دراسة التطور التقني للطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج وتشكيل الزجاج

وليد فاروق على [١] وليد أنسي الحمامصى [٢] هاجر سعيد حفناوى [٣]

[١] باحث دكتوراه
[٢] أستاذ مساعد بقسم الزجاج - كلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان .
[٣] أستاذ مساعد بقسم الزجاج - كلية الفنون التطبيقية – جامعة حلوان.

Submit Date: 2023 -09-11 21:48:12 | Revise Date: 2023-12-01 00:46:46 | Accept Date: 2024-07-16 11: 16:09

DOI: 10.21608/jdsaa.2024.235165.1376

ملخص البحث:-

يمثل التصنيع الرقمي في الزُّجاجِ من خلال الطباعة ثُلاثية الأبعاد، نقلة نوعية كبيرة في طريقة تَصْميم وتصنيع المُنتج الزُّجاجيَّ، ما يفتح فرصًا لاستكشاف الوظائف التي يتعذر الوصول إليها بواسطة التقنيات التقليدية، ومن ثم فإن توافر المعلومات حول اتجاهات تطور الطباعة ثُلاثية الأبعاد في إنتاج وتشكيل الزجاج، يُسهم في زيادة فعالية النشاط الابتكاري، وإنتاج منتجات زجاجية غير تقليدية. وعليه يرتبط هذا البحث بدراسة تطور اتجاهات الطباعة ثلاثية الأبعاد، في مجال إنتاج وتشكيل الزجاج، متناولًا تطوير طابعات قابلة لتوظيف مصهور الزجاج في التشكيل والإنتاج، وتطوير مواد التصنيع بالإضافة "مادة الزجاج".

الكلمات المفتاحية:-

الطباعة ثلاثية الأبعاد – الزجاج – التصنيع بالإضافة

مقدمة:

شهدت الأعوام الماضية تَقدُمًا ملحوظًا في الطباعة ثُلاثية الأبعاد، لكن ظل الزُّجاجِ لفترة طويلة، بعيدًا عن تأثيرها، حيث كانت مُشكلة الحفاظ على درجات الحرارة اللازمة لانسياب وتدفق الزُّجاجِ، وقابلية تشكيله، من أكبر معوقات استخدامه في تطبيقات الطباعة ثُلاثية الأبعاد.

وبعد أن واصلتْ تقنيةُ الطباعةِ ثُلاثية الأبْعاد انتشارها الواسع، وشهدتْ تحسينات كبيرة، برزت الطباعة ثلاثية الأبعاد كنهج واعد لتشكيل الزجاج في أشكال معقدة لا تستطيع تقنيات معالجة الزجاج التقليدية تحقيقها، وركزت الدراسات العلمية في البداية على تطوير طابعات قابلة لتوظيف مصهور الزجاج في التشكيل والإنتاج، ومع تسارع وتيرة تطورها في السنوات الأخيرة اتخذت الطباعة ثلاثية الأبعاد نهجًا مختلفًا، من حيث التوجه لتطوير المواد المضافة للصنيع، ومن بينها "مادة الزجاج"، بغرض التغلب على درجات الحرارة المرتفعة، وزيادة القابلية لإنتاج أشكالًا أقل حجمًا وأكثر تعقيدًا، ومن المُرتقب أن يفتح هذا الابتكار آفاقًا واسعة لتُكنولوجيا الطباعة ثُلاثية الأبعاد في مجال الزُّجاجِ.

وعليه يتضح أن توافر المعلومات المرتبطة بوتيرة التطور التقني للطباعة ثلاثية الأبعاد في السنوات الأخيرة، يسهم في زياة فعالية نشاطها في مجال تصميم وإنتاج الزجاج.

مشكلة البحث: تكمن في نقص المعلومات حول التطور التقني للطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج وتشكيل الزجاج.

هدف البحث: التوصل إلى الاتجاهات التقنية للطباعة ثلاثية الأبعاد في إنتاج الزجاج.

فرض البحث: أن تحديد أهم الاتجاهات التقنية للطباعة ثلاثية الأبعاد يؤثر تأثيرًا إيجابيًا في تحقيق الأساليب المتنوعة في إنتاج وتشكيل الزجاج.

أهمية البحث:

-إثراء الدراسات العلمية الخاصة بتصميم وإنتاج الحلي الزجاجية.

-يسهم البحث في تنمية المشروعات الزجاجية الصغيرة.

منهجية البحث: (وصفي – تحليلي).

محاور البحث:

المحوررالأول: اتجاهات تطوير الطابعات ثلاثية الأبعاد في إنتاج وتشكيل الزجاج.

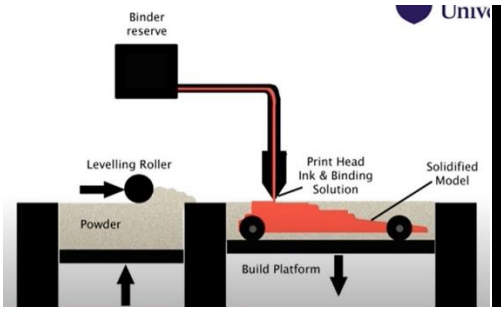
المحور الثاني: اتجاهات تطوير المواد المضافة للتصنيع " مادة الزجاج" في الطباعة ثلاثية الأبعاد

المحور الأول: تطوير الطابعات ثلاثية الأبعاد في إنتاج وتشكيل الزجاج:

تناولت الدراسات العلمية إنتاج الزجاج عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد من خلال التركيز على تطوير طابعات يمكنها استخدام مصهور الزجاج في التشكيل والإنتاج، وتضم هذه الطابعات في تكوينها أفرانًا صغيرة، ووحدات برمجية، ويمكن أن نطلق علي هذا التوجه "إنتاج الزجاج بصورة مباشرة عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد"، وتتضمن عدة تقنيات، من بينها:

- تقنية نفث المواد الرابطة Binder Jetting

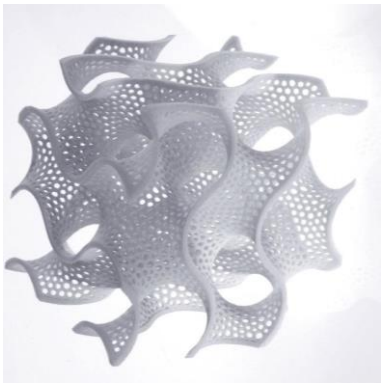
تعد شركة ExOne الألمانية إحدى الشركات الأولى التي طورت نظامًا لتشكيل الزجاج من خلال الطباعة ثلاثية الأبعاد، حيث يوضح الشكل (١) تقنية نفث الموثق binder jetting process، والتي اعتمدت على دمج جزئيات مجموعة من المساحيق، ثم تلبيدها، عبر المعالجة الحرارية في فرن كهربي.(Wolfson,2015)



شكل (١) رسم تخطيطي لتقنية نفث الموثق في الطباعة ثلاثية الأبعاد (Wolfson,2015) –

أظهرت نتائج تجارب طابعة ExOne (Susanne, 2012)، إمكانية تنفيذ زجاج بأشكال هندسية، لكنها مع ذلك معتمة وهشة مخشنة الملمس العيوب، ما يجعلها غير مناسبة للمنتجات الزجاجية التجارية، موضحة في صورة (١)، وصورة (٢).

صورة (١) أشكال زجاجية معتمة منفذ من خلال طابعة ExOne ثلاثية الأبعاد (Susanne, 2012)



صورة (٢) أشكال زجاجية ذات تصميم معقد منفذة باستخدام طابعة ExOne ثلاثية الأبعاد (Susanne, 2012)

بدأ الدراسات حول إنتاج الزجاج من خلال الطباعة ثلاثية الأبعاد في عام ٢٠١٢م، عندما نشرت Hewlett–Packard (HP) ورقة بحثية عن "الطباعة ثلاثية الأبعاد للزجاج الشفاف"، حيث تناول البحث استخدام تقنية بثق مزيجًا من مسحوق مادة الزجاج، مع المعالجة الحرارية بعد إتمام عملية الطباعة، كما حاول فريق البحث مزج الزجاج مع مواد راتنجية بوليمرية لتطبيق الطباعة ثلاثية الأبعاد على الزجاج البارد، ومع ذلك، فجميع النتائج الأولية كانت، تتمتع بالعتامة، وتفتقر إلى الشفافية، موضحة في صررة (٣).

صورة (٣) نتائج تفتقر للشفافية من محاولات HP لطباعة الزجاج عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد (Susanne, 2012)

وفي يناير ٢٠١٥، نشرت HP ورقة بحثية أخرى تحت عنوان "طباعة الزجاج ثلاثي الأبعاد: تشطيب السطح وخصائص الحجم كوظيفة لعمليات الطباعة"، وأوضحت الدراسة، وجود صعوبة في طباعة الزجاج مباشرة من مصهور الزجاج، بنهج الطبقات المتتالية، لاسيما مع ضرورة تبريد مصهور الزجاج بسرعة لتجنب تبلوره ثم تلدينه لإزالة الضغط الناتج عن التبريد.(Susanne, 2015)

وفي مارس ٢٠١٥م، نشرت HP ورقة بحثية تحت عنوان "من خلال وضوح الزجاج: تحدي الطباعة الزجاجية ثلاثية الأبعاد"، وأوضحت الدراسة، أنه مع التطور السريع والاهتمام بالطباعة ثلاثية الأبعاد، لا تزال هناك تحديات تقنية تواجه التصنيع بالإضافة، من بينها، تقليص وقت عملية الطباعة، بالإضافة لتوسيع نطاق المواد المستخدمة في الطباعة، كما تناولت الدراسة الأساليب المباشرة وغير المباشرة للطباعة ثلاثية الأبعاد، وتأثيرها شفافية الزجاج الناتج.

- **تقنية التلبيد الانتقائي بالليزر "صهر مسحوق الرمل"** (Jenny ,2016)

تستخدم تقنية التلبيد الإنتقائي بالليزر SLS ، في تشكيل منتجات ثلاثية الأبعاد من خلال تلبيد طبقة من مسحوق المادة، وفي محاولة لتشكيل منتجات زجاجية ثلاثية الأبعاد، استخدم باحث طابعة تعمل بتقنية التلبيد الانتقائي بالليزر، كما في صورة (٤)، من خلال قاطع ليزر بقدرة ٨٠ واط، وذلك لتلبيد رمال شاطئية لتشكيل أجسام زجاجية ثنائية الأبعاد، مع استخدام كربونات الصوديوم معه لتقليل نقطة الانصهار، وأظهرت النتائج الموضحة في صورة

(٥)، أن المنتجات الزجاجية ثنائية الأبعاد الناتجة، زخرفية ومتكلسة وهشة، ولا تتمتع بقابلية الاستخدام.

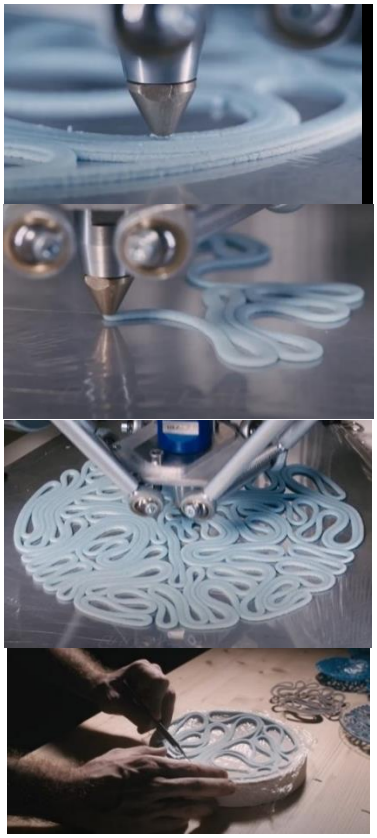
صورة (٤) عملية إنتاج الزجاج من خلال تقنية التلبيد الانتقائي بالليزر (Jenny ,2016)

صورة (٥) نماذج زجاجية زخرفية هشة من خلال تقنية التلبيد الانتقائي بالليزر (Jenny ,2016)

تقنية Vero 2 للجمع بين إعادة تدوير الزجاج والتصنيع الرقمي: (Davide ,2021)

استهدفت تقنية SILVERIO معالجة مشكلة نفايات زجاج المورانو، وإعادة توظيفها في منتجات زجاجية ثلاثية الأبعاد (شكل ٦)، من خلال دمج التقنيات الحديثة مع صناعة الزجاج التقليدية، حيث اعتمدت التقنية طابعة Delta WASP 2040 Clay ، لبثق مركب مصنوع من مسحوق زجاج المورانو، في درجة حرارة الغرف، وبعد عملية التجفيف، يتم معالجة المنتج المطبوع ثلاثي الأبعاد حراريًا في أفران كهربائية مغلقة عند ٧٠٠ درجة مئوية، حيث يفقد الشكل الجزء غير الزجاجي من المركب الأولي خلال عملية الصهر، ومن ثم الحصول على منتج زجاجي من المورانو بنسبة ١٠٠٪.الموضحة في صورة (٧).

صورة (٦) منتجات من إعادة تدوير زجاج المورانو عبر التصنيع الرقمي(Davide ,2021)

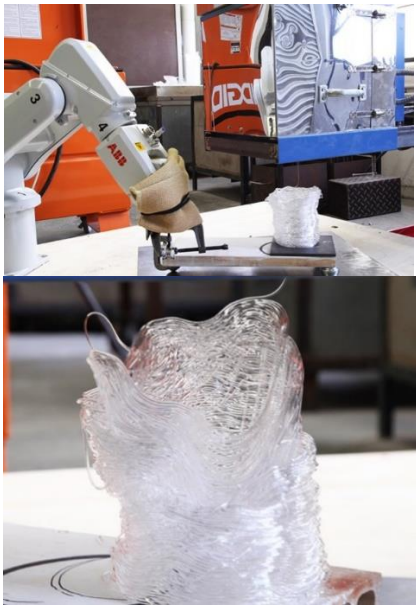


صورة (٧) مراحل إنتاج عجينة زجاج المورانو عبر طابعة ثلاثية الأبعاد (Davide ,2021)

تقنية بثق مصهور الزجاج عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد

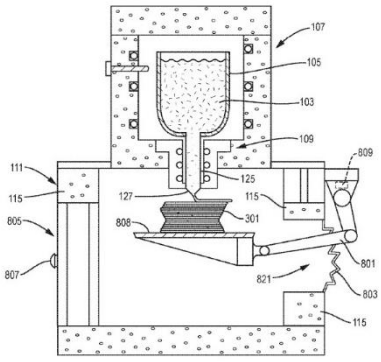
تقنية نمذجة الترسيب المنصهر أو بثق المصهور (FDM): هي عبارة عن عملية تغذية خيوط مستمرة من مصهور الزجاج عبر فوهة ساخنة، لترسيب طبقات الزجاج فوق بعضها، عن طريق تحريك الفوهة، ليتصلب الشكل ببطئ خلال عملية الطباعة.

طورت Stefanie pender " طابعة مزودة بروبوت آلي، صورة (٨)، تعمل بتقنية "نمذجة الترسيب المنصهر"، من خلال استخدام خيوط الزجاج لتكوين الأجسام الزجاجية، حيث تعمل الطابعة على تحريك الألياف الزجاجية عبر فوهة، عند درجة حرارة تصل لنحو ٢٠٠٠ درجة فهرنهايت، وتُرسّبها على السطح، ويتم تثبيت الجهاز على روبوت صغير يكرر دقة العمليات التقليدية، وينتج أشكالًا هندسية معقدة داخل غرفة حرارية. (Stefanie, 2017)



صورة (٨) مراحل طباعة الزجاج بتقية الطباعة ثلاثية الأبعاد عبر نمذجة الترسيب المنصهر (Stefanie, 2017)

تمكنت شركة Micron3DP في عام ٢٠١٥، من طرح طابعة ثلاثية الأبعاد لمنتجات زجاجية متنوعة ومعقدة الأشكال، صورة (٩)، بداية من التصميم على الكمبيوتر وطباعتها باستخدام مصهور الزجاج المتعدد الألوان عند درجة حرارة ٨٥٠ درجة مئوية، وكذلك زجاج البورسليكات عند درجة حرارة انصهار ١٦٤٠ درجة مئوية، بطريقة مماثلة لطباعة اللدائن الحرارية المنصهرة، ثم يبرد ويتصلب بسرعة قبل طباعة الطبقة التالية في الأعلى، وتستمر هذه العملية حتى تتم طباعة الشكل بصورة كاملة، وتستخدم الطابعة صندوقًا مغلقًا ومسخَنًا يحتوي على الزجاج المصهور، وصندوقًا آخر يُتحكَّم فيه حراريًا ، حيث يطبع الجسم الزجاجي، وتقوم اللوحة المتحركة بنقل الجسم إلى الأسفل أثناء طبعه مع تحريك رأس الطابعة فوقه، شكل (٢).



شكل (٢) رسم توضيحي لنموذج طابعة ثلاثية الأبعاد من طراز Micron3DP

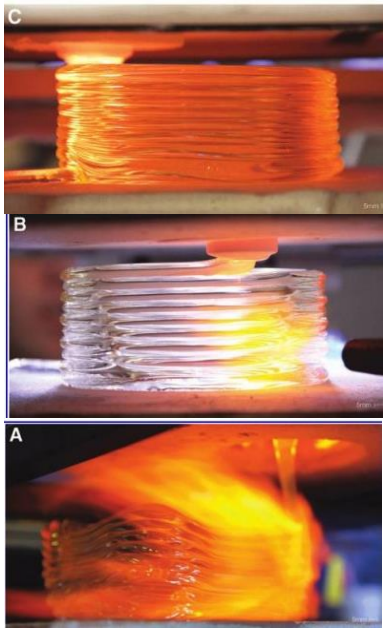
صورة (٩) منتج زجاجي منفذة بالطابعة ثلاثية الأبعاد لشركة Micron3DP

تعاونت Micron3DP مع Swarovski لطباعة الزجاج البلوري ثلاثي الأبعاد، حيث كانت سواروفسكي راعية لجوائز مصممي المستقبل لعام ٢٠١٧، واستخدم أحد الفائزين مشروع TAKT، لإنتاج حاملات الشموع والمزهريات من زجاج الكريستال، المستوحاة من بلورات الصقيع، ذات الملمس الناعم ومضلعة الشكل، ويبلغ سمكها ١.٥ ملم فقط، تم عرضها في معرض Design Miam في بازل ٢٠١٧، صورة (١٠).

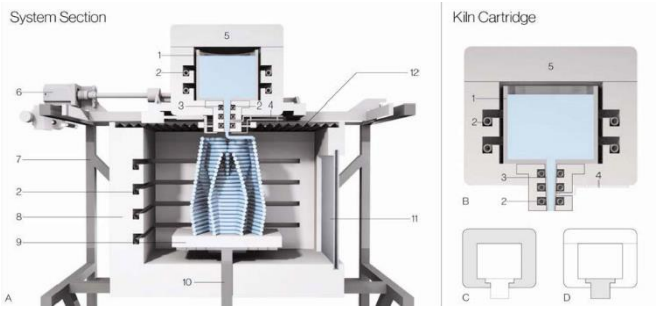
ومع ذلك، بحلول عام ٢٠١٨ ، قررت Micron3DP إيقاف نشاطها في مجال الطباعة ثلاثية الأبعاد للزجاج، والتوجه لأنشطة صناعية أخرى.

صورة (١٠) منتجات زجاجية منفذة عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد
بواسطة سواروفسكي – www.dezeen.com

في حين حاولت الأوساط الأكاديمية في عام ٢٠١٧ تطوير طابعة زجاجية ثلاثية الأبعاد تعمل على تقنية "بثق المصهور"طراز FDM / FFF، شكل (٣) (John , 2015) ، وتعتمد عملية الطباعة على تغذية فرن بخام الزجاج الصهور، حيث يمثل الفرن نفسه وحدة البثق، كما تزود هذه الطابعة بغرفتين حراريتين، يمثل الجزء العلوي "غرفة الصهر"، إذ يصهر فيه الزجاج عند درجة حرارة ١٠٠ درجة مئوية، ويمثل الجزء السفلي "منصة تشكيل المنتج الزجاجي" في درجة حرارة ٥٠٠ درجة مئوية، ويدفع مصهور الزجاج من غرفة الصهر، إلى منصة التشكيل، عبر فوهة مصنوعة من الألومينا والزركون والسيليكا، بغرض الحفاظ على درجة مصهور الزجاج، صورة (١١)، وبعد الانتهاء من تكوين الشكل المطلوب، يترك ويبرد ويتصلب تدريجيًا حتى درجة حرارة الغرفة، ويُقف تدفق الزجاج والطباعة، من خلال خفض درجة حرارة الفوهة باستخدام الهواء المضغوط، وذلك للحصول على منتجات زجاجية معقدة الأشكال، صورة (١٢).



صورة (١١) إنتاج الزجاج عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد بطريقة بثق المصهور (John , 2015)

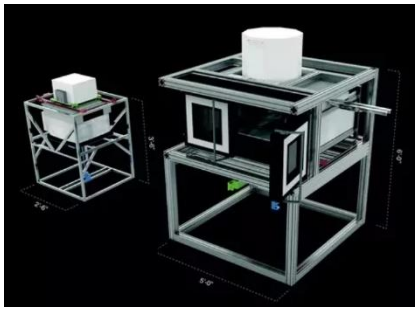


شكل (٣) مواصفات الطابعة ثلاثية الأبعاد المستخدمة فى إنتاج الزجاج بطريقة بثق المصهور(John , 2015)

صورة (١٢) مجموعة من المنتجات الزجاجية المنفذة بتقنية بثق المصهور عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد)(John , 2015)

واصل فريق بحثي من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا العمل على تحسين التقنية المستخدمة في إنتاج الزجاج، من خلال طابعة G3DP2 ، صورة (١٣)، والتي تجمع بين نظام تحكم حراري متكامل رقميًا ثلاثي الأبعاد مع تحكم في الحركة رباعي المحاور، وتعمل على تشكيل منتجات زجاجية بأشكال هندسية معقدة، وذلك خلال ترسيب مصهور الزجاج، المكون من جزيئات زجاج السيليكات ومادة راتنجية.

وتتكون هذه الطابعة من صندوق مغلقً، ومسخنًا، للحفاظ على درجة حرارة مصهور الزجاج، مع صندوق أخر يتم التحكم فيه حراريًا حتى تتم الطباعة. (Chikara, 2018)



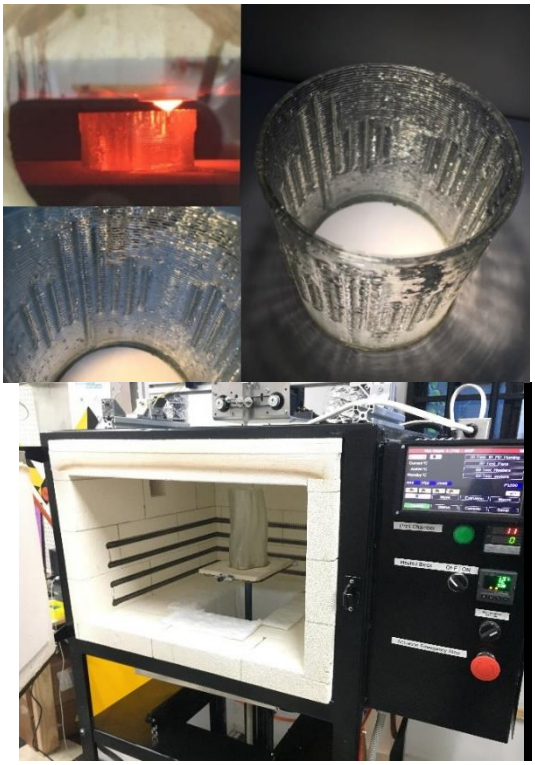
صورة (١٣) طابعة G3DP2 إصدار معدل من طابعة الزجاج ثلاثية الأبعاد G3DP

ومن أجل اختبار قدراتها، تم تصنيع مجموعة من الأعمدة الزجاجية التي يبلغ ارتفاعها ٣ أمتار، وعرضها في أسبوع ميلان للتصميم في عام ٢٠١٧ ، حيث أبرز المشروع، مدى التعقيد الهندسي والدقة والقوة والشفافية للزجاج المطبوع ثلاثي الأبعاد، صورة (١٤).

صورة (١٤) مجموعة من الأعمدة الزجاجية المصنعة عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد .(Chikara, 2018)

حاولت شركة Maple Glass Printing، إجراء تجارب في مجال إنتاج الزجاج عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد منذ عام ٢٠١٧، وفي عام ٢٠٢٠، استطاعت الشركة طرح أول طابعة لها، بجودة عالية وبأسعار معقولة، صورة (١٥).

تتمتع هذه الطابعة بقدرتها على استخدام زجاج معاد تدويره بنسبة ١٠٠٪ ، صورة (١٦) وأن عملياتها أقل استهلاكًا للطاقة، حيث يسخن الزجاج فقط لبضع دقائق على درجة حرارة عالية لصهره، وخلال عملية الطباعة برزت مشكلة اختلاف معامل التمدد الحراري للزجاج المنصهر، ومن ثم تحتاج هذه الطابعة لفرز الزجاج المعاد تدويره قبل إتمام الطباعة.



صورة (١٥) توضح شكل وطريقة عمل طابعة Maple Glass

صورة (١٦) مجموعة من المنتجات الزجاجية المنفذة عبر طابعة Maple Glass –https://www.mapleglassprinting.com

المحور الثاني: اتجاهات تطوير المواد المضافة للتصنيع " مادة الزجاج" في الطباعة ثلاثية الأبعاد

اتخذت الطباعة ثلاثية الأبعاد نهجًا مختلفًا، مع توجهها لتطوير المواد المضافة للصنيع، ومن بينها "مادة الزجاج"، بدلًا من تطوير الطابعات، بغرض التغلب على درجات الحرارة المرتفعة، وزيادة القابلية لإنتاج أشكال أقل حجمًا وأكثر تعقيدًا، لا يمكن إنتاجها بالطرق التقليدية.

- **تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام " الكتابة بالأحبار المباشرة "** (Du T. ,2017).

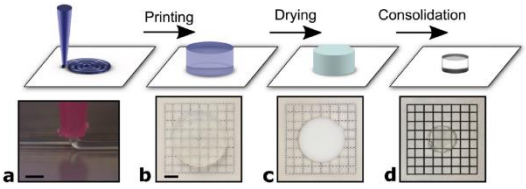
توصل باحثون في مختبر لورانس ليفرمور الوطني، إلى تطوير أحبار من مسحوق مادة السيليكا، يمكن طباعتها بالطباعة ثلاثية الأبعاد بتقنية "الكتابة بالأحبار المباشرة"، ثم معالجتها حراريًا لإنتاج منتجات زجاجية شفافة ومتنوعة. وتعد الطباعة بالأحبار المباشرة، تقنية تجمع فيها طبقات الزجاج طبقة تلو الأخرى، من خلال بثق المادة الغروية، والتحكم في لزوجتها أو ما يعرف بخاصية ترقيق القص،[١] وتدفقها عبر فوهة في نمط قابل للبرمجة، حيث تتصلب الأحبار بسرعة عبر التبلور، شكل (٤).

وتعتمد التقنية على طباعة زجاج شفاف ثلاثي الأبعاد متعدد الطبقات باستخدام أسلوب يتضمن خطوتين "تشكيل وتلبيد مادة السيليكا الزجاجية"، وذلك من خلال طباعة معلقات السيليكا الغروية بترسيب الخطوط لتشكيل بنية محددة للشكل، وتسمى هذه الأشكال الهندسية الأولية، بـ"الأجسام الخضراء"، وهي أجسام منخفضة الكثافة نتيجة مساميتها، في حين تتميز هذه التقنية بالقدرة على التحكم في لزوجة السائل عبر الضغط، للتوصل إلى درجة سماكة تتوافق مع الشكل المراد تشكيله، وبعد ذلك يتم معالجة الأجسام المطبوعة حراريًا في درجات حرارة أقل من درجة انصهار السيليكا، لتلبيد "الجسم الأخضر" وتحوله إلى أشكال صلبة كثيفة، وغير متبلورة، وشفافة، صورة (١٧).

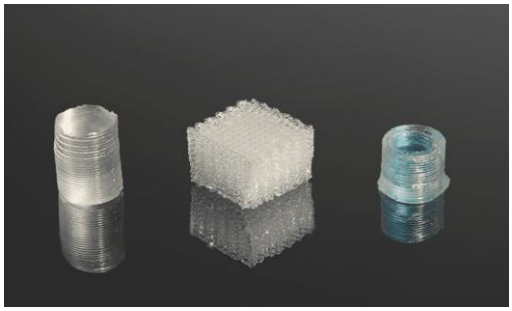
وعلى عكس الطباعة ثلاثية الأبعاد للزجاج بتقنية بثق المصهور، لا تتطلب هذه التقنية درجات حرارة عالية أثناء التشكيل، بالإضافة لإنتاج أشكالًا عالية الدقة وبأحجام صغيرة، وذلك بفعل إمكانية بثق خيوط رفيعة من مادة السيليكا، بجانب الانكماش الذي يحدث خلال مرحلة التكثيف.

---

[١] ترقيق القص: أي نقل لزوجتها الظاهرة مع زيادة الضغط، وهي من اللزوجة اللانيوتونية، أي أنها من الموائع التي لا تتبع قانون نيوتن للزوجة، على سبيل المثال " الكتشب" يصبح سائلًا عند رجه.



شكل (4) الطباعة ثلاثية الأبعاد على الزجاج (Du T. 2017)



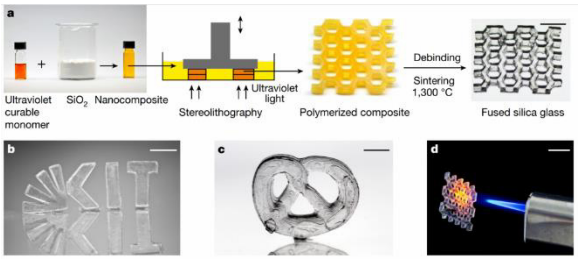
صورة (١٧) منتجات زجاجية منفذة بطريقة الطباعة ثلاثية الأبعاد " الكتابة بالأحبار" (Du T. ,2017)

-تقنية الطباعة الحجرية "ستيريوليثجرافي" ثلاثية الأبعاد:

(David, 2019)

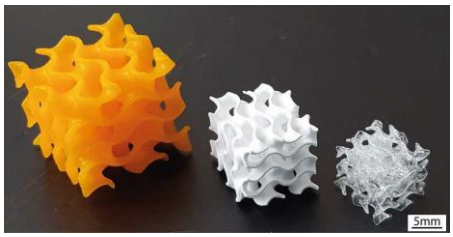
الطباعة الحجرية الحجرية stereolithography : تصف هذه التقنية نمط طباعة طبقة تلو الأخرى حيث يتسبب مصدر الضوء في ربط المونومرات الموجودة في المادة ببعضها البعض لتشكيل بوليمرات.

تتناول هذه التقنية تصنيع منتجات زجاجية معقدة باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد، تعتمد بالأساس على تطوير مادة "راتينجية" خاصة، يمكن معالجتها بالأشعة فوق البنفسجية، وتحويلها من الحالة السائلة للحالة الصلبة، حتى يكتمل بناء الشكل المطلوب بنهج البطقات المتتالية "طبقة تلو الأخرى"، ثم تحول لمنتجات زجاجية من خلال المعالجة الحرارية التقليدية للزجاج "التشكيل الحراري"، والموضحة في شكل (٥)، وصورة (١٨) وصورة (١٩).



شكل (٥) طباعة ثلاثية الأبعاد لزجاج السيليكا المصهور

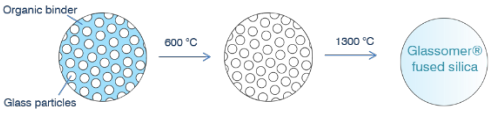
صورة (١٨) إنتاج الزجاج باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد " ستيريوليثجرافي" (David, 2019)



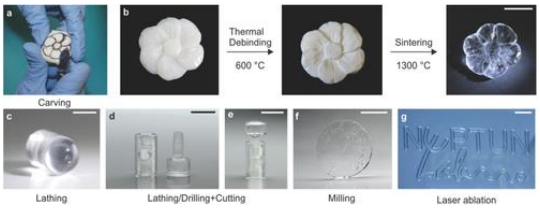
صورة (١٩) مراحل إنتاج الزجاج بتقنية الطباعة الحجرية "ستيريوليثجرافي" ثلاثية الأبعاد (David, 2019)

- **تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد باستخدام مركبات النانو glassomer:** (Frederik,2018)

تعتمد هذه التقنية على تطوير مركب نانوي يسمى "Glassomer"، في صورة سائلة أو صلبة، حيث يتألف من ٦٠ % من مادة السيليكا، ومادة رابطة، ومن خلال طابعة ثلاثية الأبعاد، وباستخدام طريقة "ستيريوليثجرافي"، يتحول المركب من صورته السائلة للحالة الصلبة عبر تعريضه للأشعة فوق البنفسجية، ومن ثم يمكن معالجته حراريًا وتحويله إلى منتج زجاجي، شكل (٦)، وصورة (٢٠).

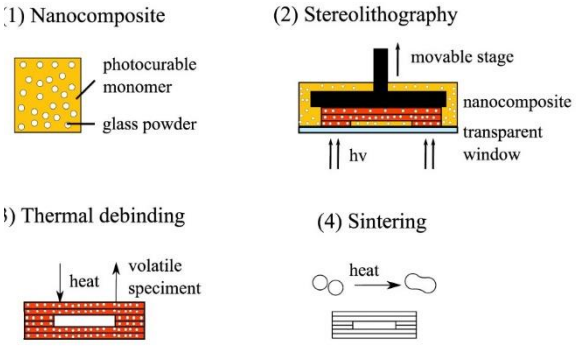


شكل (٦) مراحل إنتاج الزجاج عبر باستخدام المركب النانو Glassomer



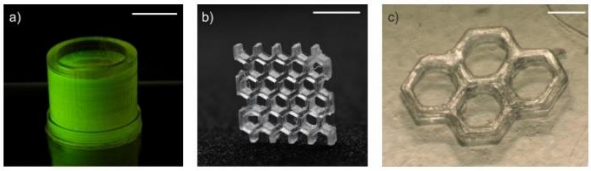
صورة (٢٠) زهرة زجاجية منحوتة يدويًا ومنفذة من خلال المركب النانو في صورته الصلبة (Frederik,2018)

في حين تناولت دراسة جديدة تطوير مركبات نانوية جديدة من السيليكا يمكن استخدامها فى الطباعة ثلاثية الأبعاد، وتوظيف طريقة "الطباعة ستيريوليثجرافي" الدقيقة، عبر تحويل المركبات النانوية البوليمرية الناتجة إلى زجاج سيليكا مصهور باستخدام عمليات التشكيل الحراري عبر التكثيف والتلبيد، باستخدام ميزات الطباعة الحجرية الدقيقة بدقة عشرات الميكرونات ويمكن طباعة الأسطح ذات الخشونة ببضعة نانومترات، شكل (٧).



شكل (٧) الطباعة ثلاثية الأبعاد للسيليكا المنصهرة باستخدام ستيريوليثجرافي(F. Kotz,2018)

تعتمد التقنية على تشتت مسحوق مركب نانو زجاج السيليكا المنصهر من خلال ضوء الأشعة فوق البنفسجية، ثم طباعة المركب النانوي باستخدام الطباعة ستيريوليجرافي، ثم التكثيف الحراري عند درجة حرارة ٦٠٠ درجة مئوية مسحوق النانو، ثم تلبيد المسحوق عند ١٣٠٠ درجة مئوية تحت التفريغ مما يؤدي إلى إنتاج زجاج سيليكا يتميتع بالكثافة والشفافية العالية، صورة (٢١)

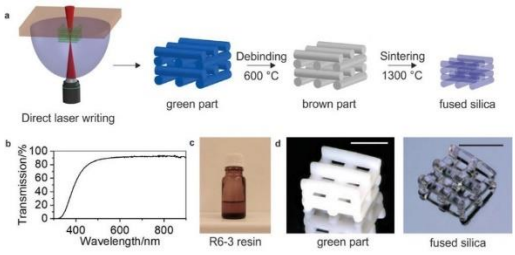


صورة (٢١) منتجات زجاجية منتجة بتطوير مركب نانوي باستخدام الطباعة الثلاثية الابعاد بطريقة "ستيريوليثجرافي" (F. Kotz,2018)

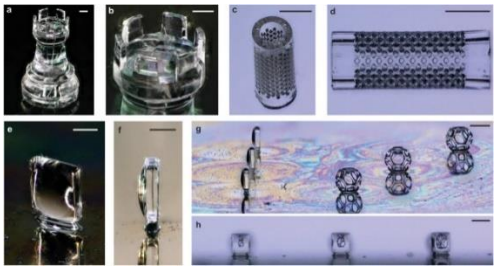
- **تقنية الطباعة الحجرية متعددة الفوتونات**

تناولت هذه التقنية إنتاج الزجاج المصهور الشفاف باستخدام طريقة "الكتابة المباشرة بالليزر" من خلال تطوير مادة راتنجية نانوية "مركبات السيليكا" قابلة للمعالجة والبلمرة ثنائية الفوتون، تُحول للزجاج باستخدام التكثيف والتلبيد الحراري، حيث يمكن من خلال هذه التقنية تشكيل أجسام زجاجية دقيقة بأحجام ميكرومترية، وأسطح ناعمة بصريًا، في نطاق لا يتجاوز عشرات الميكرومترات، شكل (٨).(Frederik,2021)

وتشكل هذه التقنية طفرة كبيرة في تصنيع منتجات زجاجية جديدة عالية الدقة، من حيث الشكل والتصميم، وتدخل فى العديد من التطبيقات بما في ذلك البصريات والضوئيات والأسطح الوظيفية، والحلي الزجاجية، صورة (٢٢).

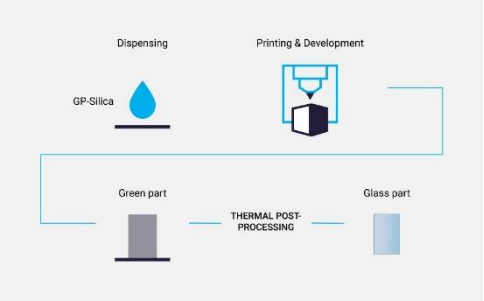


شكل (٨) الكتابة المباشرة ثلاثية الأبعاد بالليزر لزجاج السيليكا المصهور الشفاف.(Frederik,2021)



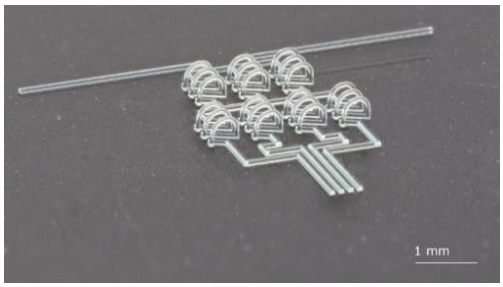
صورة (٢٢) بنية مجهرية ثلاثية الأبعاد لزجاج السيليكا المنصهر باستخدام DLW. (Frederik,2021)

وبناء على هذه الدراسة، توصلت شركة Nanoscribe إلى تصنيع مركب GP-Silica لإنتاج منتجات زجاجية ثلاثية الأبعاد من خلال البلمرة ثنائية الفوتون لزجاج السيليكا المنصهر، تتميز بنفس خصائص الزجاج التقليدي.



شكل (٩) عملية إنتاج الزجاج بالطباعة ثلاثية الأبعاد(Frederik,2021)

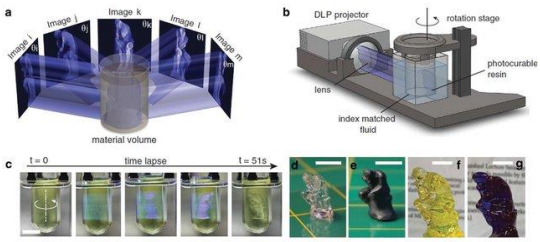
تناولت الدراسة تطوير مركب GP-Silica بالتعاون مع Glassomer GmbH، يتكون المركب من مادة راتنجية من جزيئات السيليكا النانوية، يتم معالجتها عبر تعريضها للأشعة فوق البنفسجية، لتشكيل المنتج الزجاجي عبر طباعة الشكل طبقة تلو الأخرى من خلال التلبيد والتكثيف في درجة حرارة الغرفة، ثم تعريضها حراريًا لدراجات حرارة تصل إلى ٦٠٠ درجة مئوية داخل أفران كهربائية مغلفة، شكل (٩)، وصورة (٢٣).(Chang, 2018)



صورة (٢٣) منتج من زجاج السيلكا بأشكال دقيقة ومعقدة، منفذ بالطباعة ثلاثية الأبعاد (Chang, 2018)

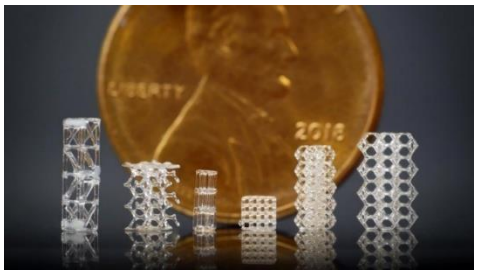
-الطباعة الحجرية المحورية ثلاثية الأبعاد "micro-CAL". (Bradley, 2022)

وسع الباحثون قدرات عملية الطباعة ثلاثية الأبعاد التي طوروها قبل ثلاث سنوات – الطباعة الحجرية المحورية المحوسبة (CAL) – لطباعة منتجات زجاجية بصورة أسرع وأكثر دقة، أطلقوا عليها اسم "micro-CAL"، وتعد الطباعة الحجرية المحورية المحوسبة Computed Axial Lithography (CAL)، هي عملية طباعة ثلاثية الأبعاد تشكل فيها الأجسام دفعة واحدة عن طريق التراكب المقطعي للإسقاطات الضوئية، من خلال شاشة جهاز عرض ضوئي رقمي، تومض صورة واحدة لكل طبقة وتصلب الأجزاء المرادة مرة واحدة، ويختلف هذا عن طرق AM الأخرى القائمة على الضوء والتي تعمل على بناء المنتجات بطريقة "طبقة تلو الأخرى"، شكل (١٠).



شكل (١٠) الطباعة الحجرية المحورية المحوسبة (Bradley, 2022)

في هذ التقنية يُعرض راتينج البوليمر الضوئي السائل لمصدر ضوء الأشعة فوق البنفسجية، من خلال عملية مستمرة ومتصلة في بناء وتكوين الأشكال، بدلاً من طريقة بنائه بأسلوب ونهج "طبقة تلو طبقة"، ما يسمح بإنتاج أشكال بأسطح ناعمة وغير خشنة الملمس، صورة (٢٤).



صورة (٢٤) قطع زجاجية منتجة عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد – معروضة أمام فلس أمريكي للقياس –(Bradley, 2022)

النتائج:

– هناك تطور ملحوظ ومستمر في تقنيات تشكيل الزجاج عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد.

2018)"**Additive manufacturing of silica glass using laser stereolithography with a top-down approach and fast debonding**"- RSC Advances-.

6 -Chikara I., Michael S., Daniel L.., Peter H., and Neri O.-(17 Dec. 2018) - **Additive Manufacturing of Transparent Glass Structures -** Mary Ann Liebert Inc.

7-David G. Moore, Lorenzo Barbera, Kunal Masania & André R. Studart- (11 November 2019),"**Three dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins** - Nature Materials Journal.

8-Du T. Nguyen, Cameron Meyers, Timothy D. Yee, Nikola A. Dudukovic, Joel F. Destino, Cheng Zhu, Eric B. Duoss, Theodore F. Baumann, Tayyab Suratwala, James E. Smay, Rebecca Dylla-Spears –(April 2017) - "**3D-Printed Transparent Glass"-** "- advanced materials technology journal – Wiley online library.

9-Frederik Kotz,Norbert Schneider,Andreas Striegel,Andre Wolfschläger,Nico Keller,Matthias Worgull,Werner Bauer,Dieter Schild,Marcel Milich,Christian Greiner,Dorothea Helmer,Bastian E. Rapp-(April 2018) - **Glassomer—Processing Fused Silica Glass Like a Polymer**-advanced materials technology journal – Wiley online library -.

10-F. Kotz, K. Arnold, P. Risch, B. E. Rapp - (8 October 2018)-"**Next-generation 3D printing of glass: the emergence of enabling materials**, Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence-Berlin, Germany.

11- Frederik K., Alexander S., Patrick R., Tanja M., Tobias H., Michael T., Dorothea H., Bastian E. Rapp – (January 2021) - "**Two-Photon Polymerization of Nanocomposites for the Fabrication of Transparent Fused Silica Glass Microstructures"-** advanced materials technology journal – Wiley online library.

12-Joel F. Destino, Nikola A. Dudukovic, Michael A. Johnson, Du T. Nguyen, Timothy D. Yee, Garth C. Egan, April M. Sawvel, William A. Steele, Theodore F. Baumann, Eric B. Duoss, Tayyab Suratwala,

– أن عملية تشكيل الزجاج عبر الطباعة ثلاثية الأبعاد تناولت اتجاهين يشملا تطوير طابعات قابلة لتوظيف مصهور الزجاج في التشكيل والإنتاج، وتطوير المواد المضافة للصنيع "مادة الزجاج".

– أن اتجاه تطوير "مادة الزجاج" في عمليات الطباعة ثلاثية الأبعاد، يمثل طفرة حقيقية، في التغلب على درجات الحرارة المرتفعة، وزيادة القابلية لإنتاج أشكالًا أقل حجمًا وأكثر تعقيدًا.

– ضرورة متابعة الدراسات والأبحاث العلمية الطفرة المستمرة في عمليات إنتاج الزجاج من خلال الطباعة ثلاثية الأبعاد، للاستفادة منها في تطبيقات في العمليات الإنتاجية في مجالات الزجاج المختلفة، بجانب تغير المناهج التعليمية بالكليات المتخصصة، لتواكب احتياجات السوق المتطورة.

أولاً: المراجع العربية:

١-أبو سعد، طارق صبحي جمعه – (أبريل ٢٠١٥) – **الطباعة ثلاثية الأبعاد وامكاناتها في التشكيل الخزفي**– المجلد الأول– المؤتمر العلمي الثاني– الدراسات النوعية، ومتطلبات المجتمع وسوق العمل– كلية التربية النوعية – جامعة عين شمس– القاهرة.

٢– دسوقي، شيماء إبراهيم– " أبريل ٢٠١٨)– تنمية القدرة الإبتكارية لمصمم الزجاج فى تصميم منتجاته بإستخدام برنامج الراينو– بحث، منشور– العدد العاشر، مجلة العمارة والفنون.

٣–حسين، دعاء حامد، (٢٠١٧)– **المتطلبات التكنولوجية لإنتاج المجسمات الزجاجية باستخدام الطباعة ثلاثية الأبعاد**– بحث منشور– العدد السابع – مجلة العمارة والفنون.

ثانيًا: المراجع الأجنبية:

4-Bradley D., Devon B., Paul M., Ryan B., and Melissa A. S.- (June 2022)- **Low Temperature Additive Manufacturing of Glass** - MIT Lincoln Laboratory, United States.

5-Chang Liu, Bin Qian, Xiaofeng Liu, Limin Tong and Jianrong Qiu, (03May

Rebecca Dylla-Spears- (January 2018)- "**3D Printed Optical Quality Silica and Silica–Titania Glasses from Sol–Gel Feedstocks"**- advanced materials technology journal – Wiley online library.
13- John Klein,1, Michael Stern, (August 19, 2015)**-"Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass "** - Mary Ann Liebert.
14- Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering - Loughborough University - "**About Additive Manufacturing "Binder Jetting" –article** – 4 May 2015 - https://www.lboro.ac.uk.
15-Michael P. Avery, Susanne Klein, Robert Richardson, Paul Bartlett,Steve Simske – (2015) -"**Through a glass clearly: the challenge of glass 3D-printing** "-NIP & Digital Fabrication Conference.
16- Rima Sabina Aouf (13 June 2017)- **Swarovski crystal gets 3D-printed, upcycled and turned into gadgets by emerging designers** -article - www.dezeen.com.
17- Susanne K., Michael P.; Richardson, Robert ; Bartlett, Paul ; Frei, Regina ; Simske, Steven –(January 22, 2015) - **٣D Printed Glass: Surface Finish and Bulk Properties as a Function of the Printing Process"**- Hewlett-Packard Development Company.
18-Susanne K., Steve S., Carinna P., Peter W., David H., Stephen H. –(September 2012)- **3D Printing of Transparent Glass** - HP Laboratories - Hewlett-Packard Development Company, L.P.
19- Susanne K., Steve S., Carinna P., Peter W., David H., Stephen H. –(2015) - "**Through a glass clearly: the challenge of glass 3D-printing** "-NIP & Digital Fabrication Conference.

Web sites:

20- Davide S.- (2021) **VERO2, recycled and 3D printed Murano glass at Glass Week - article**:
URL :https://www.voxelmatters.com/
Accessed (01/02/2023).
- Maple Glass Printing Ltd.
URL:
https://www.mapleglassprinting.com/
Accessed (10 / 10 / 2022)
21-Jenny L.- (2016) -Sintering sand with a laser cutter-
URL**:**
https://hackaday.com/2016/12/07/sintering-sand-with-a-laser-cutter/
Accessed (15 – 04 – 2022)
22- Stefanie P. (2017)- **Glass Fused Filament Deposition Modeling** - article:
URL :
https://www.instructables.com/Glass-Fused-Deposition-Modeling-FDM/
Accessed (22 / 04 / 2022).
23- Dezeen.com
:URL :
https://www.dezeen.com – Accessed (01-03-2021).