

## أثر الخواص الميكانيكية للمطبوعات ثلاثية الأبعاد المنتجة بتقنية النمذجة بالراسب المنصهر على اختيار الخامات الملائمة لتطبيقاتها

The impact of the mechanical properties of 3D Prints produced by the Fused Deposition Modelling technique on proper selection for selected application

م.د / سارة إبراهيم عبدالرحمن رمضان

مدرس بقسم الإعلان والطباعة والنشر، كلية الفنون التطبيقية، جامعة بنها  
bu.sara.ramadan@gmail.com

### كلمات دالة: Keywords

طباعة ثلاثية الأبعاد، النمذجة بالراسب المنصهر، قوى الشد، مقاومة التآكل  
Abrasion resistance Fused deposition modeling , tensile strength

### ملخص البحث: Abstract

احتلت الطباعة ثلاثية الأبعاد في الآونة الأخيرة مركز الصدارة في مجالات التصنيع المختلفة لإنتاج العديد من المنتجات الحيوية والحساسة والتي تتطلب مرونة ومتانة وأبعاد معينة. هناك أنواع مختلفة من طرق معالجة الخامات والتي تعتمد عليها تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد لمعالجة مواد مختلفة بطرق مختلفة لصنع الجسم النهائي وهي: التلبيد (Sintering) - الصهر (Melting) - الترسيب بالبلورة الضوئية (Stereolithography) بحيث تثبت تحت كل طريقة منها عدة تقنيات للطباعة تختلف فيما بينها بنوعية المادة الخام والخواص المطلوبة للمنتج وتطبيقاته. كما تلعب الخواص الميكانيكية دوراً هاماً في تحديد جودة المطبوعات ثلاثية الأبعاد ولتحقيق الأداء الأمثل لكل منتج يجب تحديد الخامة المناسبة لإنتاجه بحيث يفى المطبوع ثلاثي الأبعاد بالغرض المخصص لإستخدامه؛ في ظل تعرضه لمجموعه من الإجهادات الميكانيكية كقوى الشد والتآكل. وتعتبر تقنية النمذجة بالراسب المنصهر من أكثر تقنيات الطباعة ثلاثية الأبعاد شيوعاً في السوق المصري نظراً لإنخفاض تكاليف الخامات والماكينات التي تعمل بهذه التقنية فضلاً عن تنوع مطبوعاتها من حيث درجة المرونة أو الصلابة وتنوع إستخدامها في العديد من المجالات. يعد اختيار الخامة ميزة مهمة في تحقيق الأداء المطلوب في تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، ولاسيما للأداء الميكانيكي الذي يحدد أقصى قدرة للحمل ومدى التوافق بين المطبوع ثلاثي الأبعاد والغرض من إستخدامه. من خلال استيفاء الخواص الميكانيكية الأساسية المطلوبة لتحمل ضغوط الإستخدام مما يحسن من فاعليه أداء المطبوع ثلاثي الأبعاد وطول عمره التشغيلي وبالتالي تحقيق الجودة المطلوبة. وذلك من خلال رصد قيم (قوة الشد، معامل الشد، إجهاد الكسر، قوة الإنحناء (التمزق)، معامل الإنحناء، مقاومة الكسر) لمجموعه من العينات المطبوعه ثلاثية الأبعاد والمفاضلة بينهم عن طريق قيم قياس تلك الخواص وبالتالي تحديد التطبيقات الأنسب لكل منها على حده.

Paper received 27<sup>th</sup> January 2022, Accepted 15<sup>th</sup> April 2022, Published 1<sup>st</sup> of May 2023

### أهداف البحث: Research Objectives

- 1- طباعة مطبوعات ثلاثية الأبعاد ذات خواص ميكانيكية تفي بغرض استخدامها.
- 2- الاستفادة القصوى من الخواص الميكانيكية لكل خامة.
- 3- تحديد الخامة (البوليمر) المناسب لإنتاج المطبوعات ثلاثية الأبعاد بتقنية النمذجة بالراسب المنصهر بما يتناسب مع الإجهادات الميكانيكية للتطبيق.

### أهمية البحث: Research Significance

- 1- تكمن أهمية تحديد الخامات الأمثل لطباعة منتجات ذات خصائص ميكانيكية ملائمة لاستخدامها مؤشراً هاماً على فاعلية المطبوعات ثلاثية الأبعاد في الأداء الوظيفي المنوطة به مما يحقق كفاءة أفضل وملائمة أعلى لتحمل الضغوط وبالتالي تحقيق الجودة العالية.
- 2- زيادة العمر التشغيلي للمطبوع ثلاثي الأبعاد نظراً لقدرته على تحمل إجهادات قوى الشد والتآكل لفترات أطول وبالتالي طول فترة تشغيله أو إستهلاكه وبالتالي توفير تكاليف الإستبدال وطباعة مطبوع جديد يحل محله.

### منهج البحث: Research Methodology

استخدام المنهج الوصفي والتجريبي لقياس القيم المتغيرة لقوى الشد والتآكل وتحليلها بهدف الوصول إلى قيم تحدد إستخدام الخامات المناسبة لإنتاج كل تطبيق حسب متطلبات الإستخدام وذلك بطباعة مجموعه من العينات ثلاثية الأبعاد بخامات مختلفة وإختبار بعض الخواص الميكانيكية (مقاومة الشد - التآكل) للعينات بجهاز قياس.

### المقدمة: Introduction

تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية تستخدم التصميم بمساعدة الكمبيوتر (CAD) وتعد من أحدث طرق التصنيع مؤخراً نظراً لإمكانياتها في صناعة نماذج مختلفة بدون التقيد بشكل معين للتصميم، كذلك طباعة نماذج لها الخواص الميكانيكية المطلوبة بوزن أخف واستهلاك أقل للخامات فضلاً عن تنوع الخامات المستخدمة مما جعلها تجتاح معظم الصناعات الهامة بما يتناسب مع تطبيقاتها ولتحقيق ذلك لا بد من الأخذ في الإعتبار بالخواص الميكانيكية الأنسب لغرض الإستخدام بهدف تحقيق أعلى جودة طباعية كذلك توفير الوقت والجهد وتكاليف الإستبدال من خلال الإختيار المناسب للخامة الملائمة لكل تطبيق على حده. تستخدم تقنية النمذجة بالراسب المنصهر خامات راتنجية مختلفة تختلف فيما بينها بخواصها الميكانيكية التي تجعل كلا منها مناسب لتطبيق معين.

### مشكلة البحث: Statement of the Problem

وبذلك تتلخص مشكلة البحث كما يلي:

- 1- طباعة مطبوعات ثلاثية الأبعاد بتقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر بخامات بوليمرية لا يتم إختيارها بما يتناسب مع الإجهادات الميكانيكية التي يتعرض لها المطبوع ثلاثي الأبعاد في التطبيقات المختلفة.
- 2- قصر العمر التشغيلي للمطبوعات ثلاثية الأبعاد المنتجة بهذه التقنية نظراً لعدم قدرتها على تحمل الضغوط الميكانيكية للإستخدام من مقاومه الشد و التآكل الذي ينشأ عن الإحتكاك.

1/2 - يستخدم مسحوق الترموبلاستيك للتليد بالليزر الإنتقائي.  
 2- الصهر (Melting): تعتمد هذه الطريقة على استخدام مسحوق بودري وشعاع إلكتروني للصهر بحيث تتم عملية ترسيب مباشر بالطاقة باستخدام ليزر أو شعاع إلكتروني لطباعة المجسمات بصهر الخامات معا في درجات حرارة عالية .  
 3- الترسيب بالبلمرة الضوئية (Stereolithography): حيث تستخدم البلمرة الضوئية لتشكيل الأجزاء أو المجسمات عن طريق مصدر ضوئي مناسب لمعالجة الخامة بطريقة معينة بحيث تترسب طبقات رقيقة منها والتي تكون المجسم.  
 وفيما يلي إستعراض لتقنيات الطباعة ثلاثيه الأبعاد كما في المخط التالي:

## مجاور البحث: Research limited المحور النظري:

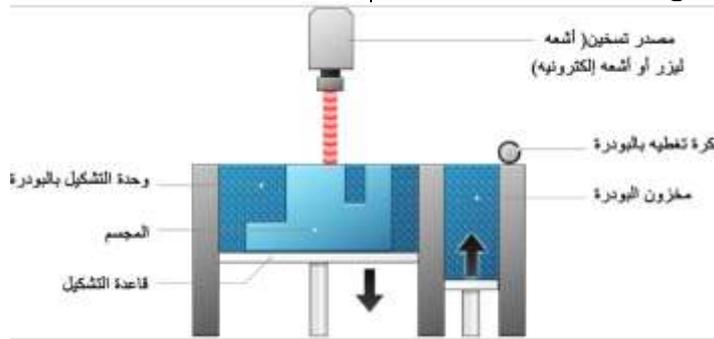
أولاً: تقنيات المعالجة في الطباعة ثلاثيه الأبعاد ( 3D printing technologies):  
 تتنوع تقنيات المعالجة في الطباعة ثلاثيه الأبعاد حسب نوعية المجسمات المنتجة وخامتها وطبيعه الاستخدام إلا إنها تشترك في طرق معالجة ثابتة؛ وهي كالتالي:  
 1- التليد (Sintering): يقتصر التليد على تسخين الخامات فقط (دون أن تصل إلى درجة الإنصهار) وذلك لإنتاج عناصر (مجسمات) عاليه الجودة بحيث :  
 1/1 - يستخدم المسحوق المعدني في تقنيه التليد بالليزر المعدني المباشر .

### تقنيات المعالجة في الطباعة ثلاثيه الأبعاد



في وقت قصير وبدقة عالية. حيث تمتلك ميزات التصنيع الإضافي مثل حرية تصميم الأجزاء وتعقيد الأجزاء والوزن الخفيف وتوحيد الأجزاء في تصنيع الإضافات المعدنية لتطبيقات الطيران والنفط والغاز والتطبيقات البحرية والسيارات.

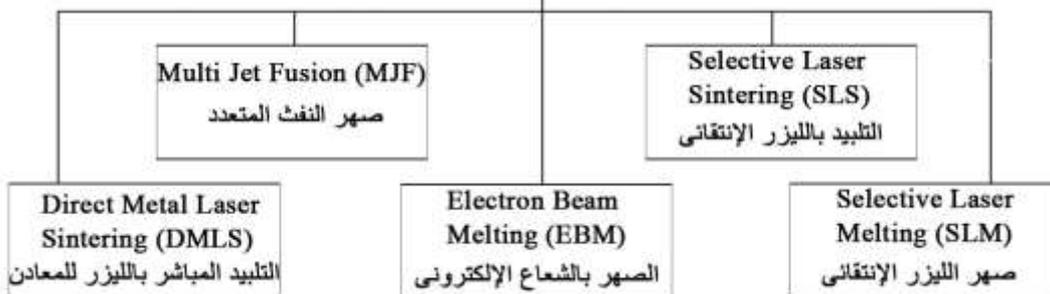
أولاً: تقنية صهر الطبقات البودريه Powder bed fusion:  
 يتم دمج كل طبقة من طبقات البودرة بشكل انتقائي باستخدام مصدر طاقة مثل الليزر أو شعاع الإلكترون، وتعتبر من أكثر تقنيات التصنيع التي يمكن استخدامها لتصنيع الأجزاء المعدنية المعقدة والصغيرة الحجم ؛ وتعمل على إنتاج أجزاء معدنية كثيفة بالكامل



شكل يوضح تقنيه صهر الطبقات البودريه

أنواع الماكينات التي تعمل بتقنية صهر الطبقات البودريه:

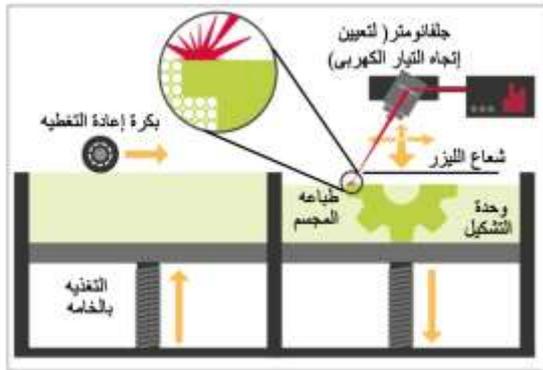
### أنواع الماكينات التي تعمل بتقنيه صهر الطبقات البودريه ( Powder bed fusion ).



من المسحوق على قاعده التشكيل بحيث يتم عمل مسح ضوئي بمصدر حراري على سطح طبقة المسحوق المعدني في مناطق محددة لترتيب جزيئات المسحوق فيها معا بروابط تقاطعيه وبمجرد عمل المسح الضوئي الحراري لطبقة المسحوق تتحرك قاعدة التشكيل لأسفل استعدادا لإستقبال طبقة بودريه جديدة لينتج عن ذلك

1- صهر الليزر الإنتقائي (selective laser melting) (SLM):  
 تشمل الماكينة على وحدة مغلقة مليئة بغاز حامل (إما الأرجون أو النيتروجين بمستويات أكسجين أقل من 500 جزء في المليون)، كما تطلب هذه التقنية وجود بكرة أو كاشط لإعادة التغطية بطبقة رقيقة

مجسم صلب يتم بعد ذلك تنظيف المنتج النهائي، المغلف في مسحوق سائب بالفرشاة والهواء المضغوط. تشمل المواد الرئيسية المستخدمة في عملية الطباعة بهذه التقنية مادة البولي أميد (النايلون)، والألوميد (مزيج من مسحوق الألمنيوم الرمادي والبولي أميد)، والمواد الشبيهة بالمطاط متينة ولكنها تتميز ببعض المرونة، مما جعلها ممتازة للمقاسات المعقدة كالزئيركات.

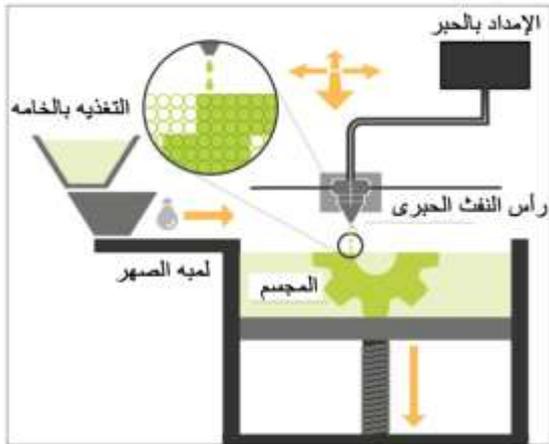


شكل يوضح تقنية التلييد بالليزر الانتقائي

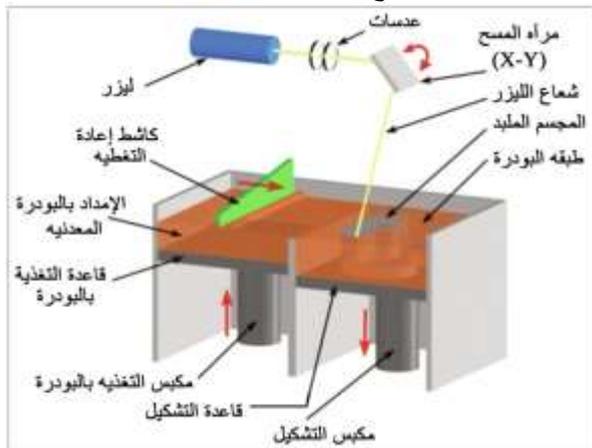
وصهرها بواسطة الحزمة الإلكترونية. تتكرر هذه العملية حتى اكتمال طباعه المجسم.

#### 4- تقنية صهر النفط المتعدد (MJF):

تستخدم هذه التقنية المتطورة رأس نفث الحبر لتطبيق حبر ماص للحرارة عبر سطح طبقة المسحوق في المناطق التي سيتم تلييدها لإنشاء أجزاء. ثم يمتص هذا الحبر الحرارة من مصباح الأشعة تحت الحمراء وسلسلة من سخانات داخل الطباعة لتشكيل أجزاء مطبوعة ثلاثية الأبعاد.



شكل يوضح تقنية صهر النفط المتعدد

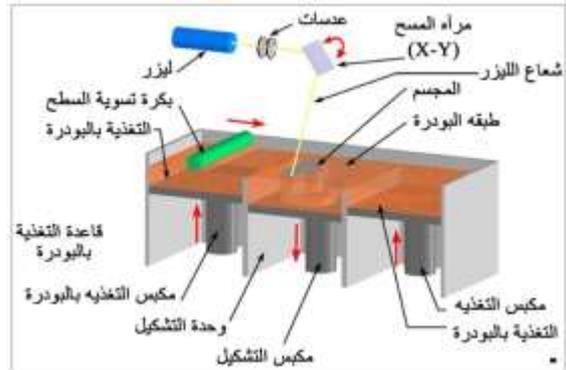


شكل يوضح تقنية تلييد المعادن بالليزر المباشر

شكل ثلاثي الأبعاد يتضمن جزء واحد أو عدة أجزاء منصهرة محاطه بمسحوق بودري غير مستخدم وبمجرد الإنتهاء من تشكيل المجسم كله ترتفع القاعدة للنهائيه لتسمح بإزاله المسحوق المعدني غير المستخدم وعمل أى معالجة نهائيه مطلوبة .

#### 2- تقنية التلييد بالليزر الانتقائي (SLS):

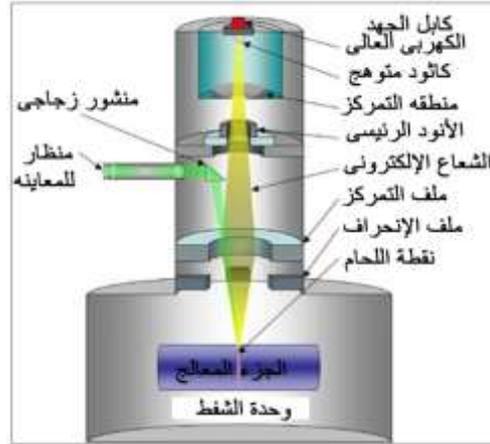
تستخدم الليزر لتلييد أو دمج مادة بودريه طبقة تلو طبقة لإنشاء



شكل يوضح تقنية صهر الليزر الانتقائي

#### 3- تقنية الصهر بالشعاع الإلكتروني (EBM) Melting

تعد هذه التقنية مناسبة لمعالجة خامات معدنيه لإنشاء نماذج أولية سريعة التصنيع تصل درجة الحرارة المستخدمة في هذه التقنية ما بين (700: 1000)°، مما يزيل الضغط المتبقي على المجسم ، ولن يحتاج إلى معالجة حرارية بعد تشكيله . يتم بثق المسحوق المعدن من خلال فوهة على هيئة طبقات. ثم صهر كل طبقة بواسطة شعاع إلكتروني في غرفة التفريغ. يتم بثق طبقة أخرى من المسحوق



شكل يوضح تقنية الصهر بالشعاع الإلكتروني

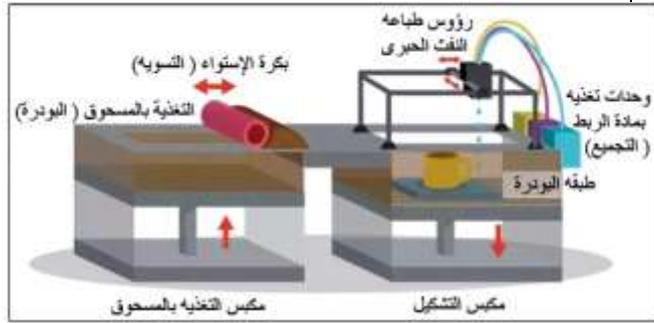
#### 5- تقنية تلييد المعادن بالليزر المباشر (DMLS) Sintering

يتم تلييد جزيئات مسحوق المعادن ودمجها معًا وتختلف هذه الطريقة عن التلييد بالليزر الانتقائي في درجة حرارة التلييد؛ حيث يجب تلييد مادة البولي أميد في درجات حرارة تتراوح من (160: 200) °، في حين يذوب المعدن في درجات حرارة تتراوح من (1510: 1600) °؛ مما يستلزم استخدام ليزر أعلى قوة كهربائية .

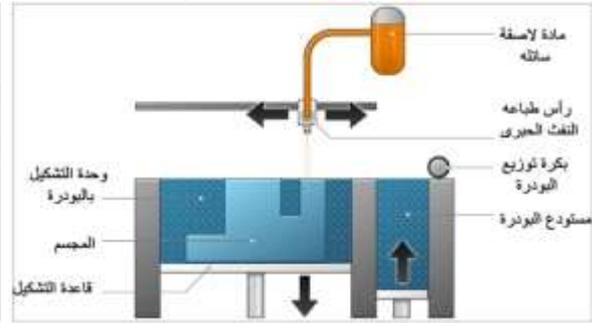
عندما تتحرك الإسطوانه يتم وضع طبقة من المسحوق المعدني، يلي ذلك تلييد المسحوق بالليزر وخفض قاعدة التشكيل قبل إضافة طبقة جديدة من المسحوق، وهكذا حتى إكمال طباعه المجسم.

تتطلب كلا التقنيتين (التلييد المباشر بالليزر للمعادن والصهر بالليزر الانتقائي) إلى داعم للمجسمات ويرجع ذلك إلى الحرارة العاليه المطلوبه لهذه الطريقه ويتم إزاله هذا الداعم في عمليه المعالجة النهائيه سواء يدويا أو ميكانيكيا ليتم عمل معالجة حراريه بعدها للتخلص من أى ضغوط شد متبقية .

طبقة وبمجرد الإنتهاء من التشكيل تبدأ مرحلة المعالجة النهائية بتليد الاجزاء المعدنية حرارياً أو خلطها بمعدن ذو نقطة إنصهار منخفضة كالبرونز.



ثانياً: تقنية النفث التجميى (Binder jetting):  
تقوم هذه التقنية على ترسب طبقة رقيقة من مسحوق معدني على قاعدة (منصة) التشكيل وتغطي بعد ذلك بمادة لاصقة سائلة يتم توصيلها من خلال فوهات نفثة لتعمل كمادة لاصقة لجزيئات المسحوق لترتبط جزيئات الشكل معاً حتى يتم بناء كل جزء طبقة

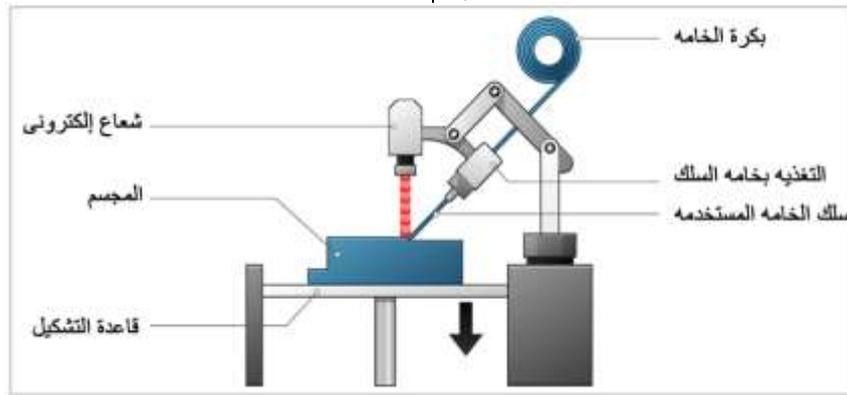


شكل يوضح تقنية النفث التجميى (Binder jetting) للطباعة ثلاثية الأبعاد

ترسيبه باتجاه أفقى لبناء الطبقات لتتراص الطبقات رأسياً مكونة الجسم وتستخدم نطاق واسع من الخامات (المعادن والسيراميك والبوليمرات).

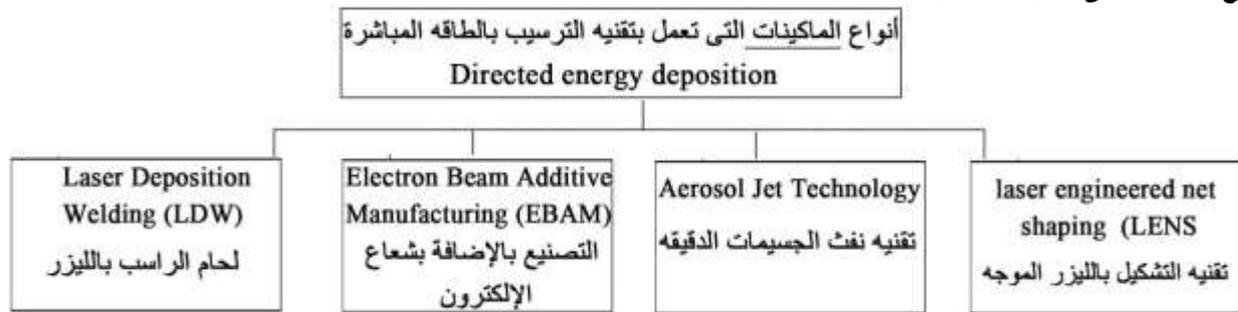
ثالثاً: الترسيب بالطاقة المباشرة ( Direct energy Deposition):

تعتمد هذه التقنية على إستخدام طاقة حرارية مركزة مثل شعاع الليزر أو شعاع إلكترونى لصهر السلك أو المسحوق بحيث يتم



شكل يوضح تقنية الترسيب بالطاقة المباشرة

أنواع الماكينات التى تعمل بتقنية الترسيب بالطاقة المباشرة:



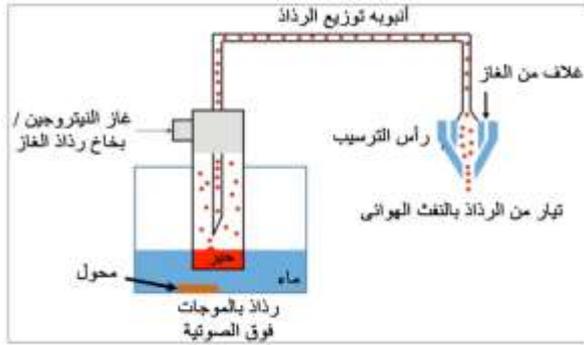
الأحبار بدقة على الجسم. يتم وضع الحبر في رذاذ، مما ينتج عنه ضباب كثيف من قطرات محملة بالمواد يتراوح قطرها بين 2-5 ميكرومتر، ثم يتم تسليم رذاذ الهباء الجوي إلى رأس الترسيب، عندما يمر غلاف الغاز والهباء الجوي عبر الفوهة ، فإنهما يتسارعان ويتركزان في تيار ضيق من القطرات المتدفقة داخل غلاف من الغاز.

تعتبر أنظمة Aerosol Jet مناسبة بشكل مثالي لتطوير وتصنيع وإصلاح الأجهزة الإلكترونية والبيولوجية عالية الأداء للإلكترونيات الاستهلاكية كما يمكنها تشغيل مجموعة كبيرة من المواد بما في ذلك أحبار جزيئات النانو المعدنية الموصلة، ومعاجين عازلة للكهرباء، وأشباه الموصلات .

أولاً: تقنية التشكيل بالليزر الموجه (laser shaping) LENS engineered net

تستخدم هذه التقنية الليزر لبناء المجسمات طبقة تلو الأخرى مباشرة من مسحوق المعادن أو السبائك أو السيراميك أو المواد المركبة. يجب أن تتم عملية التصوير في وحدة مغلقة ومملوءة بالأرجون بحيث تظل مستويات الأكسجين والرطوبة منخفضة جداً. هذا يحافظ على نظافة الجسم ويمنع الأكسدة. يتم وضع المسحوق المعدني في رأس الطبع (ترسيب المواد) ، يمكن معالجة الجسم بالحرارة أو الضغط عليه أو تشكيله آلياً بعد التشكيل.

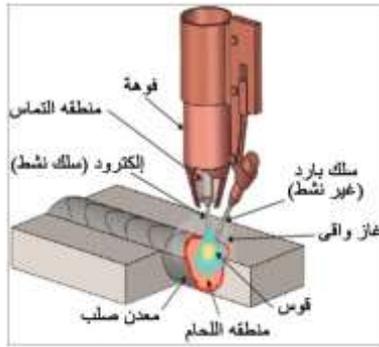
ثانياً: تقنية نفث الجسيمات الدقيقة Aerosol Jet Technology  
تستخدم عملية Aerosol Jet التركيز الديناميكي الهوائي لإبداع



شكل يوضح تقنية نفاث الجسيمات الدقيقة

**Welding:**

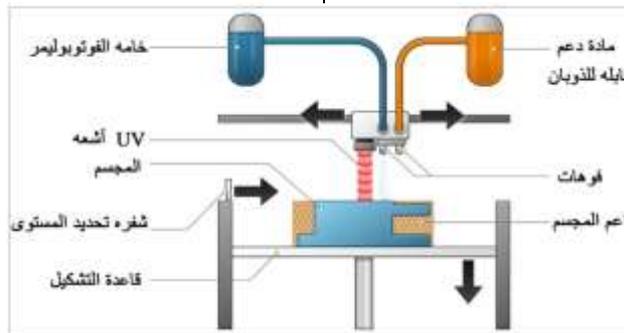
اللحام بالليزر هو عملية دمج المعادن أو اللدائن الحرارية معًا باستخدام شعاع الليزر، ويعمل ترسيب المعادن بالليزر عن طريق ترسيب مسحوق المعدن عبر فوهة واستخدام الليزر لإنتاج حوض لحام على السطح؛ في حين أن اندماج المعدن بالليزر يبني منتجًا طبقة تلو طبقة في طبقة مسحوق حيث يذوب الليزر المسحوق المعدني في المواضع المحددة وقد تكون المادة الخام على شكل سلك أو قوس كهربائي.



شكل يوضح تقنية لحام الراسب بالليزر

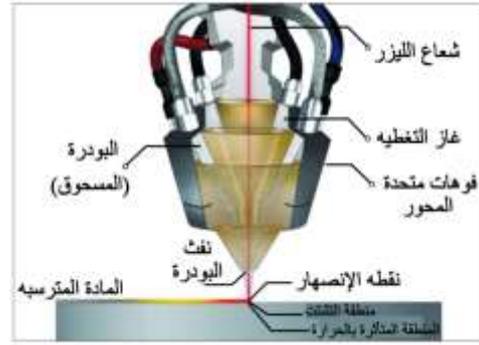
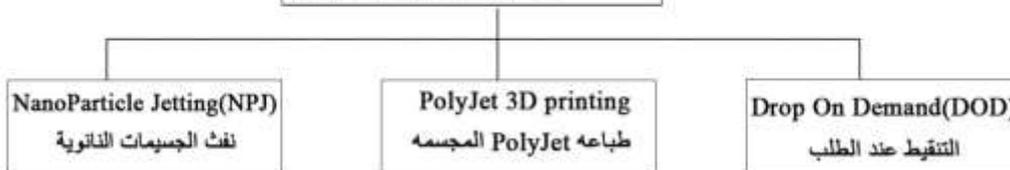
غسلها بالماء بمجرد الإنتهاء من التشكيل.

تتميز هذه التقنية بالدقة العالية إلا أن تكلفتها العالية من أهم التحديات التي تواجهها كما أن الأجزاء المنتجة بهذه التقنية تصبح ضعيفة وهشة مع مرور الوقت ومع ذلك فإن هذه التقنية لها القدرة على إنتاج أجزاء ملونه من الخامات المختلفة.



أنواع الماكينات التي تعمل بتقنية نفاث المواد:

### أنواع الماكينات التي تعمل بتقنية نفاث المواد (Material jetting)

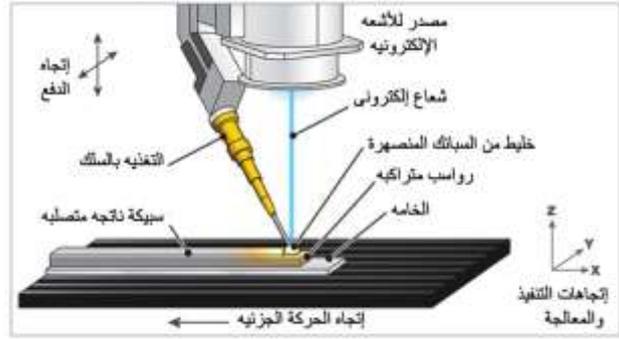


شكل يوضح تقنية التشكيل بالليزر الموجه

### ثالثاً: التصنيع بالإضافة بالشعاع الإلكتروني (Electron Beam Additive Manufacturing):

تقنية تصنيع بالإضافة تنتج هيكل معدنية كبيرة الحجم، يتم التغذية بالخامة على شكل سلك، يرسم المعدن طبقة تلو الأخرى، حتى يصل الجسم إلى شكل قريب من الشبكة ويكون جاهزاً للمعالجة النهائية. تتراوح معدلات ترسيب المواد من (3: 9) كجم من المعدن/ الساعة. تشمل المعادن التيتانيوم والنيكل. يمكن أيضاً استخدام هذه التقنية لإصلاح الأجزاء التالفة.

### رابعاً: تقنية لحام الراسب بالليزر Laser Deposition



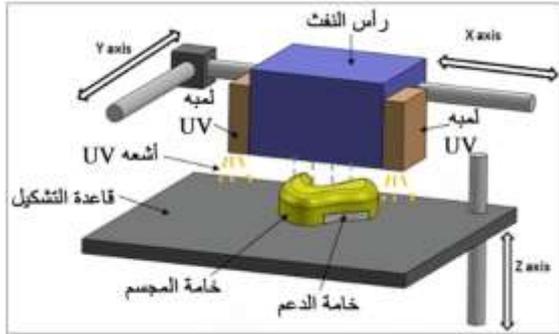
شكل يوضح التصنيع بالإضافة بالشعاع الإلكتروني

### رابعاً: نفاث المواد (Material jetting):

تعمل هذه التقنية بشكل مشابه لتقنية الطباعة بالنفاث الحبري باختلاف استقرار الحبر على سطح الورق حيث يتم ترسيب طبقات الخامة السائلة من واحدة أو أكثر من الرؤوس الطباعية ليتم معالجة الطبقات بعد ذلك قبل ترسيب الطبقة التالية وتتطلب هذه التقنية وجود دعامة يتم تصنيعها من خامات قابله للذوبان في الماء بحيث تذوب عند

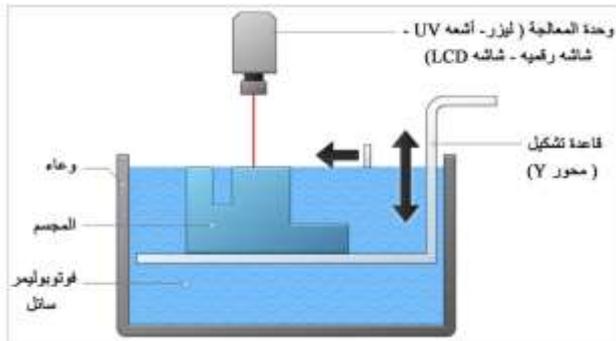
## 2- طباعة PolyJet المجسمة PolyJet 3D printing technology:

يتم نفث مواد فوتوبوليمرية على هيئة طبقات رقيقة جداً. وتعالج كل طبقة بواسطة ضوء الأشعة فوق البنفسجية مباشرة بعد نفثها. تكرر خطوات النفث والمعالجة، إلى أن يتم إنتاج نماذج معالجة بالكامل. يمكن بسهولة إزالة مادة الدعم الشبيهة بالهلام (المصممة خصيصاً لدعم الأشكال الهندسية المعقدة) باليد أو بالغسيل بالماء.



شكل يوضح تقنية البولي جيت

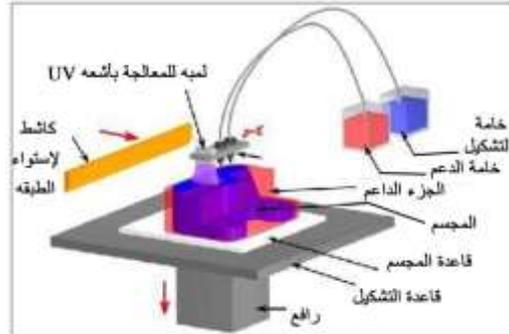
بشكل انتقائي بواسطة مصدر حراري. طبقة تلو الأخرى، يتم بناء مجسم مادي ثلاثي الأبعاد حتى اكتماله. توجد أنواع متعددة من أجهزة المعالجة بالإضافة إلى أقدم تقنية تعتمد على الليزر. تعد أجهزة عرض المعالجة الرقمية للضوء وحتى شاشات LCD طريقة شائعة الآن في بلورة المواد الضوئية نظراً لتكلفتها المنخفضة ودقتها العالية جداً. تتمثل إحدى مزايا هاتين التقنيتين مقارنةً بأشعة الليزر في قدرتها على معالجة طبقة كاملة من الراتينج في نفس الوقت، بينما يحتاج الليزر إلى إضاءة السطح بالكامل تدريجياً عن طريق رسمه.



شكل يوضح تقنية البلورة الضوئية

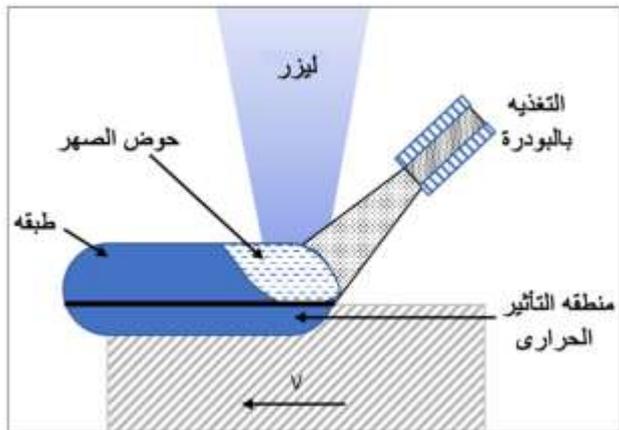
## 1- تقنية التنقيط عند الطلب (DOD) Drop On Demand

تحتوي طباعة نفث المواد التي تعمل بنظام DOD على وحدتين نفث للطباعة: واحدة لإيداع مواد التشكيل والأخرى لمواد الدعم القابلة للذوبان، وتتبع طابعات DOD ثلاثية الأبعاد مساراً محدداً وترسب المواد بطريقة نقطية لبناء طبقة طبقة للمجسم. تحتوي الماكينة على كاشط يقوم بالمسح بعد ترسيب كل طبقة لضمان سطح مستو تماماً قبل طباعة الطبقة التالية. تُستخدم هذه التقنية عادةً لإنتاج مجسمات تشبه الشمع، مما يجعلها تقنية طباعة ثلاثية الأبعاد غير مباشرة.



شكل يوضح تقنية النفث تحت الطلب

**ثالثاً: نفث الجسيمات النانوية (Nanoparticle Jetting (NPJ))**  
تستخدم تقنية نفث المواد سائلاً يحتوي على جزيئات نانوية أو جزيئات نانوية داعمة، يتم وضعه في مستودع وضخه على شكل طبقات رقيقة للغاية. تؤدي درجات الحرارة المرتفعة داخل ماكينة الطبع إلى تبخر السائل تاركاً وراءه أجزاء مصنوعة من مواد التشكيل. هذه التقنية مناسبة لخامات المعادن والسيراميك.



شكل يوضح تقنية نفث الجسيمات النانوية

**خامساً: تقنية البلورة الضوئية (photopolymerization):**  
يتم معالجة البوليمر الضوئي السائل الموجود في وعاء (أو خزان) أنواع الماكينات التي تعمل بتقنية البلورة الضوئية:

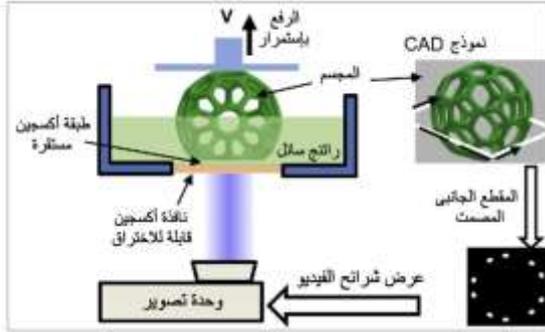


البنفسجية أو الليزر على سطح وعاء مملوء ببوليمر ضوئي سائل. يتم تركيز شعاع UV أو الليزر، مما يؤدي إلى إنشاء كل طبقة من المجسم ثلاثي الأبعاد المطلوب عن طريق ربط البوليمر أو تحطيمه. ثانياً: تقنية المعالجة بالضوء الرقمي (Digital Light Processing (DLP))

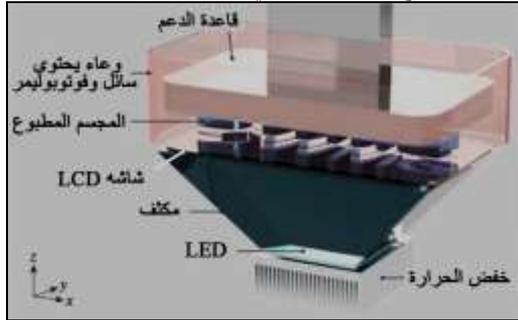
أولاً: تقنية الترسيب بالضوء (Stereolithography (SLA))  
تعرف هذه التقنية أيضاً باسم SL أو التصنيع البصري أو التصلب الضوئي أو طباعة الراتنج. أثناء عملية التصنيع يتم تركيز حزمة مركزة من ضوء الأشعة فوق

### Polymer Printing

تتم المعالجة لراتنجات تم تصنيعها لتكون أعلى حساسية لضوء النهار بواسطة مركزية ضوئية بدلاً من استخدام ليزر أو جهاز عرض لمعالجة البوليمر، تستخدم عملية تصنيع DPP شاشة LCD (شاشة بلورية سائلة) وبوليمر حساس لضوء النهار.

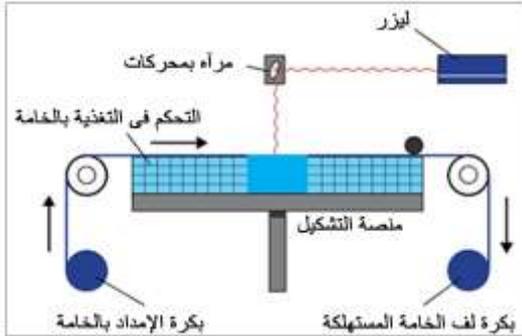


شكل يوضح تقنية البلمرة في وسط من السائل المستمر



شكل يوضح تقنية طباعة البوليمر في ضوء النهار

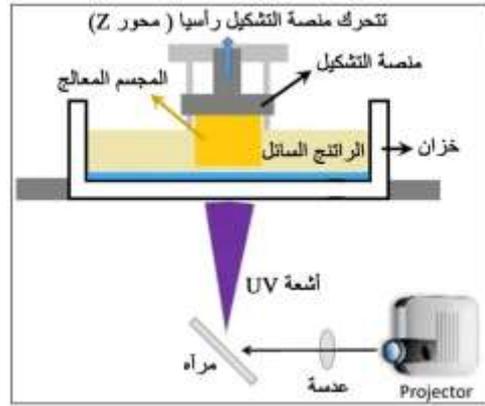
سادساً: تقنية التصفيح بالألواح المعدنية (sheet lamination) إحدى طرق التصنيع المضاف (AM) حيث يتم ربط الصفائح الرقيقة من المواد (التي يتم توفيرها عادةً عبر نظام بكرات التغذية) معاً طبقة تلو الأخرى لتشكيل قطعة واحدة يتم قطعها إلى مجسم ثلاثي الأبعاد.



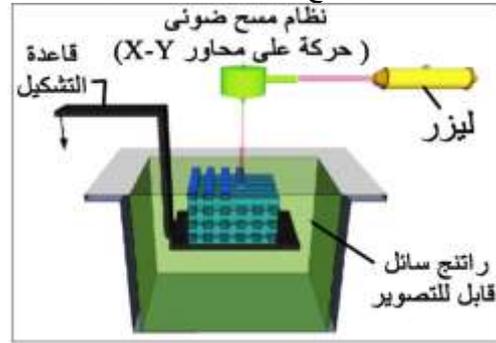
شكل يوضح تقنية التصفيح بالألواح المعدنية

### Processing

يتم استخدام شاشة جهاز عرض رقمي لإصدار وميض صورة واحدة لكل طبقة عبر النظام الأساسي بأكمله مرة واحدة. نظرًا لأن جهاز العرض عبارة عن شاشة رقمية، فإن صورة كل طبقة تتكون من وحدات بكسل مربعة، يمكن أن تحقق تقنية DLP سرعه طبع أكبر لبعض الأجزاء، حيث يتم كشف كل طبقة بأكملها مرة واحدة، بدلاً من سحبها باستخدام الليزر.



شكل يوضح تقنية الترسيب بالضوء



شكل يوضح تقنية المعالجة بالضوء الرقمي

ثالثاً: البلمرة في وسط من السائل المستمر Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

تحدث البلمرة الضوئية باستخدام حوض الماء (خزان) من الراتنج كمادة أساسية؛ جزء من قاع الحوض شفاف للأشعة فوق البنفسجية وبالتالي يسمى النافذة. يضيء شعاع من الأشعة فوق البنفسجية عبر النافذة، مما يضيء المقطع العرضي الدقيق للمجسم. يتسبب الضوء في تصلب الراتنج (بلمرة ضوئية). يرتفع الجسم ببطء بما يكفي للسماح للراتنج بالتدفق تحته والحفاظ على الاتصال بقاع المجسم. يوجد غشاء منفذ للأكسجين أسفل الراتنج، تمنع هذه الواجهة السائلة الثابتة الراتنج من الالتصاق بالنافذة، مما يعني أن البلمرة الضوئية تمنع بين النافذة والبلمرة. على عكس تقنية الترسيب بالضوء (SLA)، فإن عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد مستمرة في هذه التقنية وأسرع بما يصل إلى 100 مرة من طرق الطباعة ثلاثية الأبعاد التجارية.

رابعاً: طباعة البوليمر في ضوء النهار (DPP) Daylight أنواع الماكينات التي تعمل بتقنية التصفيح بالألواح المعدنية:

أنواع الماكينات التي تعمل بتقنية التصفيح بالألواح المعدنية Sheet lamination

Ultrasonic Additive Manufacturing  
التصنيع بالموجات فوق الصوتية

Laminated Object Manufacturing  
تصنيع المجسمات المصفحة

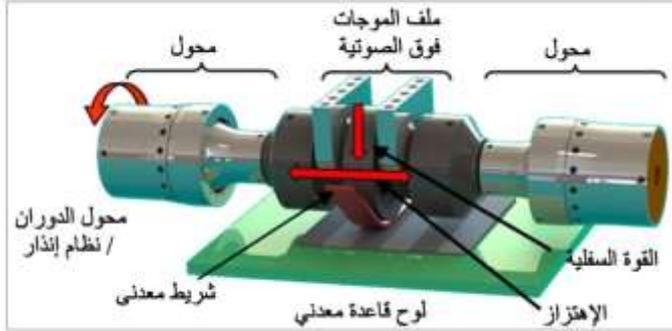
تستخدم هذه التقنية لتصنيع نموذج أولي عن طريق التلوين وقطع المواد بالليزر مثل خامات الورق والأغشية البوليمرية والرقائق

أولاً: تقنية تصنيع المجسمات المصفحة (laminated object manufacturing):

حيث تعتمد طريقته تصنيع الأجزاء المصنعة على تتابع تراس طبقات من الخامه والماده اللاصقه لتكوين الجسم.

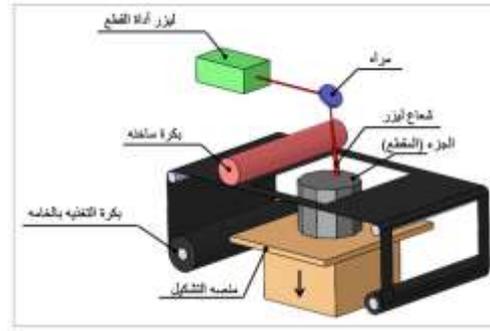
ثانياً: تقنيه التصنيع بالإضافة بالموجات فوق الصوتية (Ultrasonic additive manufacturing)

تقوم تقنيه التصنيع بالإضافة بالموجات فوق الصوتية بربط شرائح رقيقة من المعدن عن طريق لحامهم معاً بالموجات فوق الصوتية؛ وتتطلب طاقة وحرارة أقل عند تشغيل خامات الألمونيوم والإستيل ستيل والتيتانيوم.



شكل يوضح تقنيه التصنيع بالإضافة بالموجات فوق الصوتية تبريدها لتتشكل طبقة من الخامه لتتحرك قاعدة التشكيل لأسفل لإستقبال طبقة جديدة. على الرغم من أن هذه التقنيه أقل تكلفة كما تحتاج لوقت أقل للإعداد إلا أن من أهم عيوبها عدم الدقة في أبعاد الجسم علاوة على ضرورة عمل معالجة نهائية لتحسين صقل أسطح المجسمات.

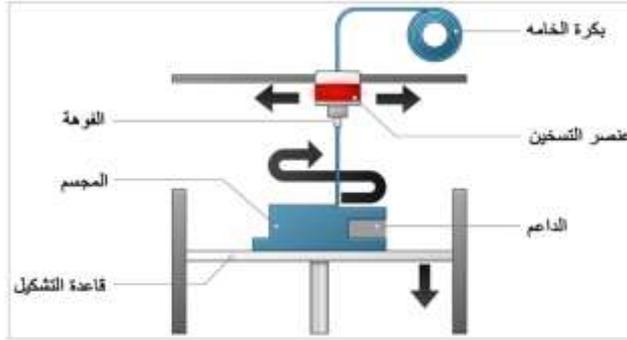
المعدنية مع رقائق البوليمر و التي تحقق خصائص ميكانيكية أفضل من الورق. حيث تكون الألواح مغلقة داخل كتل صلبة من خلال الالتصاق والتثبيت واللحام بالموجات فوق الصوتية. باستخدام الحرارة والضغط، يتم لصق كل رقيقة بالكتلة ويتم تشكيل طبقة جديدة. يتم توفير المواد عن طريق بكرة على جانب واحد من الماكينة ويتم سحبها إلى الجانب الأخر. توفر الأسطوانة المسخنة الضغط والحرارة اللازمين للطبقة الجديدة ليتم لصقها على النموذج الأولي المنتج بالفعل.



شكل يوضح تقنيه تصنيع المجسمات المصنعة

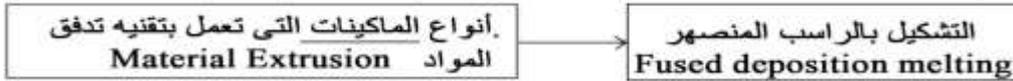
### سابعاً: النمذجة بالترسيب المنصهر (FDM) Fused deposition modeling

تعتمد هذه التقنيه على استخدام بكرة من السلك والتي تغذى رأس الطبع التي تحتوى على فوهات ساخنة تلين الخامه الساخنة لتتساقط لأسفل وتستقر في مكانها بمجرد تسخين رؤوس النفث وعند ذلك يتم



شكل يوضح تقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر

أنواع الماكينات التي تعمل بتقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر:



الضغط داخل المستودع ويستلزم خروج البوليمر المنصهر من خلال فوهة المستودع. بينما يستمر الأمداد بالسلك باستمرار إلى رأس الطباعة وتخرج الخيوط المنصهرة من نقطة التوصيل الساخنة، ويتحرك رأس الطباعة على طول المسار بهذه الطريقة ليتم ترسيب المواد بشكل مستمر، مما يشكل الجسم طبقة بعد طبقة.

### تقنيه تدفق المواد (Material Extrusion):

تتكون المواد الخام المستخدمة في هذه التقنيه من سلك صلب مصنوع من اللدائن الحرارية المملوءة وغير المعبأة، وتسمى أيضاً "الخيوط". يتم دفعه إلى رأس الطباعة، يسخن وينصهر في مستودع معين يسمى Hotend. عند ذوبان المادة الخام (Filament) يتم استخدام خيوط صلبة إضافية يتم دفعها في رأس الطبع، مما يخلق



شكل يوضح تقنيه النمذجة بالترسيب المنصهر

ويحدث إجهاد الشد عندما يتعرض الجسم إلى قوى سحب أو شد. معامل الانحناء هو مقياس لقوة المواد اللاصقة. غالبًا ما تُستخدم بيانات المعامل في تحليل الإجهاد ( لنمذجة ثلاثية الأبعاد).

كما تعتبر قوة الانحناء، والمعروفة أيضًا بقوة التمزق المستعرض تُعرّف بأنها أقصى إجهاد عند الألياف الخارجية على جانب الضغط أو التوتر للعينة. تمثل قوة الانحناء أعلى ضغط تتعرض له المادة في لحظة إنتاجها.

الاستطالة عند الكسر، والمعروفة أيضًا باسم إجهاد الكسر أو استطالة الشد عند الكسر، هي النسبة بين الطول المتزايد والطول الأولي بعد كسر العينة المختبرة عند درجة حرارة مضبوطة. وتشير إلى قدرة عينة بلاستيكية على مقاومة تغيرات الشكل دون تشقق.

وتعد خصائص الشد والانثناء هما العاملان الأساسيان لقياس قوة المواد.

#### ثانياً: مقاومه التآكل (Corrosion resistance) :

لا تعاني المواد البلاستيكية من معدل تآكل محدد. فهي عادة تكون مقاومة للهجوم الكيميائي أو تتدهور بسرعة. وتتعرض للهجوم إما عن طريق تفاعل كيميائي أو عن طريق الذوبان؛ والذوبان هو اختراق البلاستيك بواسطة مادة تآكل. يمكن تصنيف تآكل البلاستيك (البوليمر) بالطرق التالية فيما يتعلق بظهور المشكلة :

- 1- تفكك أو تدهور طبيعته المادية بسبب نفاذية مذيبي، أو عوامل أخرى.
- 2- الإشعاع.
- 3- الأكسدة، حيث يتم مهاجمة الروابط الكيميائية.
- 4- الجفاف (غير شائع إلى حد ما).
- 5- التحلل المائي، حيث يتم مهاجمة روابط الإستر.
- 6- التدهور الحراري الذي ينطوي على إزالة البلمرة وربما إعادة البلمرة.

ستظهر نتائج هذه التأثيرات على هيئة (تليين، تقطيت، تلون، نذوب، إنتفاخ).

يتأثر أيضًا تآكل مركبات البوليمر بعاملين آخرين :

**1- طبيعة اللامينيت،** ففي حالة الراتنج المتصلدة بالحرارة، سيؤثر وقت المعالجة غير الكافي سلبًا على مقاومة التآكل، بينما سيؤثر وقت وإجراءات العلاج المناسب بشكل عام تحسين مقاومة التآكل.

يتم مزج المكونات الأخرى مع البوليمر لتعزيزها ببعض الخصائص والتي في كثير من الحالات تقلل من قدرة البوليمر على مقاومة هجوم بعض عوامل التآكل ولذلك من الضروري معرفة مكونات أي بوليمر قبل استخدامه.

**2- النفاذية:** جميع المواد قابلة للاختراق إلى حد ما للجزيئات الكيميائية، وخاصة في البلاستيك تميل المواد إلى أن تكون ذات نفاذية أكبر من حيث الحجم وعليه تتعرض البوليمرات لإختراق الغازات أو السوائل أو الأبخرة.

ثانياً: الجزء التطبيقي:

أولاً: الخامات المستخدمة:

تم إختيار 5 عينات الأكثر استخداماً في السوق المصري في الطباعة بتقنيه النمذجة بالراسب المنصهر ووجد أنهم ( - PETG - APS ) و ( ABS - PC/ABS - PLA Wood ) والتي لها المواصفات الفنية الآتية:

PLA Wood	PC/ABS	ABS	PETG	APS	
180 : 230 °C	260 : 290 °C	230 : 260 °C	230 : 260 °C	220 : 260 °C	الحد الأقصى لدرجة حرارة النفث ( الطبع )
60 : 75 °C	100: 120 °C	90 : 110 °C	70 : 100 °C	80 : 110 °C	أقصى درجة حرارة لقاعدة التشكيل

النمذجة بالترسيب المنصهر طراز (Creator Pro flashforge) ومواصفاتها الفنية كالآتي:

الخامات الأكثر استخداماً في تقنيه النمذجة بالراسب المنصهر في السوق المصري:

#### 1- حمض البولي لكتيك (PLA (Polylactic Acid):

يعتبر أكثر استخداماً من بين مواد الطباعة ثلاثية الأبعاد المستخدمة لكونه مستمد من مصادر متجددة مثل نشا الذرة وقصب السكر مما جعله أكثر انتشاراً لأنه صديق للبيئة (قابل للتحلل)، متوافق حيويًا (غير سام)، وقابل للمعالجة (خصائص حرارية أفضل). توفر خصائص بوليمر PLA العديد من المزايا مقارنة بالبوليمر التقليدي مثل الأكريلونيتريل بوتادين ستيرين (ABS). حيث يعتبر أكثر صلابة من ABS. ومع ذلك، فيعيبه ضعف قدراته على تحمل الحرارة ومقاومة المذيبات. ويميزه أن خيوط PLA لديها مقاومة جيدة للأشعة فوق البنفسجية وقوة شد جيدة.

#### 2- أكريلونيتريل بوتادين ستيرين (Acrylonitrile butadiene styrene) ABS :

عبارة عن مادة طباعة ثلاثية الأبعاد صلبة ومقاومة للصدمات والحرارة. يتمتع ABS بمقاومة أعلى لدرجات الحرارة. نظرًا لأنه غير متبلور، فإنه لا يذوب تمامًا. تشمل التطبيقات الشائعة لـ ABS أدوات الاستخدام النهائي، والأجزاء المتحركة، والأجزاء التي يجب أن تتحمل الضغط الميكانيكي العالي.

#### 3- بولي كربونات + أكريلونيتريل بوتادين ستايرين (polycarbonate + Acrylonitrile butadiene styrene) PC/ABS :

عبارة عن مزيج من اللدائن الحرارية المصنوعة من البولي كربونات (PC) والأكريلونيتريل بوتادين ستايرين (ABS)؛ تظهر خصائص قوة ممتازة، وصلابة عالية ومقاومة للحرارة وقوة انثناء جيدة.

يعد PC-ABS مناسبًا لمجموعة متنوعة من التطبيقات التي تشمل النماذج الأولية والأدوات والإنتاج بكميات قليلة.

#### 4- (بولي إيثيلين تيريفثالات "جليكول معدل" ("modified glycol-PETG (Polyethylene Terephthalate):

إحدى الخامات الأكثر شيوعاً في الاستخدام وتكون الإختيار الأمثل لتصنيع الأجزاء التي تتحمل الإجهادات الميكانيكية كما تستخدم في الأجزاء المقاومه للماء نظرًا لقوة الالتصاق بين الطبقات عند التصنيع، مقارنة بخامة PLA فإنها أكثر مرونة ومقاومة للحرارة وأقل هشاشة وهي غير ملائمة لتصنيع الأجزاء الدقيقة.

#### 5- خشب عديد حمض اللبنيك (Polylactic Acid wood) الخيوط الخشبية PLA Wood :

عبارة عن PLA معدل مع 30٪ من ألياف الخشب. تبدو الأشياء المطبوعة مثل خشب وعند الطباعة تنبعث منها أيضًا رائحة الخشب. الفتيل هش قليلاً ولكنه أكثر نفاوة من PLA، ويتميز بالمتانة العالية.

أهم الخواص الميكانيكية المؤثرة على أداء المطبوعات ثلاثية الأبعاد بتقنية الطبع بالراسب المنصهر:

#### 1- قوة الشد (Tensile Strength):

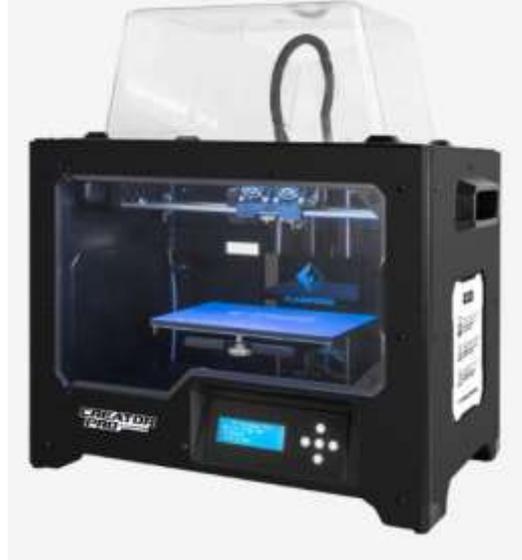
تعرف قوة الشد للمادة على أنها نسبة الحمل الأقصى الذي يمكن للمادة أن تدعمه إلى منطقة المقطع العرضي الأصلية. كلما زادت قوة الشد لجزء ما زادت صعوبة تمدده وتطلب المزيد من القوة لتمديده. وتعتبر قوى الشد ضمن معايير الحكم على جودة المواد

ثانياً: ماكينة الطباعة المستخدمة:

تم طباعة (5) مطبوعات ثلاثية الأبعاد من الخامات البوليمرية (المحددة للتجربة) على ماكينة طبع ثلاثية الأبعاد تعمل بتقنية

توصيف الخواص الفنية لماكينة (Creator Pro flashforge)

2	عدد فوهات النفث	النمذجة بالترسيب المنصهر	التقنية الطباعية
30-100 مم / ثانية	سرعة الطباعة		
1.75 مم (بوصة 0.069)	قطر الخامة (السلك)	240 °C ( 464 °F )	الحد الأقصى لدرجة حرارة النفث ( الطبع )
0.4 مم	قطر فوهة	150 X 148X 227) مم (بوصة 5.9 X 5.8 X8.9)	مقاس الطبع
0.1 مم - 0.4 مم	سمك الطبقة	120°C (248°F)	أقصى درجة حرارة لقاعدة التشكيل:
± 0.2 مم	دقة الطباعة	PETG، ABS ، TPU95A+PLA	الخامات المتاحة إستخدامها



ماكينة طباعة ثلاثية الأبعاد طراز (Creator Pro flashforge)



شكل يوضح جهاز قياس قوى الشد

ثالثاً: التجارب العملية وأجهزة القياس المستخدمة:  
1- قياس مقاومة الشد:

طباعة 5 عينات ثلاثية الأبعاد على شكل شرائط قصيرة (Dumbbell shape samples) أبعادها (4 × 1) سم؛ سمك 1 مم من الخامات قيد التجربة كما بالشكل التالي:

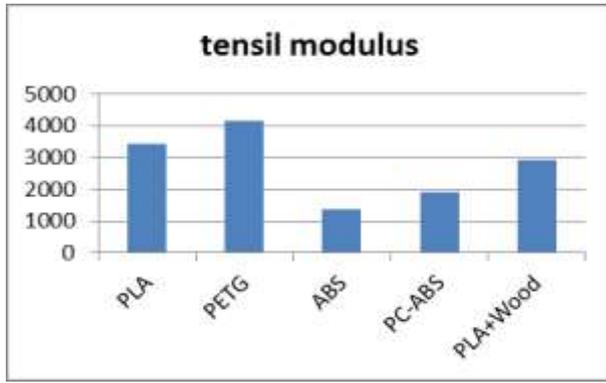


شكل يوضح العينات المستخدمة في اختبار قوة الشد يتم تركيب العينة على جهاز الشد (Tensile strength) الموضح بالصورة والذي يعمل بطريقة قياس (48) DIN 53504 كالتالي: الجهاز عبارة عن رأسين متقاطعين كما موضح بالشكل يتم تطبيق حمل شد متزايد لتمديد العينة حتى تنكسر. يتم رسم الاستطالة مقابل القوة المطبقة تلقائياً بواسطة الأداة التي يتم من خلالها إنشاء منحنى الإجهاد وقياسها باستخدام جهاز قياس قوة الشد وتم القياس ورصد النتائج التالية:

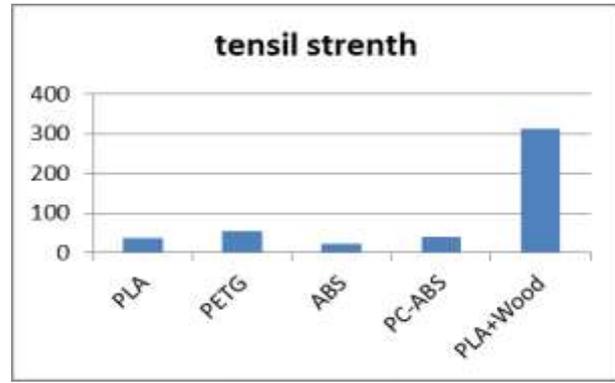
		PLA	PETG	ABS	PC-ABS	PLA+Wood
قوة الشد	tensil strenth	35.6	53	22	40.651	312
معامل الشد	tensil modulus	3420	4150	1360	1915.42	2915
إجهاد الكسر	elongation at break	4.20%	5%	6%	3%	3%
قوة الانحناء	flexural strength	85.2	91	75	67.522	71.1
معامل الانحناء	flex modulus	2378	2230	2500	1929.2	1920

الشد/ الإستطالة عند الكسر/ قوة الانحناء/ معامل الإنحناء) في الرسم البياني التالي:

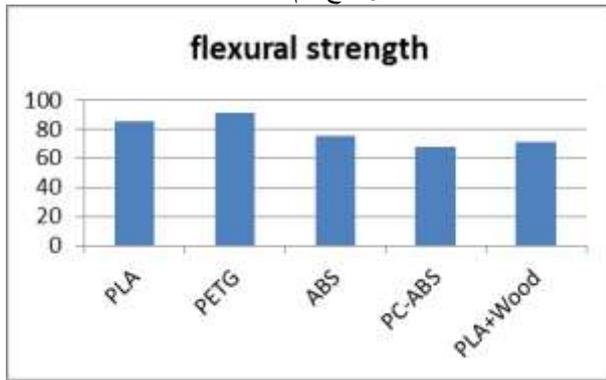
تمثيل قيم الجدول السابق والتي تمثل العلاقة بين المطبوعات ثلاثية الأبعاد المصنعة من الخامات سالفة الذكر وبين (قوة الشد / معامل



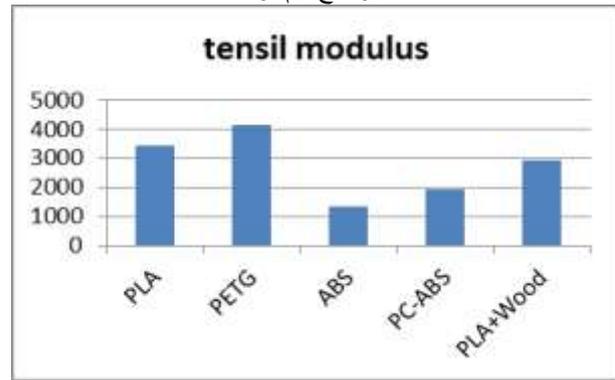
شكل يوضح قيم معامل الشد



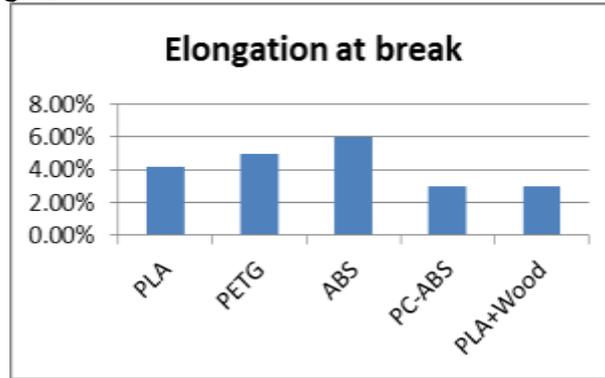
شكل يوضح قيم قوة الشد



شكل يوضح قيم قوة الإنحناء



شكل يوضح قيم معامل الإنحناء



شكل يوضح قيم إجهاد الكسر

جهاز قياس التآكل Abrasion test الموضح بالصورة والذي يعمل بطريقة قياس (77) DIN 53516 كالتالي:



شكل يوضح جهاز قياس التآكل

يتم فرك العينة بورق صنفرة مثبت بعجلة دوارة بينما تتحرك العينة على محور افقي مثبت بالجهاز حاملاً وزناً قياسي فوق العينة لضمان استمرار الاحتكاك والضغط على سطحها الأوزان من 2.5 إلى 10 نيوتن وينتهي الاختبار عندما يظهر شكل يوضح جهاز قياس التآكل سطح العينة تآكلاً يلبي المتطلبات القياسية وتم رصد النتائج التالية:

#### نتائج القياس والمفاضلة:

- 1- أعلى قوة شد في المطبوعات ثلاثية الأبعاد المنتجة بتقنية النمذجة بالراسب المنصهر المطبوعات المنتجة بخامات راتنجية (أعلام PLA Wood يليه PETG يليه PC-ABS يليه PLA ويعتبر أقلهم على الإطلاق).
- 2- الترتيب حسب أعلى معامل شد (أعلام PETG ثم PLA ثم PLA Wood ثم PC-ABS و ABS أقلهم)
- 3- الترتيب تبعاً لقوة الإنحناء (PETG الأعلى ثم PLA ثم ABS يليه PLA Wood وأقلهم PC-ABS)
- 4- الترتيب تبعاً لإجهاد الكسر (ABS يليه PETG ثم PLA ثم PC-ABS وأقلهم PLA Wood)
- 5- الترتيب تبعاً لمعامل الإنحناء (ABS يليه PLA ثم PETG ثم PC-ABS وأقلهم PLA Wood).

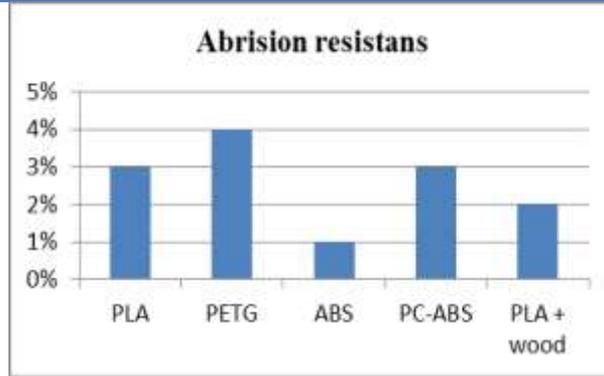
#### تجربة قياس التآكل:

طباعة 5 عينات ثلاثية الأبعاد على شكل مقاطع دائرية قطرها (4) سم؛ سمك (0.5) سم من الخامات قيد التجربة كالشكل التالي:



شكل يوضح العينات المستخدمة في اختبار مقاومة التآكل

	PLA	PETG	ABS	PC-ABS	PLA + wood
Abrasion resistans	3%	4%	1%	3%	2%



شكل يوضح قيم مقاومة التآكل للعينات المطبوعه بخامات التجربة

• الأقل على الإطلاق في إجهاد الكسر ومعامل الإنحناء.

### التوصيات: Recommendation

وفقاً لنتائج قياس العينات المطبوعه ثلاثية الأبعاد وترتيب أولويات الاستخدام حسب قيم خواصها الميكانيكية نوصى باستخدام الأنسب لكلا على حدة كالآتي:

- 1- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة PLA للإستخدامات الجمالية بدلاً من الاستخدامات الميكانيكية وتصنيع الأغشية البلاستيكية والزجاجات والمستلزمات الطبية القابلة للتحلل، بما في ذلك البراغي والمسامير والألواح والقضبان المصممة للتحلل الحيوي في غضون 6 إلى 12 شهراً.
  - 2- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة ABS في صناعة أغطية الرأس الواقية مثل القبعات الصلبة والخوذات وفي الطابعات والمكائن الكهربائية وأدوات المطبخ والفاكسات والألات الموسيقية والألعاب البلاستيكية.
  - 3- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة PETG في زجاجات المياه وحوايات الطعام. ولصنع الأشياء التي تلامس الطعام، مثل الإكسسوارات الخاصة بالمطبخ أو أواني التقديم والحوايات.
  - 4- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة PC-ABS في المصابيح اليدوية، والهواتف، ولوحات المفاتيح، والشاشات، وحافظات IP للسيارات، وأغطية العجلات، وأغطية الجرارات وبعض خوذات الأمان.
  - 5- استخدام المطبوعات المنتجة بخامة PLA Wood في تطبيقات البناء والتشييد، تليها مكونات السيارات. كما تُستخدم المركبات الخشبية والبلاستيكية على نطاق واسع في التزيين، والقولبة والانزلاق، والسياج.
- وذلك بهدف رفع كفاءة المطبوع ثلاثي الأبعاد عن طريق الإستغلال الأمثل لإمكاناته ومنها (زيادة العمر التشغيلي له وعدم الحاجة للإستبدال في فترات زمنية قصيرة وبالتالي توفير في الوقت والتكلفة، تحمل ظروف التشغيل، كفاءه الأداء) بما يحقق الجودة العالية للمطبوعات والأداء الأمثل في الاستخدام.

### المراجع: References

- 1- Alaa Jabbar Almaliki, The Processes and Technologies of 3D Printing, Universiti Utara Malaysia, October 2015
- 2- Ahmad Adnan Bin Abu Bakar and 7 authors, The study of mechanical properties of poly(lactic) acid PLA-based 3D printed filament under temperature and environmental

نتيجة قياس مقاومة التآكل:

أعلى عينة لها القدرة على مقاومة التآكل بالترتيب كالتالي ( BETG ) ثم تتساوى PC- ABS مع PLA يليهم PLA Wood ثم ABS (أقلهم)

### النتائج: Results

- 1- تتميز المطبوعات ثلاثية الأبعاد المطبوعه بخامة PLA بأنها:
  - أعلى قوة شد من ABS
  - أعلى معامل إنحناء من PLA Wood ، ABS ، BETG
  - أعلى في قوة الإنحناء ومعامل الشد من PC- ABS ، PLA Wood (ABS ، Wood)
  - أعلى إجهاد كسر من PC- ABS ، PLA Wood.
  - أكثر مقاومة للتآكل من PLA Wood ، ABS.
- 2- تتميز المطبوعات ثلاثية الأبعاد المطبوعه بخامة BETG بأنها:
  - أعلى معامل شد وقوة إنحناء ومقاومة للتآكل على الإطلاق من كل الخامات.
  - أعلى قوة شد من PC- ABS ، ABS ، PLA.
  - أعلى في إجهاد الكسر من PLA Wood ، PC- ABS (PLA Wood)
  - أعلى في معامل الإنحناء من (PC-ABS ، PLA Wood)
- 3- تتميز المطبوعات ثلاثية الأبعاد المطبوعه بخامة ABS بأنها:
  - الأعلى في تحمل إجهاد الكسر ومعامل الإنحناء على الإطلاق.
  - الأقل في مقاومة التآكل وقوة الشد ومعامل الشد على الإطلاق.
  - أعلى في قوة الإنحناء (التمزق) من (PLA Wood ، PC- ABS).
- 4- تتميز المطبوعات ثلاثية الأبعاد المطبوعه بخامة PC- ABS بأنها:
  - أعلى قوة شد من PLA ، ABS.
  - أعلى معامل شد من ABS .
  - الأقل على الإطلاق في قوة الإنحناء.
  - أعلى مقاومة للتآكل من ABS ، PLA Wood
  - أعلى في إجهاد الكسر ومعامل الإنحناء من PLA Wood
- 5- تتميز المطبوعات ثلاثية الأبعاد المطبوعه بخامة PLA Wood بأنها:
  - أعلى قوة شد على الإطلاق.
  - أعلى معامل شد من PC- ABS ، ABS
  - أعلى في قوة الإنحناء من PC- ABS.
  - أعلى مقاومة للتآكل من ABS

- University of Technology, 2015
- 14- John R. Tumbleston and others , Continuous liquid interface production of 3D objects, 2015
  - 15- Dilan Ezgi DÜZGÜN and others , Continuous liquid interface production (CLIP) method for rapid prototyping, Journal of Mechanical and Energy Engineering, 2018
  - 16- Yanis Gueche , Selective Laser Sintering (SLS), a New Chapter in the Production of Solid Oral Forms (SOFs) by 3D Printing, Université de Montpellier, 2021
  - 17- Ali I. Al-Mosawi, Study of some mechanical properties for polymeric composite material reinforced by fibers , Al-Qadisiyah Journal for Engineering Sciences , 2009.
  - 18- Wenjun Xie and others, Corrosion Resistance of Stainless Steel and Pure Metal in Ternary Molten Nitrate for Thermal Energy Storage, 10th International Conference on Applied Energy , 2018, Hong Kong, China.
  - 19- Rajan Kumaresan , Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications , The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022
  - 20- Anup Kumar Deyin , What is Tensile Strength, Civil, Mechanical, Piping Stress Analysis, Piping Stress Basics
  - 21- [https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5\\_2020\\_03\\_23/109\\_45\\_39\\_PM.pdf](https://uomustansiriyah.edu.iq/media/lectures/5/5_2020_03_23/109_45_39_PM.pdf)
  - 22- <https://cdn02.plentymarkets.com/pvdtiof45f2/propertyItems/43/material%20data%20sheet%20wood%20filament%20purefil.pdf>
  - 23- Ahmad Adnan Bin Abu Bakar and 7 authors, The study of mechanical properties of poly(lactic) acid PLA-based 3D printed filament under temperature and environmental conditions, June 2022
  - 24- [https://www.stratasys.com/contentassets/0cbbb e43e9ab4200a16c507eb99ebe7e/mds\\_fdm\\_pc-abs\\_0222a2.pdf](https://www.stratasys.com/contentassets/0cbbb e43e9ab4200a16c507eb99ebe7e/mds_fdm_pc-abs_0222a2.pdf)
  - 25- <https://www.bcn3d.com/pla-vs-abs-comparing-3d-printing-filament/>
  - 26- [https://prusament.com/media/2020/01/PETG\\_TechSheet\\_ENG.pdf](https://prusament.com/media/2020/01/PETG_TechSheet_ENG.pdf)
  - 27- <https://www.flashforge.com/product-detail/flashforge-creator-pro-3d-printer> conditions, June 2022
  - 3- José Luis Dávila , Algorithms-aided design applied to the tool-paths generation for hybrid manufacturing, Dec 2020, Fundação de Apoio à Capacitação em Tecnologia da Informação Campinas, Brazil
  - 4- Adam Hehr and others , Smart Build-Plate for Metal Additive Manufacturing Processes, , 2020, USA
  - 5- Yayue Pan and others , Machine learning for continuous liquid interface production: Printing speed modeling, Journal of Manufacturing Systems, January 2019
  - 6- Mattias Miedzinski, Materials for Additive Manufacturing by Direct Energy Deposition, Master's thesis in Materials Engineering, Department of Materials and Manufacturing Technology, chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden 2017
  - 7- R. Hedrick and others , Fused Deposition Modeling Design Rules for Building Large, Complex Components, CAMufacturing Solutions Inc, USA, 2016
  - 8- M. Shellabear and others , DMLS – DEVELOPMENT HISTORY AND STATE OF THE ART, EOS GmbH Electro Optical Systems, Germany; 2004.
  - 9- Marek Pagac , A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing, technical University of Ostrava, 2021.
  - 10- Yi Suping and others , Accuracy Study on Laminated Object Manufacturing for the Metallic Functional Parts with Complex Surface, Chongqing University, Japan.
  - 11- Ahmed Selema and others , Metal additive manufacturing for electrical machines : technology review and latest advancements, Department of Electromechanical, Systems and Metal Engineering, 2022
  - 12- Jigang Huang , A Review of Stereolithography: Processes and Systems , Sichuan University , 2020
  - 13- Ż. A. Mierzejewska and others , Selective Laser Sintering – Binding Mechanism And Assistance In Medical Applications, Bialystok

