلاثي الابعاد.

المراجع:

المقالات باللغة العربية:

1 مهران ، شيماء عبد الستار _تطبيقات الطباعة ثلاثية الأبعاد فى مجال التصميم الداخلى والأثاث_مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية - العدد الخامس عشر – المجلد الرابع _ *2019* ص ٣٢٧

1 mihran , shima' eabd alsitaar _ttibyqat altibaeat althulathiat al'abead majal altasmiym aldaakhilay wal'athathi_majalat aleimarat walfunun waleulum al'iinsaniat - aleadad alkhamis eashar - almujalad alraabie 2019 s 327

2-زكرٌايا، أحمد محمد صفى الدٌين_ الطباعة ثلاثية الابعاد واثرها على المصمم الداخلًي وعملٌة التصميمٌم الداخلًي _ مجلة العمارة والفنون والعلوم الإنسانية - العدد الحادي عشر – الجزء الثاني _ ٢٠١٨ ص ٤٧

2-zkrunaya , 'ahmad muhamad sufaa aldunyn_ altibaeat thulathiat al'abead wathiruha ealaa altasmim aldaakhilii lildaakhiliat _ majalat aleimarat walfunun waleulum al'iinsaniat - aleadad alhadi eashar - aljuz' althaani _ 2018 s 47

Book

3 [Ben_Redwood,_Filemon_Schöffer,_Brian_Garret]The 3D Printing Handbook: Technologies, design and applications The(z-lib.org).pdf 2017

Articles:

4- (James A. Gopsill1 · Jonathan Shindler2 · Ben J. Hicks) Using finite element analysis to influence the infill design of fused deposition modelled part pdf 5 May 2017

5- (cageElena Provaggi a,b, Claudio Capelli c, Benyamin Rahmani d, Gaetano Burriesci d,e, Deepak M. Kalaska) 3D printing assisted finite element analysis for optimizing the manufacturing parameters of a lumbar fusion r pdf 5 February 2019

6- Luis Borunda1, Manuel Ladron de Guevara2) Design Method for Optimized Infills in Additive Manufacturing Thermoplastic Components (2019

Web sites*:*
7-https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/15/12/2019/ 8.30
8-https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/22/10/2019 Blu Siber May 22, 2018
9-https://support.ultimaker.com/hc/en-us/articles/360012607079-Infill-settings/15/9/2019
10- https://all3dp.com/2/cura-infill-patterns-all-you-need-to-know/1/4/2020