

Üç boyutlu yazıcıların cam ürün tasarımında kullanılabilirliğin incelenmesi

Investigation of the usability of three-dimensional printers in glass product design

Res. Asst. Serap Bedel Özek^{1*} 

¹Ondokuz Mayıs University, Faculty of Fine Arts, Department of Ceramics and Glass, Samsun, Turkey.
serap.bedel@omu.edu.tr

*Corresponding Author

Received: 01.06.2023
Accepted: 06.05.2024

Özet

Cam, şekillendirilmesi oldukça zor ve maliyetli bir malzemedir. Özellikle geleneksel yöntemler kullanılarak elde şekillendirilen cam, bazı formların oluşturulmasında zorlayıcı olabilmekte, bu durum da camı şekillendiren kişiyi tasarım ve uygulama yönünden sınırlandırabilmektedir. Ancak son zamanlarda araştırmaları ve denemeleri yapılan üç boyutlu cam yazıcıların, gelecekte cam alanında çalışanlar için de alternatif bir şekillendirme yöntemi sunacağı aşikârdır. Bunun sonucunda, cam alanında yapılan araştırma ve çalışmaların hangi aşamada olduğunu analiz etmek ve gelişime yön verebilmek için bu araştırmaya ihtiyaç doğmuştur. Dolayısıyla çalışmanın amacı, cam alanında kullanılan uygulama yöntemlerindeki değişimleri göz önünde bulundurarak, üç boyutlu yazıcıların cam ürün tasarımında kullanılabilirliğini araştırmaktır. Bu bağlamda çalışmanın araştırılmasında, nitel veri toplama yöntemleri olan gözlem ve doküman analizi kullanılarak üç boyutlu yazıcılar hakkında bilgi elde edilmiştir. Akademik yazılı kaynaklar, internet kaynakları ve çalışmalar incelenerek üç boyutlu yazıcılar ve uygulama çeşitlilikleri hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca, bu teknoloji ile cam ürün denemeleri yapan özel firmaların ürün üretim süreçleri ve sonuçları incelenerek teknolojinin avantajları ve dezavantajları belirlenmiştir. Çalışmanın sonucunda, üç boyutlu yazıcıların camın şekillendirilmesinde kullanılabilirliği değerlendirilmiş ve bu teknolojiyle üretilen cam nesnelerin henüz prototip aşamasında olduğu gözlemlenmiştir. Ancak geleneksel yöntemlerle şekillendirilmesi zor olan cam formların, gelişim sürecindeki bu yeni üretim yöntemiyle, gelecekte daha kolay üretilebileceği ve tasarım alanına da adapte edilebileceği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Cam, Üç boyutlu yazıcı, Cam ürün tasarımı, Cam şekillendirme teknikleri

Abstract

Glass, is a very difficult and costly material to shape. Especially glass shaped by hand using traditional methods can be challenging in the creation of some forms, which can limit the glass shaper in terms of design and application. However, it is obvious that three-dimensional glass printers, which have been researched and tested recently, will offer an alternative shaping method for those working in the field of glass in the future. As a result, there is a need for this research in order to analyze the stage of research and studies in the field of glass and to give direction to the development. This research aims to assess the usability of 3D printers in glass product design, considering evolving application methods. Data on 3D printers and their diversity were collected through observation, document analysis, academic sources, and studies. The technology's pros and cons were examined through product production processes and results of private companies experimenting with it. Findings show that while glass objects produced with 3D printers are still in prototype stages, they offer potential for easier production of complex forms compared to traditional methods, promising advancements in glass design.

Keywords: Glass, Three-dimensional printer, Glass product design, Glass forming techniques

Citation:
Bedel Özek, S. (2024). Üç boyutlu yazıcıların cam ürün tasarımında kullanılabilirliğin incelenmesi. *IDA: International Design and Art Journal*, 6(1),157-170.

Extended Abstract

Introduction: Technological developments have profoundly affected and changed the design field, as in many other fields, and new means of expression, production techniques, and materials have begun to be used. Recently, three-dimensional printer technologies have increased production speed and shaped difficult forms more easily. These three-dimensional printers, one of computer-aided production methods, find a place for themselves with various materials in the design fields and the industry. This technology, which uses many different materials such as polymers, metals, and ceramics, has recently emerged as a very effective tool in creating three-dimensional and concrete forms of glass objects. This new production method, which is still in the development stage, has a very important place in terms of facilitating some of the difficulties encountered in traditional production and accelerating production. In this study, existing three-dimensional glass printers are examined in line with the information obtained in the literature reviews and their usability in the fields of glass product design is examined and evaluated.

Purpose and scope: Recently, three-dimensional printing technologies have been utilized to increase production speed and to produce difficult-to-shape forms more easily. These technologies are accepted as a powerful detailing method, are used in many different sectors and greatly facilitate production processes. Therefore, in the world of three-dimensional printing, an area of intense competition, production is now realized using many different materials. This additive manufacturing method, mainly used for polymers, has also enabled the production of materials such as metals, ceramics and recently glass. This new production method, which is still in the process of development, has a very important place in terms of facilitating some of the difficulties encountered in traditional glass production and accelerating production. Therefore, research and studies are needed in order to fully utilize this potential in the field of glass product design and guide its development. Therefore, the aim of this study is to analyze the state of research on glass production with three-dimensional printers and to investigate the usability of this technology in glass product design. In this way, new possibilities in glass production can be explored and complex glass forms can be produced more easily and precisely. In addition, more efficient and innovative solutions can be developed in glass product design and the boundaries of creativity in design fields can be expanded.

Method: Three-dimensional printers are a technology that allows three-dimensional objects to be created in layers. It has been observed that this technology is still being developed in the production of glass objects, and the resulting glass objects are prototype products. Therefore, in order to fully utilize this potential, the need for this research has arisen in order to determine the stage of research and studies carried out in this field so far and to give direction to the development. In this study, which aims to examine the usability of three-dimensional printers in glass product design, a qualitative research method was used. A research and evaluation-based study method was applied within the framework of qualitative data collection methods such as observation and document analysis. In this context, a broad literature review was conducted at the beginning of the research; relevant written sources and studies were examined.

Findings and conclusion: Today, 3D printing technologies are seen as a combination of technology and design. This technology is no longer just a matter of mathematical calculations, software engineering or mechanical engineering; it is a joint product of mechanics, design and software. In this research, all three-dimensional printers published to date have been investigated and the examples found have been evaluated in order to obtain new information about material-based digital production in relation to the creation of new glass forms and designs. Three-dimensional printers, which are designed as a digital production method for industrial use, have recently entered the process of developing a sectoral R&D infrastructure by including glass material in the production process, and it has been observed that glass objects produced with three-dimensional printers are still in the prototype stage. Many engineers and companies working in this field have produced projects by working to develop this technology and continue their research. As a result of the research, it was seen that three-dimensional printers that produce glass have different working principles. Each company used different production methods as a result of the studies and trials they carried out within their own organization. However, it has been observed that all these methods vary in terms of usage areas and each has its own advantages and disadvantages. Thanks to the changing production methods, their products are quite different in size, structure, and appearance. While some printers produced micro-structured products, others produced forms with large and layered walls. Some of the products are transparent while others are opaque. However, although the speed of production and the outputs are insufficient, it is obvious that the future will be a technological glass-shaping method. Thanks to this developed infrastructure, it is seen that this technology can be adapted to the field of glass product design in the future. Moreover, it can be evaluated as an alternative shaping method and will be able to produce very successful results in the creation of forms that are difficult to shape by hand. For this reason, in line with the studies and research carried out, this three-dimensional printer technology will make great contributions to the field of design; beyond being just a production method, it will also offer a design philosophy and even a new way of life.

Keywords: Glass, Three-dimensional printer, Glass product design, Glass forming techniques

GİRİŞ

Teknolojideki gelişmeler birçok alanda olduğu gibi tasarım alanını da derinden etkileyerek değiştirmiş ve yeni ifade araçları, üretim teknikleri ve malzemelerin kullanılmasına olanak sağlamıştır. Aynı zamanda bu değişim, tasarımcıların yaratıcılığını genişletmiş ve yeni keşiflere öncülük etmiştir. Günümüzde üretim hızını artırmak ve zor formları daha kolay şekillendirmek için üç boyutlu yazıcı teknolojileri kullanılmaktadır. Bilgisayar destekli üretim yöntemlerinden biri olan bu üç boyutlu yazıcılar, endüstriyel alanda olduğu kadar tasarım sahalarında da çeşitli malzemelerle kendilerine yer bulmaktadır. Polimer, metal ve seramik gibi birçok farklı malzeme kullanılarak üretim yapılmasını sağlayan bu teknoloji, son yıllarda cam objelerin üç boyutlu ve somut formlarının oluşturulmasında oldukça etkili bir araç olarak görülmektedir. Özellikle üretimden önce tasarımın değerlendirilmesinde ve prototipin hazırlanmasında tercih edilen bu teknoloji sayesinde artık cam malzemeyi de kullanarak bilgisayar destekli ve dijital yöntemlerle üç boyutlu cam obje üretimi yapabilme çabasına girilmiştir. Bilim insanları da cam işlemciliğinin dezavantajlı yanlarının üç boyutlu yazıcı tekniğiyle aşılabileceğini araştırmışlardır. Çünkü cam yapımı, zorlukları olan bir zanaattır. Geleneksel olarak zanaatkârlık; alet, malzeme ve zanaatkârın becerileri arasındaki etkileşim olarak anlaşılır. Zanaatkâr, camı şekillendirme sırasında özel aletlerin ve kişisel becerilerin karmaşık bir etkileşimini koordine ederek kısa sürede malzemeye şekil verir. Buna karşılık dijital tasarım ortamları, cam alanındaki bireysel deneyim ve beceri gerektiren uzun üretim süreçlerini daha kısa sürede sonuçlandıracak hale getirir olmuştur. Üç boyutlu baskı, en geometrik karmaşık formların bile tasarımında ve üretiminde eşi benzeri görülmemiş bir özgürlük sağlamaktadır. Bu ikilem, zanaatkârlığın yalnızca yetenekli el işçiliği olarak anlaşıldığı fikrine dayanmaktadır. Ancak Ancak Richard Sennett *The Craftsman* adlı kitabında bu kavramı genişletir ve hem zanaatı hem de bilgisayar programcılığını kendi iyiliği için ya da bir işi iyi yapmak adına bir insan dürtüsü olarak ifade eder (Sennett'den aktaran Klein, 2018: 336). Nasıl ki tuvali boyarken fırça kullanılıyorsa ya da çamur veya cam şekillendirilirken araç ve gereçlerden faydalanılıyorsa, üç boyutlu yazıcılar da camı şekillendiren birer üretim araçları görevi görmektedir. Üç boyutlu yazıcılar tasarımcının ünvanını, yeteneğini ya da tasarım vizyonunu zayıflatmaz, aksine tasarımcının duygularına ve yaratmak istediği formu oluşturmasına yardımcı olacak bir araç rolünü üstlenir. Gelişim süreci devam eden bu yeni üretim şekli geleneksel üretimde karşılaşılabilecek bazı zorlukları kolaylaştırması ve üretimi hızlandırması açısından oldukça önemli bir yere sahiptir. Dolayısıyla bu çalışmanın, tasarımcıların ve üreticilerin cam malzemesiyle gerçekleştirdikleri tasarımlarda yeni yaklaşımlar denemelerine ve inovatif araçları kullanmalarına yardımcı olabileceği, ayrıca literatürdeki eksiklikleri gidererek araştırmacılara yeni çalışma alanları sunabileceği öngörülmektedir.

Bu bağlamda, çalışmanın amacı, gelişim aşamasındaki üç boyutlu cam yazıcıların ürün tasarımı alanında kullanılabilirliğinin detaylı bir şekilde incelenerek cam endüstrisindeki kullanım potansiyelini analiz etmek ve bu teknolojinin avantajlarını ve sınırlılıklarını belirlemektir. Çalışma kapsamında ise; ilk olarak geleneksel cam şekillendirme yöntemleriyle şekillenen tasarımlara yer verilmiştir. Daha sonra incelenen mevcut literatür, makale ve kaynaklar ışığında, cam malzemeyi kullanan üç boyutlu yazıcılar, uygulama çeşitliliklerine göre kategorize edilmiştir. Gelişim sürecindeki bu teknolojiyle camın nasıl şekillendirildiğine ve bu alanda faaliyet gösteren araştırmacıların da ortaya koyduğu örnek çalışmalara yer verilmiştir.

YÖNTEM








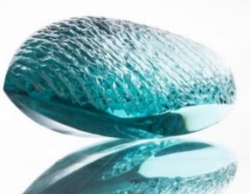
Üç boyutlu yazıcılar, üç boyutlu nesnelere katmanlar halinde oluşturulmasını sağlayan bir teknolojidir. Bu teknolojinin cam obje üretiminde henüz gelişim sürecinde olduğu ve ortaya çıkan cam nesnelere de birer prototip ürün oldukları gözlenmiştir. Dolayısıyla bu potansiyelin tam olarak değerlendirilmesi için bugüne dek bu alana yönelik yapılan araştırma ve çalışmaların ne aşamada olduğunu tespit etmek ve gelişime yön vermek açısından bu araştırmanın yapılması ihtiyacı doğmuştur. Üç boyutlu yazıcıların cam ürün tasarımında kullanılabilirliğini inceleme amacını taşıyan bu çalışmada nitel araştırma yöntemi kullanılmıştır. Nitel araştırma yöntemi “gözlem, görüşme ve doküman analizi gibi nitel veri toplama yöntemlerinin kullanıldığı, algıların ve olayların doğal ortamda gerçekçi ve bütüncül bir biçimde ortaya konmasına yönelik nitel bir sürecin izlendiği araştırma olarak tanımlanabilir” (Yıldırım & Şimşek, 2018: 41). Çalışma kapsamında da gözlem ve doküman analizi gibi nitel veri toplama yöntemleri çerçevesinde araştırma ve değerlendirme temelli bir çalışma yöntemi uygulanmıştır. Bu bağlamda; üç boyutlu yazıcılar hakkında bilgiler elde etmek amacıyla

akademik yazılı kaynaklar, internet kaynakları ve çalışmalar incelenmiştir. Üç boyutlu yazıcılar ve uygulama çeşitlilikleri hakkında bilgi literatür çalışmalarıyla elde edilmiştir. Üç boyutlu yazıcı ile cam ürün denemeleri yapan özel firmaların ürün üretim basamakları ve ortaya çıkan sonuçlar incelenerek teknolojinin avantajları ve dezavantajları hakkında bilgi edinilmiştir.

BULGULAR

Cam, esas olarak eşsiz optik şeffaflığı, üstün mekanik, kimyasal ve termal direnci ve ayrıca termal ve elektriksel yalıtım özellikleri nedeniyle, endüstride ve toplumda bilimsel araştırmalarda kullanılan en önemli yüksek performanslı malzemelerden biridir. Bulunuşundan itibaren endüstride olduğu kadar sanat ve tasarım alanında da önemli bir malzeme olan cam, yüksek sıcaklıklarda şekillendirilmektedir. Farklı ısılarda değişkenlik gösteren yapısı nedeniyle de biçimlendirme teknikleri açısından farklı kriterlere göre sınıflandırılmıştır. Dolayısıyla geleneksel cam şekillendirme yöntemleri dört ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar; fırında biçimlendirme yöntemleri, sıcak cam yöntemleri, açık alevde biçimlendirme ve soğuk cam biçimlendirme (Tablo 1). Ancak “cam şekillendirme yöntemleri tek başına kullanılabildiği gibi, farklı yöntemler peş peşe bir arada kullanılabilmektedir. Dolayısıyla ana bir yöntem sürecinin içinde araya giren fiziksel ve görsel farklılıklar yaratan teknikler de bulunmaktadır” (Küçükbiçmen, 2015: 24).

Tablo 1. Geleneksel cam şekillendirme yöntemlerine ait örnekler

Fırında Biçimlendirme Yöntemleri	 Kalıpta şekillendirme	 Chantal Royant
Sıcak Cam Yöntemleri	 Sıcak cam şekillendirme	 Lino Tagliapietra
Açık Alevde Biçimlendirme	 Alevle şekillendirme	 Shane Ferro
Soğuk Cam Biçimlendirme	 Soğuk cam şekillendirme	 Vladimir Klein

Üç Boyutlu Yazıcılar ve Uygulama Çeşitlilikleri

Son dönemlerde üretim hızını arttırmak ve şekillendirilmesi zor formları daha kolay üretebilmek amacıyla üç boyutlu yazıcı teknolojilerinden faydalandığı görülmektedir. Bu sayede, katmanlı üretim veya üç boyutlu baskı, malzeme biliminde güçlü bir detaylandırma yöntemi olarak kanıtlanmış ve artık rekabetin yoğun

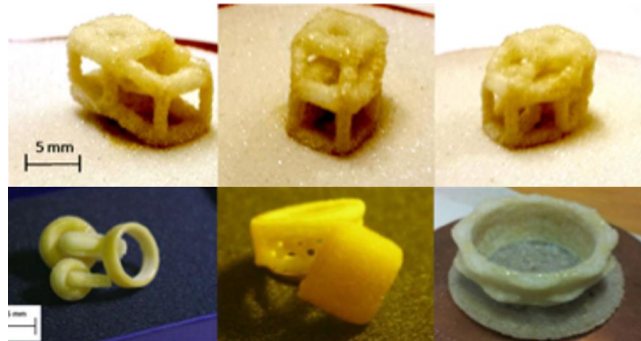
yaşandığı bir alan olan üç boyutlu yazıcı dünyasında birçok farklı malzeme kullanılarak üretim gerçekleştirilebilmektedir. Ağırlıklı olarak polimerler için kullanılan katmanlı imalat, metallere, seramiğe ve oldukça yakın zamanda da cam malzemeye kadar uzanmıştır.

Katmanlı üretim (AM) veya üç boyutlu baskı 30 yıldan fazla bir süre önce icat edilmiş ancak son on yılda hızlı prototiplemeden AM'nin endüstriyel uygulaması olarak tanımlanan hızlı üretime (RM) yayılmıştır. Bu değişim, gelişmiş makine ve malzeme geliştiren mühendisler ve bilim adamlarından, ileri düzeyde bilgi edinen ve yeni uygulamalar uygulayan tasarımcılara ve sanatçılara kadar disiplinler arası ortak bir çabayla sağlanmıştır (Lizardo, 2018: 19). Üç boyutlu baskı, 21. yüzyılın üretim devrimidir. Eser üretme, çoğaltma ve yayma yeteneği ile insanlık tarihini önemli ölçüde değiştirmiştir. Matbaanın bilgileri paylaşmasına, dağıtmasına ve arşivlemesine olanak sağlaması gibi, üç boyutlu baskı da internet üzerinden dijital tasarımlardan nesnelere paylaşılmasını, üretilmesini ve hatta tasarım hatalarının üretim aşamasından önce tespit edilerek giderilmesini mümkün kılmaktadır (Kotz vd., 2018a: 1). Camın üç boyutlu yazıcılar ile işlenebilmesi ise oldukça yakın bir zamana tarihlenmektedir. Günümüzde bu alanda çalışan birçok mühendis ve firma, araştırmalarını hala sürdürmekte ve teknolojiyi geliştirmek adına çalışmalar yaparak projeler üretmektedir. Yapılan araştırma sonucunda ise her firmanın kendi bünyesinde gerçekleştirdikleri çalışmalar ve denemeler sonucunda farklı üretim yöntemlerini kullandıkları gözlenmiştir. Şimdiye dek üç boyutlu yazıcılar ile camı şekillendirmede kullanılan bu yöntemler, üretimde kullanılan malzeme ve uygulama çeşitliliklerine göre dört ana grup altında toplanabilir. Bunlar;

1. Toz Malzemenin Sinterlenmesi: Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS), Lazer ile Ergitme (Selective Laser Melting – SLM)
2. Sıvı Malzemenin Lazer ile Kürlenmesi: Stereolitografi (Stereolithography-SLA), Mikro Stereolitografi (Micro Stereolithography), Dijital Işık İşlemi (Digital Light Processing- DLP)
3. Doğrudan Mürekkeple Yazma (Direct Ink Writing-DIW)
4. Katı Malzemenin Eritilerek Yığılması: Eriyik Yığıma Yöntemi (Fused Deposition Modeling- FDM) şeklindedir (Altunkaynak, 2020).

Toz Malzemenin Sinterlenmesi: Seçici Lazer Sinterleme (Selective Laser Sintering-SLS), Lazer ile Ergitme (Selective Laser Melting – SLM)

Cam, eşsiz optik mekanik, termal ve kimyasal stabilite gibi sayısız avantajlı özelliğe sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle cam bazlı malzemeler, üç boyutlu baskı alanında özel bir değer sağlama potansiyeline sahiptir. Yüksek erime sıcaklıklarının ve yüksek viskozitelerinin üstesinden gelmek için cam malzemelere bağlayıcı püskürtme yaklaşımları uygulanmıştır (Klein vd., 2015: 93). Ancak mürekkep püskürtmeli baskı, borosilikat cam tozlarının seçici lazer sinterlenmesi (SLS) veya soda-kireç cam tozunun SLM'si gibi yaklaşımlar şimdiye kadar sadece gözenekli beyaz ve şeffaf olmayan cam bileşenlere yol açmıştır (Görsel 1) (Kotz vd., 2018a: 1). Bu yöntemde basılan sinterlenmiş cam nesnelere ticari olarak mevcuttur, ancak bunlar son derece kırılmandır ve eksik yoğunlaştırmanın neden olduğu cam tozlarından kaynaklanan ışık saçılması nedeniyle opak görünmektedirler (Klein vd., 2015: 93).



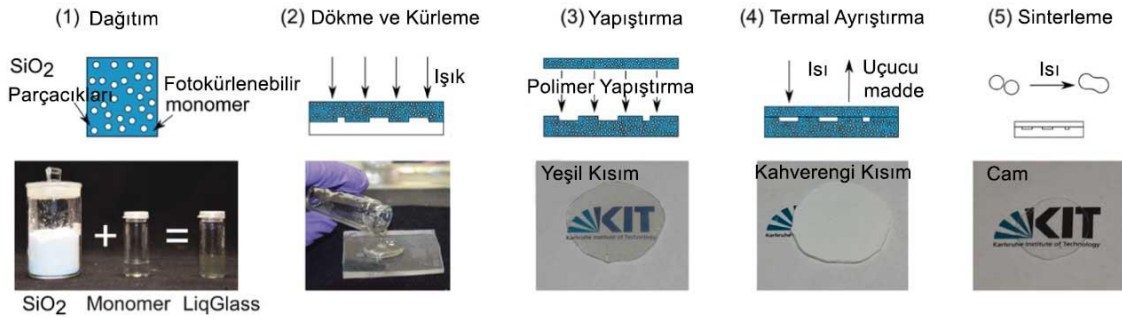
Görsel 1. SLM işlemi kullanılarak üretilen çeşitli nesnelere

Sinterlenmiş cam tozu ile üç boyutlu baskının ilk örnekleri, malzemeye değer verilen şeffaflık ve mekanik özelliklerden yoksundur, ancak daha düşük maliyetle karmaşık geometriye sahip bir cam üretim sürecini

sanayileştirmek için ciddi girişimleri temsil etmektedir. Son yıllarda cam baskı için yeni yöntemler ortaya çıkmıştır. Bu yeni yöntemler de mevcut tasarım ve ürünleri önemli ölçüde değiştirerek; geometrik karmaşıklığa, optik şeffaflığa ve mekanik mukavemetin güvenilirliğine sahip nesnelere yaratılmasına katkı sağlamıştır (Lizardo, 2018: 19).

Sıvı Malzemenin Lazer ile Kürlenmesi: Stereolitografi (Stereolithography-SLA), Mikro Stereolitografi (Micro Stereolithography), Dijital Işık Yöntemi (Digital Light Processing- DLP)

Almanya'nın Eggenstein-Leopoldshafen kentindeki Karlsruhe Teknoloji Enstitüsü'nden makine mühendisi Bastian Rapp ve ekibi, 2016 yılında güçlü ve saydam cam nesnelere üretebilen üç boyutlu baskı teknolojisi üzerinde çalışmalara başlamış ve ilk tekniklerini o dönemde geliştirmiştir. LiqGlass (Sıvı Cam) ismini verdikleri bu teknik, üç boyutlu yazıcılar ile karmaşık cam yapılar imal edilebilmesini mümkün kılmıştır. LiqGlass, yumuşak çoğaltma kalıpları kullanılarak yapılandırılabilen, termal ayırma ve sinterleme yoluyla cama dönüştürülebilen, ışıkla sertleşen amorf silika nanokompozittir. Teknik, stereolitografi adı verilen geleneksel bir üç boyutlu yazıcı yöntemini kullanmaktadır. Rapp, bu tekniğin modern üç boyutlu yazıcının önemli bir boşluğunu kapattığını dile getirmiştir. Bilim insanları bu tekniği geliştirmek için cam yapımında kullanılan silis parçacıklarından faydalanmışlardır. Bu parçacıklar 40 nanometre genişliğindeyken, standart bir insan saç telinden 2500 kat daha ince durumdadır. LiqGlass ismi verilen maddenin üretimi için silika nanoparçacıklar bir akrilik çözeltiye eklenmiştir. İmal edilen LiqGlass, üç boyutlu yazıcı materyali olarak kullanılmış ve ultraviyole ışınlarıyla akrilik cama benzer bir şekilde sertleştirilmiştir. Sertleştikten sonra plastik parçalar yaklaşık 1300°C sıcaklığa maruz kaldığında erirken, nano silis parçacıkları ise pürüzsüz şekilde birbirlerine kaynaşmıştır (Görsel 2). Sonuç olarak LiqGlass bileşeni, termal ayırma ve sinterleme yoluyla yoğun, yüksek kaliteli bir cama dönüştürülmüştür. Elde edilen bu mikro yapıdaki cam bileşeni, ticari olarak eritilmiş silika cam ile kimyasal ve fiziksel olarak aynıdır (Kotz vd., 2016: 4646).

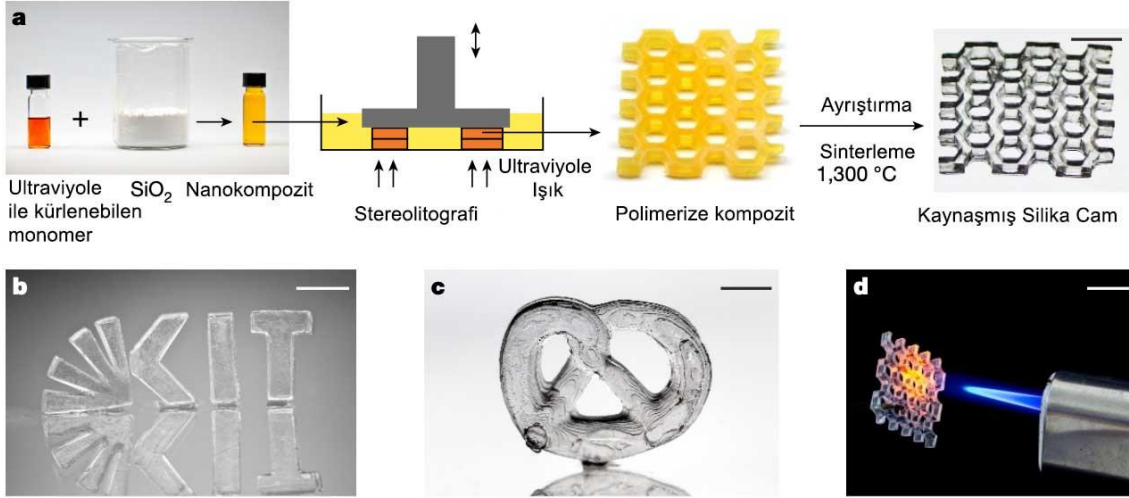


Görsel 2. Liqglass üretim sürecinin iş akışının şeması

“LiqGlass, temiz oda tesisleri veya tehlikeli kimyasallar gerektirmeden cam mikro yapıların düşük maliyetle prototiplenmesine yönelik bir adımdır. Tüm imalat süreci ise 61 saat içinde yapılabilmektedir” (Kotz vd., 2016: 4647). Bu yeni yöntem ile kamera lensleri gibi alanlarda kullanılacak kadar pürüzsüz ve berrak cam bileşenler üretilmektedir. Rapp, “akıllı telefonlar için minik lenslerin yanı sıra kimyasal reaksiyonların gerçekleştirilebileceği camdan yapılmış, kimyasal ve termal olarak dayanıklı mikro reaktörler üretebiliriz” demektedir. Geliştirilen yeni teknik, yüksek hızda veri iletimi için optik ve fotonik bileşenlerin oluşturulmasına da yardımcı olabilmektedir. Bu sayede üç boyutlu yazıcılar karmaşık cam yapılar imal edilebilmesini mümkün kılmaktadır.

Camın yapılandırılması zordur ve genellikle bir cam eriyiğini şekillendirmek için yüksek sıcaklıklar veya mikro yapıların aşındırılması için bazı tehlikeli kimyasallar gerektirmektedir (Glassomer, 2022). Ancak nanokompozitler, uygun maliyetli masaüstü stereolitografi yazıcılarında işlenebilir ve üç boyutlu cam bileşenlerin katman katman oluşturulmasına izin verir (Kotz vd., 2017: 338). Rapp ve ekibi bir sonraki araştırmalarında stereolitografi ve mikrostereolitografi kullanılarak üç boyutlu olarak basılabilen yeni silika nanokompozitleri geliştirmiştir. Elde edilen polimerik nanokompozitler, termal ayırma ve sinterleme yoluyla yüksek kaliteli erimiş silika cama dönüştürülmüştür (Görsel 3). Artık erimiş silika cam, stereolitografi baskısı kullanılarak yapılandırılabilirken, mikrostereolitografi kullanılarak da onlarca mikron çözünürlüğe ve birkaç nanometre pürüzlülüğe sahip yüzeyler basılabilir (Kotz vd., 2018a: 5). Ayrıca bazı metal tuzlarını

ekleyerek renkli cam baskılar alınabileceğini de keşfetmişlerdir. Örneğin Krom (III) nitrat $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ yeşil renkli cam, Vanadyum (III) klorür (VCl_3) mavi renkli bir cam olarak sonuçlanmıştır (Kotz vd., 2017: 339).



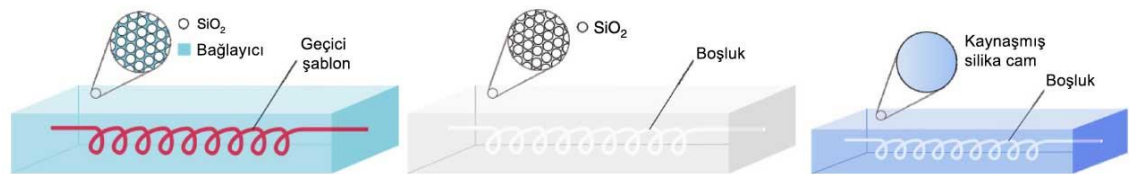
Görsel 3. (a) Erimiş silika camın üç boyutlu baskısı, (b-c) sinterlenmiş cam yapı örnekleri ve (d) baskılı erimiş silika camın yüksek termal direncinin gösterilmesi

Ekibin yaptıkları araştırmaların devamında ise “Glassomer” adı verdikleri sıvı ve katı bir nanokompozit geliştirmişler ve bu nanokompozitlerin de yaygın standart polimerler gibi yapılandırılabilirliğini göstermişlerdir. “Sıvı Glassomer (örneğin Glassomer L50), oda sıcaklığında çoğaltma veya stereolitografi üç boyutlu baskı ile yapılandırılabilir. Katı bir Glassomer ise delme, yontma, kazıma veya basitçe bir bıçakla oyma gibi klasik aşındırma yöntemleri kullanılarak yapılandırılabilir” (Glassomer, 2022). Glassomer işlendikten sonra $600\text{ }^\circ\text{C}$ 'de termal ayrıştırma yapılır ve daha sonra $1300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de sinterlenerek yüksek kaliteli erimiş silika cama dönüştürülür (Görsel 4). Elde edilen cam, ticari olarak eritilmiş silika ile aynı optik şeffaflığa ve pürüzsüz bir yüzeye sahiptir. Bu çalışma, yüksek performanslı erimiş silika cam bileşenlerini yüksek verimli üretim teknolojileri için erişilebilir hale getirmekte ve bilim ve endüstride sayısız optik, fotonik ve tıbbi uygulamayı mümkün kılmaktadır (Kotz vd., 2018b: 1).



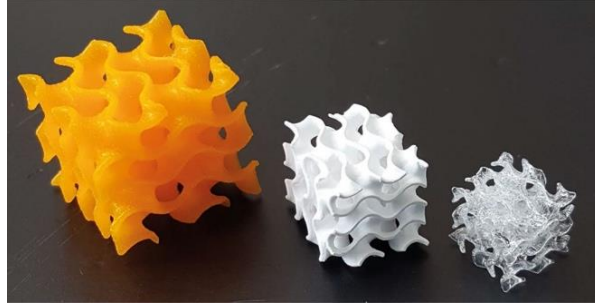
Görsel 4. Erimiş silika camın (katı glassomer) yontularak işlenmesi

Aynı ekibin bu teknoloji üzerine yaptığı son araştırmasında da yüksek hassasiyet ve üç boyutlu tasarım özgürlüğü ile erimiş silika camda içi boş mikro yapıların oluşturulması için bir yaklaşım sunmuşlar ve oda sıcaklığında erimiş silika bileşenlerini yapılandırmak için bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu işlemde, polimerik filamentler, amorf bir silika nanokompozit içine gömülür. Nanokompozit daha sonra ışığa maruz bırakılarak polimerize edilir. Polimerize edilmiş nanokompozit, termal ayırma ve sinterleme yoluyla erimiş silika cama dönüştürülür. Polimerik şablon, termal ayrılma işlemi sırasında çıkarılır ve uygun boşluklar sağlanır (Görsel 5) (Kotz vd., 2019: 3).



Görsel 5. Erimiş silika camda içi boş mikro yapıların imalatı

David G. Moore ve ekibi ise 2020 yılında yaptıkları bir araştırmada faz ayırıcı reçineler kullanılarak çok bileşenli camların üç boyutlu baskısını sunmuşlardır (Görsel 6) (Okumuş, 2022). Burada, bir masaüstü dijital ışık işleme (DLP) yazıcı kullanarak yüksek çözünürlüklü ve çok oksitli kimyasal bileşimlere sahip karmaşık şekilli camlar oluşturmak için hibrit sıvı reçinelerin faz ayırımına dayanan basit bir üç boyutlu yazdırma işlemini gerçekleştirmiştir (Moore vd., 2020: 212). DLP üç boyutlu yazıcıların çalışma prensibi SLA üç boyutlu yazıcı ile çok benzerdir. Ancak temel bir farkı ise baskı işlemi için kullanılan ışık kaynağıdır. “SLA üç boyutlu yazıcıda ışık kaynağı lazer iken DLP üç boyutlu yazıcıda ışık kaynağı dijital ışık projektörü kullanılmaktadır” (Dağ, 2020).

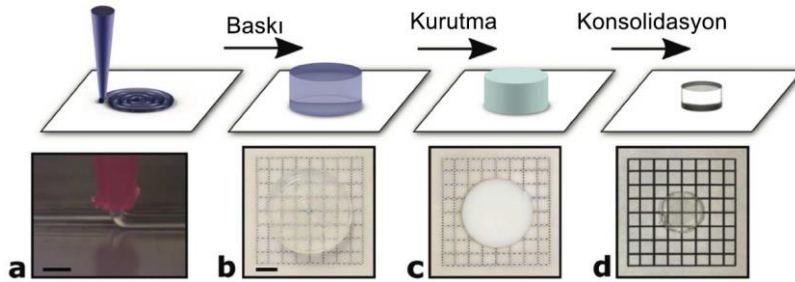


Görsel 6. Karmaşık şekilli bir nesnenin DLP üç boyutlu baskı sürecindeki farklı aşamaları

Bu çalışmada gösterilen üç boyutlu baskı platformu, geleneksel olarak el emeği ile elde edilen cam formun kontrolünü ve modern dijital üretim süreçlerinin sunduğu yüksek düzeydeki otomasyonu birleştirmeye yönelik bir adımdır. Sonucunda da bu üç boyutlu baskı platformunun farklı teknoloji, bilim ve sanat alanında yararlı olabileceği kaydedilmiştir (Moore vd., 2020: 212).

Doğrudan Mürekkeple Yazma (Direct Ink Writing- DIW)

Nguyen vd. (2017), yayınladıkları bir makalede, milimetre altı özelliklere sahip optik şeffaf cam yapıların üç boyutlu baskısı için iki parçalı bir süreç (şekillendirme ve sinterleme) kullanan doğrudan mürekkeple yazma (DIW) yöntemini geliştirdiklerini sunmuşlardır. Doğrudan mürekkeple yazma (DIW), eklemeli imalat (AM) yöntemiyle bilgisayar kontrollü üç boyutlu şekiller oluşturmaktadır (Görsel 7) (Hao vd., 2021: 665).



Görsel 7. Doğrudan mürekkeple yazma (DIW) yöntem ile üç boyutlu cam baskı işlemi

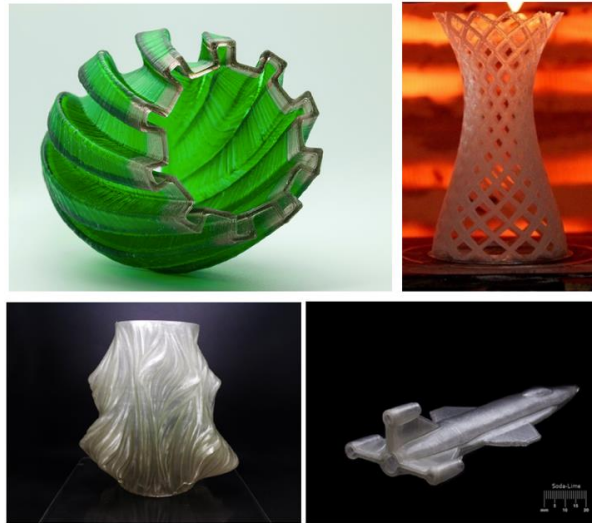
Süreç ilk olarak, istenen şekle sahip silika yeşil gövdeleri (gözenekli, düşük yoğunluklu yapılar) oluşturmak için kolloidal silika süspansiyonlarının DIW baskısına dayanır. Jelleşme, buharlaşma veya sıcaklığa bağlı faz değişimi yoluyla hızla katılan bu özel mürekkepler bir nozülde ekstrüde edilerek katman katman şekillenir. Bu işlemin önemli bir özelliği, baskılı camın belirli uygulamaları için en uygun mürekkep özelliklerini elde etmek için akma gerilimini ve kesme incelmelerini kontrol etme yeteneğidir. İkinci olarak, basılı yapılar kurutulur ve yeşil gövdenin tamamen yoğun, amorf, şeffaf katı bir yapıya sinterlenmesi için silikanın erime noktasının altındaki sıcaklıklara ısıtılır. Bu ısıtma işlemi üç aşamalı olarak gerçekleşir; öncelikle çözücüyü uzaklaştırmak için yeşil form, uygun koşullar altında (110 saat boyunca 100 °C’lik optimum kurutma programı ile) yapıyı bozmadan kurutulmalıdır. Çözücünün uzaklaştırılmasının ardından, kalan organik maddeleri de uzaklaştırmak için ısıtma işlemi ikinci aşaması uygulanır ve sıcaklık 600 °C’ye yükseltilir. Kurutma ve yanma işlemi sırasında, basılı yapı hacimsel olarak ≈ 43 oranında küçülerek yalnızca kimyasal olarak bağlı silika

tozundan oluşan yeşil bir gövde meydana gelir. Son olarak da bu yeşil gövde önceden ısıtılmış 1500°C'lik bir fırında 3 dakika yoğunlaştırılarak tamamen şeffaf bir cama dönüştürülür (Nguyen vd., 2017:3).

Katı Malzemenin Eritilerek Yığılması: Eriyik Yığıma Yöntemi (Fused Deposition Modeling- FDM)

Üç boyutlu yazıcılar işleyiş biçimi açısından çoğunlukla yığıma yöntemi olarak adlandırılan FDM (kaynaşmış biriktirme modellemesi) sistemini kullanmaktadır. Malzeme yığıma şeklinde çıktı veren bu üç boyutlu yazıcılar, sıvılaştırılmış ya da plastik hale getirilmiş malzemeyi yazıcı başlığındaki bir ekstruder yardımıyla katmanlar halinde inşa etmektedir (Özgüdoğdu, 2014: 6). Yakın zamandaki üç boyutlu cam baskı alanındaki gelişmeler de hem katı hem de erimiş besleme stoğu ile malzeme ekstrüzyonu gibi işlemleri içermektedir. Bazı üç boyutlu yazıcılar da bu yöntemi kullanarak eriyik haldeki camı katmanlar halinde yığarak inşa etmektedir. Bu yöntemi kullanarak üretim yapan şirketlerden birisi de İsraili Micron3DP'dir ve yüksek çözünürlüklü cam basan üç boyutlu yazıcıyı tanıtan ilk şirkettir. "Bu şirket, ince katman kalınlığına sahip ayrıntılı cam nesnelere oluşturmak için çubuk bazlı bir malzeme besleme stoğunu ve yüksek sıcaklık meme işlemini geliştirmiştir" (Lizardo, 2018: 20). Cam parçaların imalatında yeni bir yol geliştirmeye çalışan bu şirket 2015 yılının yaz aylarında erimiş camı üç boyutlu yazıcı ile şekillendirmenin bir yolunu bulduğunu duyurmuştur. Soda içerikli camı 850°C'de, borosilikat içerikli camı ise 1640°C'de baskılamayı başaran bu buluş, dünyadaki ilk örnektir. Micron 3DP şirketi bu buluşundan birkaç yıl sonra yüksek çözünürlüklü cam baskılayan üç boyutlu yazıcı haberi ile tekrar gündeme gelerek yazıcıyı dünyaya tanıtmıştır. FDM gibi bir işlem kullanan Micron3DP'nin bu üç boyutlu yazıcıları, 1000 derecenin üstünde sıcaklık mertebesine, 200x200x200 mm baskı hacmine ve yaklaşık 0,05 kg/saat'lik bir baskı hızına sahiptir. Ancak yazıcının "küçük filament boyutuna sahip olması, ışığın ürünün basılı duvarlarından geçerken dağılmasına ve ürünü daha yarı saydam hale getirmektedir" (Lizardo, 2018: 20).

Micron3DP şirketi 100 mikron kadar düşük bir tabaka kalınlığına sahip yüksek çözünürlüklü karmaşık cam parçaları basabilmektedir ve bu yeni teknolojiyi kullanmanın büyük potansiyelini görecek mühendislerden, tasarımcılardan, sanatçılardan ve diğer profesyonellerden gelen fikirlere de açık olduklarını dile getirmiştir (Mensley, 2017). Micron3DP Şirketi'nde üç boyutlu yazıcılar ile farklı formlarda cam çalışmalar üretilmiştir (Görsel 8).



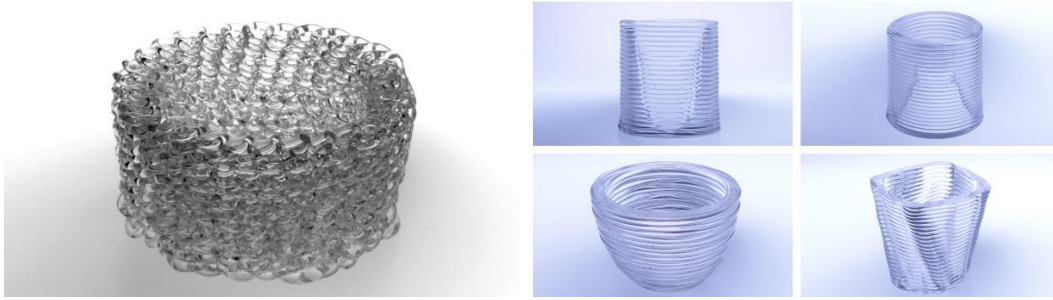
Görsel 8. Micron3dp Ltd, İsrail

Aynı zamanda ABD'nin en ünlü araştırma merkezlerinden olan Massachusetts Teknoloji Enstitüsü (Massachusetts Institute of Technology)'nde geliştirilen yeni bir teknik sayesinde üç boyutlu yazıcılarda plastik yerine cam hammadde kullanılabilir (Al Jazeera, 2015). MIT Medya Laboratuvarı'ndaki Mediated Matter grubu, Makine Mühendisliği Bölümü, MIT Cam Laboratuvarı ve Wyss Enstitüsü arasındaki iş birliğiyle, G3DP adlı yepyeni bir üç boyutlu yazıcı geliştirilmiştir. 2014'te geliştirilmiş ve 2015'te rapor edilmiş olan G3DP, erimiş malzeme stoğunu kullanır ve ısıtılmış bir nozülde çok daha büyük filamentleri ekstrüde etmesiyle de daha şeffaflık sağlayan bir yöntem sunar. Cam baskı yapan bu üç boyutlu yazıcının platformu, 2,2 kg/saat biriktirme hızına, 250x250x300mm'lik hazne boyutlarına (Lizardo, 2018: 20) ve çift

ısıtmalı oda konseptine sahiptir. Üst oda bir fırın kısmı görevi görürken, alt oda, yapıları tavlama görevi görmektedir. Fırın kısmı yaklaşık 1038°C (1900°F) sıcaklıkta çalışmaktadır. Alüminyum oksit, zirkon oksit ve silisyum dioksit hammaddelerinin karışımından oluşan cam bileşeni eritilerek nozülde geçirir. Aynı zamanda bu cihaz, bir seferde tek bir mimari parça oluşturmak için yeterli malzemeyi depolama kapasitesine de sahiptir. Cam kaynağı için kullanılan bu özel bileşim, nispeten düşük yumuşama sıcaklığına ve tavlama noktalarına sahip olduğundan geniş bir çalışma aralığı sağlamaktadır. Bu tür bir cam bileşeni sanatsal cam üfleme alanında kolaylıklar sağladığı kadar üç boyutlu yazıcı kullanımında da avantajlar sağlamaktadır (Brun vd., 2017: 4). Erimiş cam bir ağızlıktan akarak cam objeyi oluşturmaktadır.

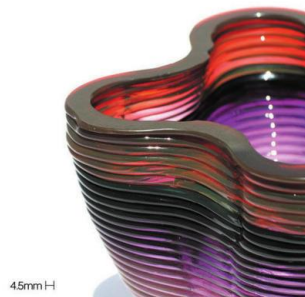
Proje, asırlık cam araçları ve sayısız potansiyel uygulamaya sahip yeni cam yapılar üreten teknolojilerle modern teknolojileri sentezlemektedir. Ancak; artan inşaat hacmi, daha büyük bir rezervuar, daha hızlı ve daha doğru baskı ve gerekli servisler arasında daha uzun çalışma süreleri ile endüstriyel ve mimari uygulamaların ölçeğini işlemek için sistem yeniden ele alınmış ve G3DP2 tasarlanmıştır. Yazıcı, termal olarak kontrol edilen üç bölgeden oluşur: erimiş camı sıvı tutmak için 1090°C’de tutan rezervuara, 800°C’de çalışan memeye ve 480°C’de tutulan yapı odasına sahiptir. Sistem yine diğer tüm FDM (kaynaşmış biriktirme modellemesi) üç boyutlu yazıcıları gibi çalışmaktadır.

G3DP2, saatte 5 kg’ın üzerinde çıktı alabilmektedir. Hareket kontrolü geleneksel X, Y ve Z hareketini ve Z ekseninde tam dönüş olmak üzere dört eksen kapsamaktadır, ancak bu hareketin kullanımını geliştirebilmek için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir (3ders, 2019). MIT Glass Lab’da üç boyutlu yazıcılar ile farklı formlarda cam çalışmalar üretilmiştir (Görsel 9).



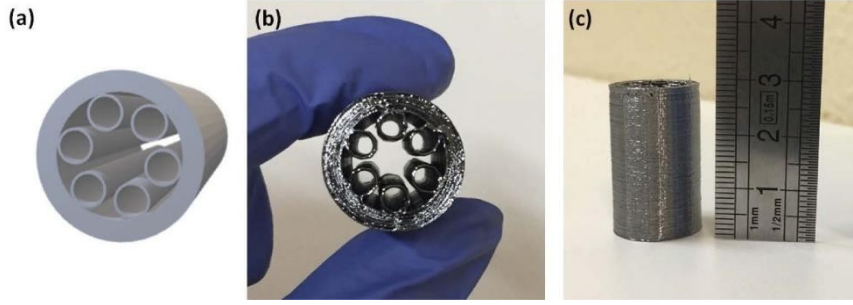
Görsel 9. MIT Glass Lab, ABD

Ekibin çalışma hedeflerinden biri de üretime renkli cam ilave ederek baskılı cam yapıların optik ve estetik özelliklerini zenginleştirmektir. Yapılan ön testler, aynı cam formun üzerinde birden çok farklı renklerin katmanlar halinde basılabildiğini göstermiştir (Görsel 10) (Klein vd., 2015: 100).



Görsel 10. MIT Glass Lab, ABD

Bir diğer araştırma da katmanlı üretim doğrultusunda kalkojenit cam çubukların eritilerek içi boş form oluşturulması esasına dayanmaktadır (Görsel 11). Bu yöntemde plastik filamentlerle yaygın olarak kullanılan bir üç boyutlu yazıcı, yapılandırılmış fiber optik preformlar oluşturmak amacıyla kalkojenit cam çubukları kabul edecek şekilde modifiye edilmiştir (Carreffe vd., 2021: 199).



Görsel 11. Kalkojenit mikro yapılı bir optik fiberin (MOF) 3b yazıcı ile üretimi

Üç boyutlu baskıya uygun, düşük cam geçiş sıcaklığı (T_g) gösteren $Te_{20}As_{30}Se_{50}$ (TAS) kalkojenit cam kullanılmıştır ve kalkojenit camlar uygun hammaddelerle ve belli yöntemlerle önceden hazırlanmıştır. TAS kalkojenit camın geçiş sıcaklığı $137\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu düşük T_g sayesinde, $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında 103-102 Pascal-Saniyelik (Pa.s) bir viskozite elde edilir ve bu erimiş filamentasyon imalatı (FFF/FDM) için mükemmel bir kıvamdır. Bu tür eklemeli üretim yaklaşımı, karmaşık tasarımlara sahip preformların, yüksek derecede tekrarlanabilirlik ve geometri doğruluğu ile birkaç saat içinde tek bir adımda üretilmesine izin vermektedir (Carcreff, vd. 2021: 198).

SONUÇ

Günümüzde üç boyutlu baskı teknolojileri, teknoloji ve tasarımı bir araya getiren bir kombinasyon olarak görülmektedir. Bu teknoloji artık sadece matematiksel hesaplamalar, yazılım mühendisliği veya makine mühendisliği ile ilgili bir iş değildir; aynı zamanda mekanik, tasarım ve yazılımın ortak bir ürünüdür. Bu çalışmada, yeni cam formları ve tasarımlarının oluşturulmasıyla ilgili olarak malzemeye dayalı dijital üretim hakkında yeni bilgiler elde etmek amacıyla bugüne kadar yayınlanan tüm üç boyutlu yazıcılar araştırılmış ve bulunan örnekler ele alınarak değerlendirilmiştir. Endüstriyel kullanıma yönelik dijital bir üretim yöntemi olarak tasarlanmış olan üç boyutlu yazıcılar, son yıllarda cam malzemeyi de üretim sürecine dahil ederek sektörel bir Ar-Ge alt yapısı geliştirme sürecine girdiği ve üç boyutlu yazıcılarla üretilen cam nesnelerin de henüz prototip aşamasında olduğu gözlenmiştir. Bu alanda çalışan birçok mühendis ve firma, bu teknolojiyi geliştirmek adına çalışmalar yaparak projeler üretmişler ve araştırmalarını sürdürmeye de devam etmektedirler.

Yapılan araştırma sonucunda cam üretimi yapan üç boyutlu yazıcıların kendi içinde farklı çalışma prensiplerine sahip oldukları görülmüştür. Her firma, kendi bünyesinde gerçekleştirdiği çalışmalar ve denemeler sonucunda farklı üretim yöntemlerini kullanmıştır. Üç boyutlu baskı teknolojileri ile karmaşık cam yapıları imal etmek için kullanılan bu yöntemler üretimde kullanılan malzeme ve üretim şekline göre; toz malzemenin sinterlenmesi, sıvı malzemenin lazer ile kürlenmesi, doğrudan mürekkeple yazma ve katı malzemenin eritilerek yığılması gibi dört ana grup altında toplanmıştır. Bununla birlikte, tüm bu yöntemlerin de kullanım alanları bakımından değişkenlik gösterdiği ve her birinin kendi içinde avantajları ve dezavantajlarının bulunduğu gözlenmiştir. Değişen üretim yöntemleri sayesinde ortaya konan ürünler de boyut, yapı ve görünüş bakımından birbirinden oldukça farklıdır. Kimi yazıcı mikro yapıda ürün çıkartırken, kimisi büyük ve katmanlı duvarları olan formlar çıkartmıştır. Çıkan ürünlerin bazıları saydam yapıya sahipken bazıları ise opak yapıdadır.

Her çalışma prensibinin sonucunda cam üretimi gerçekleştirilse de ortaya çıkan ürünler arasında, tasarım alanında kullanım açısından farklılık oluşmaktadır. Yığılma yöntemi üretim biçiminin daha rahat olması açısından bir avantajken, detaylı bir yapıya sahip cam formların üretiminde sınırlı kalmaktadır. Diğer sinterleme yöntemlerinde ise her ne kadar detaylı formların kolay üretilebildiği görülsede çıkan cam formlar ya mikro yapıda ya da kırılğan ve opak yapıdadırlar. Dolayısıyla bu yöntemlerle elde edilen cam formların kimilerinin mikro yapıları, kimilerinin de kaba yapıları nedeniyle pek çok uygulamaya yatkın durumda olmadıkları ve cam ürün tasarımı oluşturmada yetersiz kaldıkları görülmektedir. Ancak her ne kadar üretimdeki hızı ve ortaya koyduğu çıktılar yetersiz kalsa da geleceğin teknolojik bir cam şekillendirme yöntemi

olacağı aşikârdır. Bu geliştirilen altyapı sayesinde, gelecek zamanda bu teknolojinin cam ürün tasarımı alanına adapte edilebileceği görülmektedir. Dahası alternatif bir şekillendirme yöntemi olarak değerlendirilerek elle şekillendirilmesi zor olan formların oluşturulmasında oldukça başarılı sonuçlar ortaya koyabilecektir. Bu nedenle yapılan çalışmalar ve araştırmalar doğrultusunda bu üç boyutlu yazıcı teknolojisi, cam tasarım alanına büyük katkılar sağlayarak; sadece bir üretim yöntemi olmanın ötesinde, bir tasarım felsefesi ve hatta yeni bir yaşam biçimi de sunacaktır. Aynı zamanda araştırma sonuçlarının da bu alana yönelik yapılan araştırmalara ve çalışmalara yön vermesi ve üç boyutlu cam yazıcı kullanımının artmasına katkı sağlaması beklenmektedir.

Authors' Contributions

There is a single author in this paper who contributed 100%.

Competing Interests

There is no potential conflict of interest.

Ethics Committee Declaration

Ethics committee approval is not required.

REFERENCES

- Altunkaynak, D. (2020). *A eksen 3 boyutlu yazıcı tasarımı ve uygulaması* [Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi].
- Brun, P.-T., Inamura, C., Lizardo, D., Franchin, G., Stern, M., Houk, P., & Oxman, N. (2017). The molten glass sewing machine. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 375(2093), 20160156. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0156>
- Carcreff, J., Chevire, F., Galdo, E., Lebullenger, R., Gautier, A., Adam, J. L., Coq, D. L., Brilland, L., Chahal, R., Renversez, G., & Troles, J. (2021). Mid-infrared hollow core fiber drawn from a 3d printed chalcogenide glass preform. *Optical Materials Express*, 11(1), 198-209.
- Hao, L., Tang, D., Sun, T., Xiong, W., Feng, Z., Evans, K. E., & Li, Y. (2021). Direct ink writing of mineral materials: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8(12), 665-685. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40684-020-00222-6>
- Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J. C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M., & Oxman, N. (2015). Additive manufacturing of optically transparent glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 92-105. <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2015.0021>
- Klein, T. (2018). Augmented fauna and glass mutations: A dialogue between material and technique in glassblowing and 3d printing. *Leonardo*, 51(4), 336-342. <https://direct.mit.edu/leon/article-abstract/51/4/336/46402/Augmented-Fauna-and-Glass-Mutations-A-Dialogue?redirectedFrom=fulltext>
- Kotz, F., Plewa, K., Bauer, W., Schneider, N., Keller, N., Nargang, T., Helmer, D., Sachsenheimer, K., Schäfer, M., Worgull, M., Greiner, C., Richter, C., & Rapp, B. E. (2016). Liquid glass: A facile soft replication method for structuring glass. *Adv. Mater*, 28, 4646-4650. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201506089>
- Kotz, F., Arnold, K., Bauer, W., Schild, D., Keller, N., Sachsenheimer, K., Nargang, T. M., Richter, C., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2017). Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature*, 544, 337-339. <https://www.nature.com/articles/nature22061>
- Kotz, F., Arnold, K., Risch, P., & Rapp, B. E. (2018a). Next-generation 3D printing of glass: The emergence of enabling materials, *Proc. SPIE 10804, Advanced Manufacturing Technologies for Micro- and Nanosystems in Security and Defence*, 108040I, 1-6. <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/10544/2291565/Next-generation-3D-printing-of-glass--The-emergence-of/10.1117/12.2291565.short?SSO=1>
- Kotz, F., Schneider, N., Striegel, A., Wolfschläger, A., Keller, N., Worgull, M., Bauer, W., Schild, D., Milich, M., Greiner, C., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2018b). Glassomer-processing fused silica glass like a polymer, *Advanced Materials*, 30(22), 1707100, 1-5. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201707100>

- Kotz, F., Risch, P., Arnold, K., Sevim, S., Puigmartí-Luis, J., Quick, A., Thiel, M., Hrynevich, A., Dalton, P. D., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2019). Fabrication of arbitrary three-dimensional suspended hollow microstructures in transparent fused silica glass. *Nature Communications*, 10, 1439. <https://www.nature.com/articles/s41467-019-09497-z>
- Küçükbiçmen, E. (2015). *Cam şekillendirme yöntemleri ve kişisel yorumlar* [Yayımlanmamış Sanatta Yeterlik Tezi, Anadolu Üniversitesi].
- Lizardo, D. (2018). *Printing a glass ecology* [Masters of Science in Media Arts and Sciences, Massachusetts Institute of Technology].
- Moore, D. G., Barbera, L., Masania, K., & Studart, A. R. (2020). Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins. *Nature Materials*, 19, 212-217. <https://www.nature.com/articles/s41563-019-0525-y>
- Nguyen, D. T., Meyers, C., Yee, T. D., Dudukovic, N. A., Destino, J. F., Zhu, C., Duoss, E. B., Baumann, T. F., Suratwala, T., Smay, J. E., & Dylla-Spears, R. (2017). 3d-printed transparent glass. *Advanced Materials*, 29(26). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adma.201770191>
- Özgündoğdu, A. F. (2014). Seramik üretiminde çağdaş bir biçimlendirme yöntemi olarak üç boyutlu yazıcılar. 8. *Uluslararası Eskişehir Pişmiş Toprak Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, s. 203. <http://pismistoprak.tepebasi.bel.tr/bildiriler/bildiri8.pdf>
- Al Jazeera. (2015, 22 Ağustos). *Üç boyutlu yazıcıda cam baskısı dönemi*. Al Jazeera. <http://www.aljazeera.com.tr/haber/uc-boyutlu-yazicida-cam-baskisi-donemi> (23.11.2022).
- 3ders. (2019, 3 Ocak). *MIT upgraded their glass 3D printer: G3DP2*. 3ders. <https://www.3ders.org/articles/20190103-mit-upgraded-their-glass-3d-printer-g3dp2.html> (10.01.2023).
- Dağ, E. (2020, 20 Şubat). *Reçineli 3d yazıcı teknolojisiyle üretim*. 3D3 Teknoloji. <https://3d3teknoloji.com/blog/recineli-3d-yazici-teknolojisiyle-uretim/> (23.12.2022).
- Okumuş, U. (t.y.). *3D cam baskı*. 3d Print Dünyası. <https://3dprintdunyasi.com/3d-cam-baski/> (07.01.2023).
- Glassomer. (t.y.) *Revolutionary Glass Production*. Glassomer. <https://www.glassomer.com/index.php/technology> (21.04.2022).
- Mensley, M. (2017, 14 Mart). *Micron 3dp installs its first high-resolution glass 3d printer*. All3dp. <https://all3dp.com/micron3dp-installs-its-first-high-resolution-glass-3d-printer/> (15.12.2022).
- Yıldırım, A., Şimşek, H. (2018). *Sosyal bilimlerde nitel araştırma yöntemleri* (11. Baskı). Seçkin Yayıncılık.

Görsel Kaynakçası

- Tablo 1a:** Picuki. (t.y.). *Kalıpta şekillendirme*. Picuki. <https://www.picuki.com/media/2278455119636769986> (18.12.2022).
- Tablo 1b:** Cam Ocağı. (t.y.). *Chantal Royant*. Cam Ocağı. <https://www.camocagi.org/eserler/sallie-portnoy/> (05.06.2022).
- Tablo 1c:** Everything Neat. (2012, 20 Şubat). *Photographing Glass Blowing*. Fotoğraf: Marion McCristall. Everything Neat. <https://everythingneat.wordpress.com/2012/02/20/photographing-glass-blowing/> (06.06.2022).
- Tablo 1d:** Micaela Van Zwoll. (t.y.). *Lino Tagliapietra*. Micaela Van Zwoll. <https://www.micaela.com/dialogue/2016/12/14/lino-tagliapietra-master-glass-artist> (05.06.2022).
- Tablo 1e:** North Lands Creative Glass. (2013, 24 January). *Lamp working*. North Lands Creative Glass. <https://northlandscreativeglass.wordpress.com/2013/01/24/glass-skills-classes/lamp-working/> (06.06.2022).
- Tablo 1f:** Cam Ocağı. (t.y.). *Shane Ferro*. Cam Ocağı. <https://www.camocagi.org/eserler/shane-ferro/> (05.06.2022).
- Tablo 1g:** Çağlan, U. T. (2015, 21 Ocak). *Soğuk Cam Şekillendirme*. Behance. <https://www.behance.net/gallery/22930173/Soğuk-Cam-Sekillendirme-Cold-Working-with-Glass> (05.06.2022).
- Tablo 1h:** Cam Ocağı. (t.y.). *Vladimir Klein*. Cam Ocağı. <https://www.camocagi.org/eserler/vladimir-klein/> (05.06.2022).
- Görsel 1:** Fateri, M., & Gebhardt, A. (2015). Selective laser melting of soda-lime glass powder. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 12(1), 53-61.

- Görsel 2:** Kotz, F., Plewa, K., Bauer, W., Schneider, N., Keller, N., Nargang, T., Helmer, D., Sachsenheimer, K., Schäfer, M., Worgull, M., Greiner, C., Richter, C., & Rapp, B. E. (2016). Liquid glass: A facile soft replication method for structuring glass. *Adv. Mater.* 28, 4646-4650.
- Görsel 3:** Kotz, F., Arnold, K., Bauer, W., Schild, D., Keller, N., Sachsenheimer, K., Nargang, T. M., Richter, C., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2017). Three-dimensional printing of transparent fused silica glass. *Nature*, 544, 337-339.
- Görsel 4:** Kotz, F., Schneider, N., Striegel, A., Wolfschläger, A., Keller, N., Worgull, M., Bauer, W., Schild, D., Milich, M., Greiner, C., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2018). Glassomer—processing fused silica glass like a polymer. *Advanced Science News*, 30(22).
- Görsel 5:** Kotz, F., Risch, P., Arnold, K., Sevim, S., Puigmartí-Luis, J., Quick, A., Thiel, M., Hrynevich, A., Dalton, P. D., Helmer, D., & Rapp, B. E. (2019). Fabrication of arbitrary three-dimensional suspended hollow microstructures in transparent fused silica glass. *Nature Communications*, 10, 1439.
- Görsel 6:** Moore, D. G., Barbera, L., Masania, K., & Studart, A. R. (2020). Three-dimensional printing of multicomponent glasses using phase-separating resins. *Nature Materials*, 19, 212-217.
- Görsel 7:** Nguyen, D. T., Meyers, C., Yee, T. D., Dudukovic, N. A., Destino, J. F., Zhu, C., Duoss, E. B., Baumann, T. F., Suratwala, T., Smay, J. E., & Dylla-Spears, R. (2017). 3d-printed transparent glass. *Advanced Materials*, 29(26).
- Görsel 8:** Micron3dp. (t.y.). *3d Printer Hot End*. Micron3dp. [http://www.micron3dp.com/gallery/#iLightbox\[One\]/9](http://www.micron3dp.com/gallery/#iLightbox[One]/9) (23.12.2021).
- Görsel 9:** The Kid Should See This (TKSST). (t.y.). *3D printing with 1900F molten glass – G3DP at MIT*. TKSST. <https://thekidshouldseethis.com/post/3d-printing-with-1900f-molten-glass-g3dp-at-mit> (18.12.2021).
- Görsel 10:** Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S., Weaver, J. C., Houk, P., Colombo, P., Yang, M., & Oxman, N. (2015). Additive manufacturing of optically transparent glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 92-105. <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2015.0021>
- Görsel 11:** Carcreff, J., Cheviré, F., Galdo, E., Lebullenger, R., Gautier, A., Adam, J. L., Coq, D. L., Brilland, L., Chahal, R., Renversez, G., & Troles, J. (2021). Mid-infrared hollow core fiber drawn from a 3d printed chalcogenide glass preform. *Optical Materials Express*, 11(1), 198-209.

Author's Biography

Serap Bedel Özek completed her undergraduate education in Anadolu University, Faculty of Fine Arts, Glass Department in 2010. She graduated from the Anadolu University Fine Arts Institute in MSc Programme in 2017 and Mimar Sinan University Ceramics and Glass department in proficiency in Art Program in 2023. She started to work as a research assistant at Ondokuz Mayıs University in 2014 and still continues. As one of the young representatives of the interest focused on glass art, she creates a unity with intricate fictions by using the molten plastic structure of glass.