yedi
SANAT, TASARIM VE BİLİM DERGİSİ
JOURNAL OF ART, DESIGN & SCIENCE

**Araştırma Makalesi**
Research Article

**KIŞ 2023/SAYI 29**
WINTER 2023/ISSUE 29

Türkel, E., Çalışkan Güneş, P., Aslan, F. ve Zorkun Çağlayan, N. H. (2023). Harç yığma tekniğiyle çalışan seramik yazıcılarda kullanılabilecek eritici katkılı bünye tasarımları. *yedi: Sanat, Tasarım ve Bilim Dergisi*, 29, 01-12. doi: 10.17484/yedi.1098981

# Harç Yığma Tekniğiyle Çalışan Seramik Yazıcılarda Kullanılabilecek Eritici Katkılı Bünye Tasarımları

## Constitutional Studies That Can Be Used in Three Dimensional Ceramic Printers Working with Fusion Deposition Modelling Technique

Efe Türkel, *Seramik ve Cam Tasarımı Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi*
Pınar Çalışkan Güneş, *Seramik ve Cam Tasarımı Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi*
Fatih Aslan
Nazlı H. Zorkun Çağlayan

**Özet**

Üç boyutlu yazıcı teknolojisi gıdadan sağlık sektörüne, savunma sanayiinden mimariye varacak kadar geniş bir yelpaze içinde farklı malzeme türleriyle gelişimini hızla sürdürmektedir. Yazıcıların sanat tasarım disiplinlerinin çoğunda kullanılmaya başlanmasıyla yenilikçi örnek ve teknikler ortaya çıkmıştır. Seramik malzeme de bu yenilikçi yaklaşımla üç boyutlu yazıcılarda kullanılan malzemeler arasına girmiştir.

Bu çalışma, TÜBİTAK 1002 projesi olarak yapılmış ve TÜBİTAK-MAM tarafından onaylanmış olan "Harç Yığma Tekniği İle Çalışan Üç Boyutlu Seramik Yazıcılarda Kullanılabilecek Bünye Araştırmaları" başlıklı projenin bir parçası olarak gerçekleştirilmiştir.

Harç yığma tekniğiyle çalışan seramik yazıcılar, son on yılda kullanıcı ilgisinin artmasıyla da paralel olarak teknik ve yapısal olarak gelişim göstermektedir. Bu yazıcılarda kullanılan çamurlar gerek piyasadan hazır olarak satın alınabilen çamurların belirli yoğunluklarda hazırlanmasıyla, gerekse farklı hammadde ve killerle oluşturulan yeni bünyelerin hazırlanmasıyla da gerçekleştirilebilir.

Çalışmada ulaşılmak istenen bilimsel hedef; yerel hammaddelerle üç boyutlu yazıcılarda kullanılmak üzere, düşük derecelerde pekişebilen seramik çamurları geliştirmek, seramik sanayinde şekillendirme aşamasında kullanılan yan ürünlere bağlı kalmaksızın ürün geliştirerek alana yönelik maliyetleri azaltmak ve bu çamurların fiziki yapılarına yönelik geliştirme önerilerini sunmaktır. Araştırmada nicel ve deneysel yöntem kullanılarak üç boyutlu seramik yazıcılar için özel hazırlanmış bünye reçeteleri oluşturulmuş ve üç boyutlu formlar üzerinde uygulanmıştır.

**Anahtar Sözcükler:** Seramik, üç boyutlu yazıcılar, harç yığma tekniği, tasarım.

**Akademik disipin(ler)/alan(lar):** Seramik ve cam tasarımı.

**Abstract**

Three-dimensional printer technology continues to progress by leaps and bounds with different types of materials in a wide range from the food to health sector, from the defense industry to architecture. Innovative examples and techniques have emerged with the use of printers in most of the art and design disciplines. Along this innovative approach, ceramic material has become one of the materials used in three-dimensional printers.

This study was carried out as a TÜBİTAK 1002 project and as a part of the project titled "Constitutional Studies That Can Be Used in Three Dimensional Ceramic Printers Working with Fusion Deposition Modelling Technique" approved by TÜBİTAK-MAM.

Fused Deposition Modeling printers in ceramics have been developing technically and structurally in parallel with the increase in user interest in the last ten years. The slurry used in these printers can also be made by preparing the clays in certain densities that can be bought from the market or by preparing new bodies created with different raw materials and clays.

Scientific goals to be reached in the study; to develop ceramic slurries that can be consolidated at low degrees to be used in three-dimensional printers with local raw materials, to reduce the costs for the area by developing products regardless of the by-products used in the shaping process in the ceramic industry and to offer development suggestions that can be made in the structure of these clays. In the research, body recipes specially prepared for three-dimensional ceramic printers were created using quantitative and experimental methods and applied on three-dimensional forms.

**Keywords:** Ceramic, three dimensional printers, fused deposition modeling, design.

**Academicaldisciplines/fields:** Ceramics and glass design.

- **Sorumlu Yazar:** Efe Türkel, Seramik ve Cam Tasarımı Bölümü, Güzel Sanatlar Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi.
- **Adres:** Dokuz Eylül Üniversitesi, Tınaztepe Yerleşkesi, Adatepe Mah. Doğuş Cad. No: 09, 35390 Buca, İzmir.
- **e-posta:** efe.turkel@deu.edu.tr
- **ORCID:** 0000-0002-0042-954X
- **Çevrimiçi yayın tarihi:** 02.08.2022 **Geliş tarihi:** 05.04.2022 / **Kabul tarihi:** 06.07.2022
- **doi:** 10.17484/yedi.1098981

## 1. Giriş

TÜBİTAK'ın desteklediği bu çalışmada, niteliği ve verimliliği yüksek fakat düşük maliyetli seramik ürünleri, standart üretim yöntemleriyle şekillendirilmesi güç, farklı özelliklere sahip seramik yazıcı kullanımına uygun çamur reçetelerinin tasarımları ve uygulamaları üzerine çalışılmıştır. Çalışmanın başlığında yer alan bünye tasarımı kavramı, farklı kil ve hammaddelerin bir araya getirilmesiyle yeni bir seramik çamuru oluşturmaya karşılık gelmektedir. Çalışma şu anki haliyle bireysel kullanıcılar için veya küçük ve orta ölçekli işletmelerde üretim için uygun olmakla beraber seramik sektöründeki büyük ölçekte yapılacak uygulamalar için de prototip uygulamalara yönelik örnek teşkil edecek düzeydedir.

Üç boyutlu yazıcılarda seramik çamurunun kullanımına dair çalışmalar 1990'lı yıllarda başlamıştır. Harç yığma tekniğiyle çalışan yazıcılar günümüzde gıda, mimarlık, arkeoloji, savunma sanayii gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. Açık kaynak bilgiler ile üretilebilecek yazıcıların donanım özelliklerine dair çalışmalar geniş bir araştırma ve uygulama alanı oluşturabileceği gibi bu durum aynı zamanda bu yazıcılarda kullanılabilecek çamur tipleri için de geçerlidir. Bu yazıcılarla ilgili ulusal ve uluslararası araştırma ve yayınlar yapılmış olmakla birlikte literatürde yazıcılarda kullanılacak çamur tiplerine yönelik çalışmalar kısıtlıdır. Ülkemizde seramik üç boyutlu yazıcıların sanat ve tasarım alanında kullanımıyla ilgili çalışan ve yayın yapanlar arasında Ezgi Hakan, Emre Can, Feyza Özgündoğdu, Sanver Özgüven yer almaktadır. Bu çalışma literatürde yer alan diğer çalışmalara ek olarak seramik yazıcılara uygun çamur bünyeleri geliştirmek üzere alana katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmanın ana amacı bahsi geçen yazıcılarda kullanılmak üzere düşük derecede pekişebilen baz çamur reçeteleri oluşturmak ve bunları uygulamaktır. Bununla beraber üç boyutlu seramik yazıcıların alana katkıları, bu tip cihazlarla kullanılabilecek hammaddelere yönelik araştırmalar, çevreye duyarlı ürünlerin nasıl oluşturulabileceği gibi konular da çalışma içinde yer alacaktır.

## 2. Üç Boyutlu Seramik Yazıcılar

İlk olarak piyasaya sürüldüğü dönemlerde kişisel kullanıcılar için ulaşılmaz fiyatlarda olan üç boyutlu yazıcılar bir University of Bath girişimi olan ve Dr. Adrian Bowyer tarafından bilgileri açık kaynak olarak paylaşılan RepRap yazıcı üretme projesi ile tüm dünyada yaygınlaşmıştır (Earl, 2017). İlk üç boyutlu seramik çamuru basabilen yazıcı Belçikalı tasarım stüdyosu Unfold tarafından RepRap projesi temel alınarak geliştirilmiştir (Mühür, 2016, s. 89).

İlk yıllarında prototip üretimleri için kullanılan bu yazıcılar, günümüzde ise nihai ürün de üretmenin mümkün olduğu bir süreç geçirmektedirler. Bunu en basit şekilde eklemeli üretim (*additive manufacturing*) tekniği ile gerçekleştirir. Eklemeli üretim basit olarak tasarlanan veya taranan dijital modelin üretiminde hammaddenin katmanlar halinde yığılarak veya toz haldeyken sertleştirilerek somut hale gelmesiyle gerçekleşir. Üç boyutlu seramik yazıcılar da bu eklemeli üretim tekniğinde seramik hammaddelerinin kullanılmasıyla modellerin üretildiği cihazlardır (Özgündoğdu, 2014, s. 215).

**Tablo 1.**Seramik üç boyutlu yazıcı teknolojileri (Chen vd., 2019, s. 662).

| Besleme tipi | Seramik 3 boyutlu yazıcı teknolojisi | Kısaltmalar |
|---|---|---|
| Sulu Harç (*Slurry-based*) | Stereolitografi (*Stereolitography*) | SL |
| | Dijital ışık işleme (*Digital light processing*) | DLP |
| | İki fotonlu polimerizasyon (*Two-photon polymerisation*) | TPP |
| | Inkjet Baskı (*Inkjet printing*) | IJP |
| | Direkt mürekkep baskı (*Direct ink writing*) | DIW |
| Toz (*Powder-based*) | Üç boyutlu baskı (*Three-dimensional printing*) | 3DP |
| | Seçmeli lazerle sinterleme (*Selective laser sintering*) | SLS |
| | Seçmeli lazerle eritme (*Selective laser melting*) | SLM |
| Yığınsal Katı (*Bulk solid-based*) | Katmanlı nesne işleme (*Laminated object manufacturing*) | LOM |
| | Harç yığarak modelleme (*Fused deposition modeling*) | FDM |

Üç boyutlu yazıcılar incelendiğinde hepsinin aynı çalışma prensibine sahip olmadığı görülür. Genellikle katmanlı üretim yapan üç boyutlu yazıcılarda, kürleme teknikleri de farklılık gösterir. Seçmeli lazerle sinterleme ve harç yığarak modelleme teknolojileri genelde maliyet ve üretim pratikleri göz önünde bulundurulduğunda, en çok tercih edilen yöntemlerdir (Al-Maliki & Al-Maliki, 2015, s. 161). Genel kapsamda yazıcı tiplerindeki bu farklılıklar seramik üç boyutlu yazıcılarda da görülmektedir. Seramik malzeme kullanarak üretim yapabilen üç boyutlu yazıcı teknolojileri üç ana başlık altında toplanabilir. Bunlar, sulu harç, toz ve yığınsal katı olarak malzeme temeline göre ayrılmakla beraber kendi içlerinde de malzemenin işleniş biçimine göre farklılık gösterirler (Tablo 1). Çalışmada besleme tipi yığınsal katı olan, *harç yığarak modelleme* tekniği kullanılmıştır.

## 3. Yığınsal Katı Beslemeli Yazıcılar

Yığınsal katı beslemeli yazıcılar belki de günümüzde en yaygın olan yazıcı tipleridir. Katmanlı nesne işleme ve harç yığarak modelleme teknolojileri bu başlık altında toplanırlar. Katmanlı nesne işleme (LOM) kâğıt, seramik, metal, plastik gibi materyallerin şeritler halinde katmanlı olarak üst üste eklenerek üretimin gerçekleştirildiği hızlı üretim tekniklerinden biridir (Cui vd., 2002, s. 1300). Bu yöntemde üretilecek parçalar, ham halde eklenen katmanların eş zamanlı olarak ısıtılması ve sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Parça bir şerit üzerine yayılmış hammaddelerin ısıtılıp, kesilerek birbirine yapıştırılmasıyla bütünleşik bir form halini alır. Sinterleme işlemi harici olarak da gerçekleştirilebilir (Chen vd., 2019, s. 677). Harç yığarak modelleme yönteminde ise (FDM) parça, hammaddenin şeritler halinde süreklilik arz edecek şekilde üst üste bindirilmesiyle oluşturulur. Endüstriyel uygulamalarda FDM yöntemi diğer uygulamalara nazaran daha yaygındır. Bunun başlıca sebepleri, yazıcı aygıtının daha düşük maliyetli oluşu ve çok farklı kalitede ve tipte ucuz filamentlerin bulunabilmesidir. Bu tip yazıcılar, otomotivden ilaç sanayiine kadar pek çok alanda kullanılmaktadır (Heidari-Rarani vd., 2019, s. 1).

FDM teknolojisinde kullanılan yazıcıların filamentleri farklı bileşenlerden oluşabileceği gibi, hammaddenin kendisinden de yararlanılabilir. Örneğin tıp alanında protez üretiminde kullanılan hammaddeler, polimerler ve %40-45 oranında toz seramik hammaddelerinin karışımıyla oluşturulan filamentlerden oluşturulabilmektedir (Mohd Pu'ad vd., 2020, s. 229).

Bu çalışmada kullanılan yazıcı FDM teknolojisiyle çalışmaktadır. Yazıcı proje grubu tarafından internette açık kaynak olarak paylaşılan bilgiler aracılığıyla bir kısmı satın alınan bir kısmı da ekip tarafından uyarlanan veya tasarlanan parçaların toplanmasıyla oluşturulmuştur.

Kullanıcıların da yapmış olduğu geliştirmeleri bu proje dâhilinde paylaşmasıyla günümüzde bu tip açık kaynaklı bilgileri kullanarak farklı yazıcı tipleri de tasarlayabilmek mümkündür. Öyle ki kullanıcı bu kaynaklar aracılığıyla kendi üretimine yönelik özel geliştirmeler de yapabilir.

## 4. Bünye Araştırmaları ve Uygulamalar

- Eritici katkılı çamur reçeteleri oluşturarak düşük sıcaklıkta yapılacak pişirimlerde sırlı veya pekişmiş bünyeler oluşturarak enerji verimliliğine sahip çevre dostu ürünler tasarlamak,
- Çalışma için hazırlanan çamurların üç boyutlu yazıcılarda viskozite, yavaş kuruma gibi fiziksel dezavantajlarının giderilerek sanatsal ve endüstriyel alanda seramik üretiminin farklı disiplinlerinde de kullanılabilmesini sağlamak,
- Harç yığma tekniğiyle çalışacak üç boyutlu seramik yazıcılarla bireysel kullanıcıdan, işletmelere kadar genişleyen yapıda üretim verimliliğine sahip, iş gücü düşük, alçı, polimer gibi yardımcı fakat yüksek çevre kirliliği oluşturan şekillendirmeye yardımcı malzemelerin kullanılmadığı, endüstri problemlerine alternatif çözümler sunabilen ürünler tasarlamak,
- Uygulama kökenli sorunlara alternatif üretim yöntemi sunmak ve bu üretime yönelik seramik bünye (çamur) tasarımları geliştirmek,
- Dünyada büyük ölçekli üretimde önemli bir pazar hacmine sahip olan ülkemiz seramik sektörüne orta ve küçük ölçekli üreticileri de dâhil ederek hem istihdamı sağlamak hem iç pazara hem de dış pazara alternatif ürünler geliştirebilmenin yollarını aramak.
- Ülkemizde teknoloji alanında üç boyutlu yazıcıları yaygınlaştırmak için alana ait literatüre katkı yapmak.

Amaçlar doğrultusunda hedefleri ise;

- Anadolu topraklarından elde edilen yerel hammaddeleri kullanarak üç boyutlu yazıcılarda kullanılabilir, standart üretim tekniklerinde kullanılan çamurlar haricinde enerji ve zaman verimliliği sağlayacak, düşük derecelerde pekişebilen, yeni seramik bünyeler geliştirmek,
- Seramik endüstrisinde kullanılan alçı, polimer gibi insan sağlığına zararlı malzemelere bağlı kalmaksızın ürün geliştirerek alana yönelik maliyetleri azaltacak, çevreci, yarı saydam cam ürünlere alternatif, ışık geçirgenliği olan ürünler veya sofra-süs eşyası üretiminde kullanılabilecek camsı özellikler sergileyen ürünler üretmek,
- Şekillendirme sonrası işi biten silikon veya alçı kalıpların stoklanma veya atık olarak çevreye zarar verme gibi problemlerini ortadan kaldırmak,
- Bilgisayar destekli tasarımda kullanılan yazılımların sağladığı imkânlar ile yeni formlar üretebilmek, el işçiliği ile yapılamayacak düzeyde karmaşık formların üretimini sağlamak,
- Seri üretim sistemine de uygulanabilecek olan bu yazıcı tipleri için öncelikli hedef yerel hammaddelerle yapılacak küçük ölçekli üretimlerde nitelikli sonuca ulaşabilmek, bu yazıcı ve bünye tiplerinin büyük ölçekli üretime yönelik nasıl kurgulanabileceği ve bunun yaratacağı imkânlarla ülkemizin uluslararası pazara yönelik yenilikçi tasarımlar ve ürünler üretebilmesi üzerine odaklanmak,
- Kalıplı üretime alternatif bir seri üretim şekli olarak görülen katmanlı üretim teknolojisi ile kalıplı üretimde yaşanan kalıptan çıkarma, iğne deliği, pelteleşme, kalıp lekeleri gibi zorlukları aşmak ve üretim aşamalarını kısaltmak olarak sıralayabiliriz.

Yukarıda aktarılan amaçlar ve hedefler kapsamında yapılan çalışma tamamen özgün reçetelerin uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Uygulamalarda bazı reçeteler şekillendirme, kurutma veya pişirim aşamalarında başarılı olmadığı için çalışma kapsamında değerlendirilmeyecektir.

Bu araştırmada çalışılan seramik bünyelerin deneyleri yazıcıda basılan silindirik formlardan oluşmaktadır. Deney formunun silindirik olmasının sebepleri model aşamalarında katmanların birbiri üzerine yığılması esnasında çamurun şekillendirilebilir oluşunu ve statiğini gözlemlemek, kuruma ve pişme esnasında oluşabilecek deformasyonları incelemek, katmanlar arasında herhangi bir gözeneklilik olup olmadığını gözlemlemektir.

## 5. Yöntem

Çalışma kapsamında üç boyutlu seramik yazıcı kullanımına uygun düşük derecelerde pekişebilen çamur reçeteleri hazırlanmıştır. Uygun reçetelerin araştırılması ve denemelerin oluşturulması aşamasında üçlü ve dörtlü diyagram yöntemi kullanılmıştır. Deneyler toplamda 7 adet üçlü diyagram, 5 adet dörtlü diyagramdan oluşmaktadır. Üçlü diyagramlarda oluşturulan deneyler piramit 1, piramit 2, piramit 3 şeklinde artan değerlerde numaralandırılırken, dörtlü diyagramlarda oluşturulan deneyler diyagram 1, diyagram 2 şeklinde artan değerlerde numaralandırılmıştır.

### 5.1. Üçlü Diyagram Yöntemi

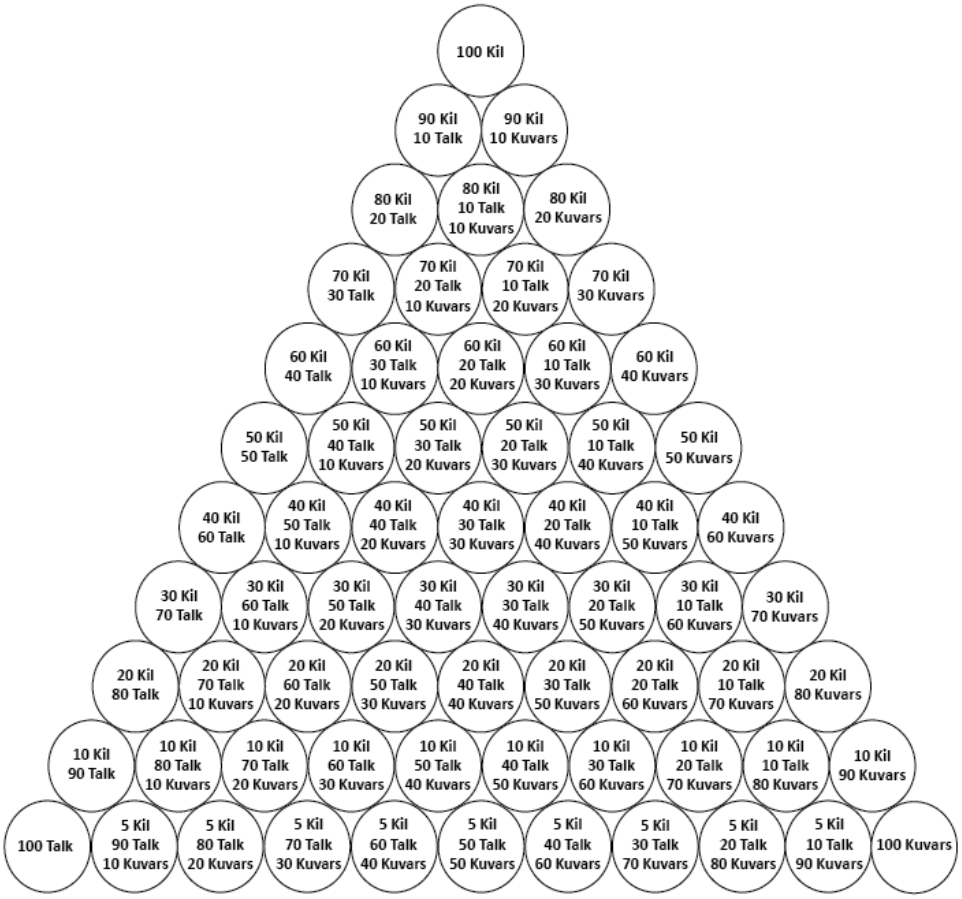
Bu yöntemde, oluşturulan üçgen diyagramın her bir köşesi kullanılmak istenilen hammaddelerle tanımlanır. Diyagramın üzerinde bu hammaddelerin farklı yüzdelerdeki birleşiminden oluşan çok sayıda reçete oluşturulur. Bu reçeteler hazırlanarak pişirilir ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek istenilen nitelikte bünyeler oluşturulabilir. Bu şekilde değişik hammaddeler kullanılarak farklı nitelik ve özellikte çamur reçeteleri hazırlanabilir. Üçlü diyagramda her nokta farklı hammadde oranlarını göstermekte olup, bu noktaların okunması saat yelkovanı yönünde aralarında 120 derecelik açı ile belirlenir (Taçyıldız, 2018, s. 50).

### 5.2. Dörtlü Diyagram Yöntemi

Bu yöntemde, oluşturulan dörtlü diyagramın her bir köşesi kullanılmak istenilen hammaddelerle tanımlanır. Diyagramın üzerinde bu hammaddelerin farklı yüzdelerdeki birleşiminden oluşan çok sayıda reçete oluşturulur. Bu reçeteler hazırlanarak pişirilir ve elde edilen sonuçlar değerlendirilerek istenilen nitelikte bünyeler hazırlanabilir. Bu şekilde değişik hammaddeler kullanılarak farklı nitelik ve özellikte çamur reçeteleri oluşturulabilir. Dörtlü diyagramda her nokta farklı hammadde oranlarını göstermekte olup, bu noktaların okunması ilgili noktadan karenin her bir kenarına dikme çıkılarak belirlenir (Taçyıldız, 2018, s. 51).

Aşağıda üçlü ve dörtlü diyagrama yönelik bir örnek tablo yer almaktadır (bkz. Şekil 1 ve Şekil 2). Üçlü diyagramda kil-talk ve kuvars üçlüsünden oluşturulmuş karışımlar görülmektedir. Diyagramın sol tarafı

kil ve talk, sağ tarafı ise kil ve kuvars karışımından oluşmaktadır. Yukarıdan aşağı doğru inildikçe kil oranı 10 birim azalmakta, talk ve kuvars miktarı ise 10 birim artmaktadır. Orta bölümde yer alan kısımda ise 3. bir hammadde karışıma eklenmektedir. Üç hammaddeden oluşan bölüme bakıldığında soldan sağa doğru ilerlendiğinde kuvars miktarının 10 birim artış gösterdiği görülmektedir (bkz. Şekil 1).




**Şekil 1.** Üçlü diyagram örneği (Hopper, 1984, s. 71).

Bu diyagram üzerinden aşağıda yer alan hammaddelerle üçlü karışımlar hazırlanmıştır.

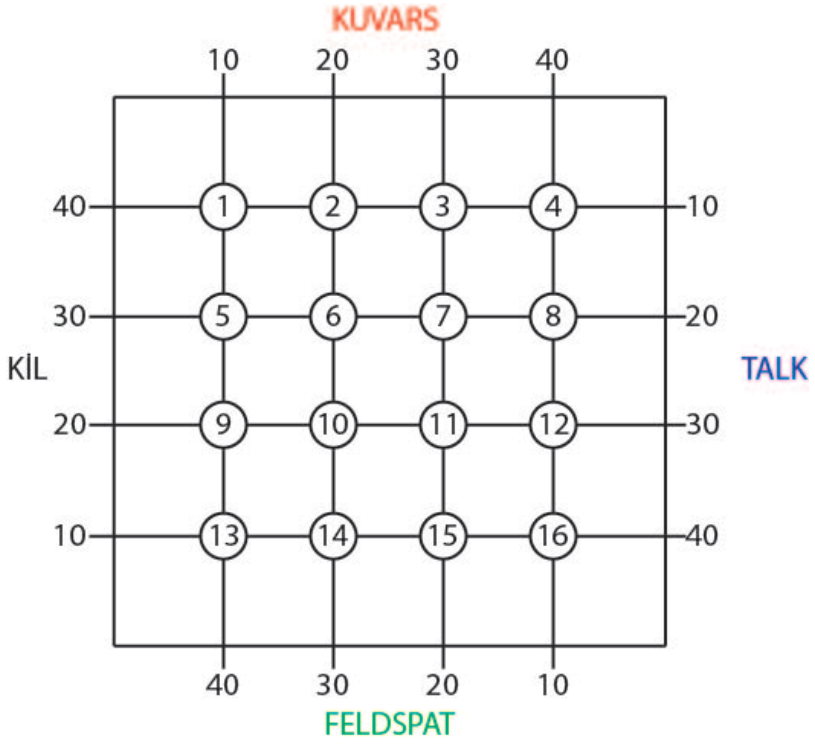
- Kil-talk-boraks
- Kil-kuvars-soda
- Kaolin-talk-vollastonit
- Frit-talk-kuvars
- Kil-boraks-kuvars
- Kaolin- boraks -kuvars
- Kil-kuvars-magnezit karışımları hazırlanmıştır.

Dörtlü diyagram örneğinde ise kuvars-kil-feldspat ve talk dörtlüsünden oluşturulmuş karışımlar görülmektedir. Bu diyagramda her bir numara farklı bir deney reçetesini temsil etmektedir. Numaralı kısımlardan karenin dört kenarına dikey hatlar çizilerek karışım yüzdelerinin hangi miktarlardan oluştuğu anlaşılabilir. Örneğin 7 no'lu deney %30 kuvars, %30 kil, %20 feldspat ve %20 talktan meydana gelmektedir (bkz. Şekil 2).

Aynı diyagram üzerinden aşağıda yer alan hammaddelerle dörtlü karışımlar hazırlanmıştır.

- Kil-kaolin-kuvars-dolomit
- Kil-kuvars-feldspat-mermer
- Kil-talk-frit-vollastonit
- Kil- kuvars-talk-bentonit

- Talk-vollastonit- bentonit-kaolin.




**Şekil 2.** Dörtlü diyagram örneği (Hopper, 1984, s. 75).

### 5.3. Deneyde Kullanılan Hammaddeler

Ülkemizdeki kil yatakları düşük dereceli bünyeler geliştirmeye yöneliktir. Porselen ve *stoneware* (pekişmiş çini) gibi yüksek derece bünye üretimi ancak Doğu Asya ve Kuzey Avrupa ülkelerinde yer alan kil yatakları sayesinde üretilebilmektedir. Dolayısıyla bu tür üretimleri yerel hammaddeler ve killer ile üretebilmek adına, mevcut kil örneklerine yöntem kısmında özellikleri açıklanan çeşitli eritici hammaddeler ilave edilerek geleneksel üretim yöntemlerinde kullanılamayan fakat porselen ve stoneware'in aksine düşük derecelerde pekişen, katmanlı üretime uygun, düşük maliyetli bünyeler hazırlanması amaçlanmıştır. Hammadde araştırmaları yapılırken yerel firmaları desteklemek amacıyla özellikle ülkemiz rezervlerinde hali hazırda üretilen hammaddeler seçilerek reçeteler oluşturulmuştur.
Diyagramlarda plastikliği sağlamak amacıyla yerel killer, kaolinler ve bentonitler kullanılmıştır. Bu hammaddelerin belli başlı özellikleri aşağıda başlıklar halinde açıklanmıştır.
**Kil:** Plastik seramik hammaddesi denildiğinde ilk akla gelen killerdir. Killer plastik özelliğe sahi, ince taneli, su ile kolaylıkla yoğurulabilen, şekil verilebilen ve bu şekillerini uzun süre koruyabilen hammaddelerdir (Genç, 2013, s. 28).

**Kaolin:** Kaolinin oluştuğu ana kayaç kompleks alümina silikatlardan oluşur (Arcasoy ve Başkırkan, 2020, s. 40). Kaolinin içeriği genelde kaya parçaları feldspat ve kuvars ile karışık haldedir bu yüzden kaolin kullanılmadan önce çeşitli metotlarla bu mineral taneciklinden arındırılmalı ve saflaştırılmalıdır (Rhodes, 1957, s. 20). Kaolin, ergime noktası 1800°C'nin üzerinde olan ve bu özelliği nedeniyle yüksek dereceye dayanıklı malzeme üretiminde kullanılan bir hammaddedir. Plastiklik özelliğinin killere oranla düşük olması nedeniyle şekillendirmek zordur. Refrakter özelliğinin yüksek oluşu pekişmeyi olumsuz yönde etkiler. Tüm bu dez avantajları nedeniyle kaolin tek başına kullanılmaz (Rhodes, 1957, s. 20). Ancak diğer hammaddelerle birlikte kullanıldığında çamurun şekillendirilebilme kabiliyetini arttırır, sır hazırlamada taneciklerin havada yüzmesini sağlayarak sırın çökmesini engeller ve bu sayede uygulama kolaylığı sağlar.

**Bentonit:** Bentonit, alüminyum ve magnezyumca zengin montmorillonit grubunda yer alan plastiklik özelliği yüksek killerdir. Bünyenin plastiklik özelliğini arttırmak için kullanılır. Bünyesinde demir oksit bulunduran ham haldeki bentonitin açık krem- beyaz olan rengi, 1000°C ve üzerindeki pişirimlerde, bünyenin kırmızı olmasını sağlar. Ayrıca bentonitin içinde yer alan alkalilerin ve demir oksidin fazla olması nedeniyle katıldıkları bünyeler 1200-1300°C sıcaklık arasındaki pişirimlerde camlaşır ve erir. Suda çözünme özelliği yoktur. Bünyesine çok miktarda su emerek hacimce büyüme gösterir (Genç, 2013, s. 22).

Camsı yapıyı oluşturabilmek amacıyla kuvars, pişme derecesini düşürebilmek amacıyla çeşitli eritici malzemeler reçeteye eklenecektir. Bu hammaddeler aşağıdaki gibidir;

**Kuvars:** Yeryüzünün bilinen kısmının %25'ini oluşturan kuvars, oksijenden sonra dünyada en çok rastlanan silisyumun bir bileşimidir. Kimyasal formülü $SiO_2$'dir (Arcasoy ve Başkırkan., 2020, s. 45). Kuvars camın üretilmesinde kullanılan hammaddenin aslını oluşturur. Seramik sanayiinde kuvars silika tozu şeklinde seramik çamuru ve sırlarında kullanılır (Genç, 2013, s. 30).

**Vollastonit:** Doğal, lifli bir kalsiyum silikat olan vollastonit, sır ve çamurlarda eritici özelliği için kullanılır. Pişirim sırasında gaz çıkışı olmadığından vollastonit ile hazırlanan çamurlar sırlı tek pişirim için çok uygundur. Sır ve çamurda pişme sıcaklık derecesini düşürmek için de kullanılır. Pişme küçülmesini azaltır. Suda çözünme özelliği yoktur (Genç, 2013, s. 41).

**Mermer:** Kimyasal formülü $CaCO_3$ olan mermer, kireç taşı ve dolomitik kireç taşlarının ısı ve basınç ile değişerek kristalleşmesi sonucunda oluşan metaformik bir kayaçtır. Seramik çamur, sır, astar ve boyalarında kullanılır. Seramik bünyelerde ince öğütülmüş biçimde kullanılan mermerin içindeki karbondioksit 900-1000°C arasında bünyeden uzaklaşır. Geriye kalan CaO, 1050°C sıcaklıktan sonra bünye içindeki diğer maddelerle reaksiyona girerek pekişmeyi başlatır. Genelde tüm pişirim sıcaklıklarında ergitici olarak kullanılır. Pişirimlerde tek başına herhangi bir erime göstermez. Suda çözünme özelliği yoktur (Genç, 2013, s. 32-33).

**Dolomit:** Kalsiyum ve magnezyum karbonatın doğadaki bileşik haline dolomit denir. Endüstride dolomitten ateş tuğlaları üretilir (Arcasoy ve Başkırkan'dan aktaran, Genç 2013, s. 25). Ayrıca bazı çamur ve sır bünyelerinde de kullanılır. Dolomitin erime sıcaklığı çok yüksektir. Pişirimlerde camsılaşma ve erime göstermez. Suda çözünme özelliği yoktur (Genç, 2013, s. 25-26).

**Feldspat:** Feldspatlar, içinde alkali bulunduran alümina silikat mineralleridir. Feldspatlar kimyasal bileşimlerinde yer alan sodyum, potasyum, lityum ve kalsiyum içeriğine ve bu oksitlerin oranlarına göre adlandırılırlar. Ergime dereceleri kil ve kaolinlere oranla daha düşüktür. Seramik bünyelerde içerdiği alkali miktarına ve türüne bağlı olarak ergimeyi sağlarlar (Taçyıldız, 2018, s. 17). Lityumun çok pahalı olması ve nefelin siyenitin ülkemizin doğal kaynaklarında mevcut olmaması sebebiyle, yapılan çalışmalarda sodyum feldspat (albit) ve potasyum feldspat (ortoklas) kullanılmıştır.

**Firit:** Öğütülmüş seramik hammaddelerinin bir reçeteye göre bir araya getirilip, özel firit fırınlarında yüksek sıcaklıklarda eritilmesi ve bu akkor halindeki eriyiğin suya dökülerek aniden soğutulmasıyla elde edilen ürüne boncuk firit (sırça) adı verilir. Ayrıca firit eritilerek cama dönüştürülmüş suda çözünmez silikatlar olarak tanımlanır (Genç, 2013, s. 26). Genellikle kullanıldıkları bünyenin ergime sıcaklıklarını düşürme özellikleri vardır.

**Talk:** Kimyasal formülü $3MgO.\ 4SiO_2.\ H_2O$ olan bu hammaddenin, yaprak, kepek veya toz şeklinde bulunan tipine talk, kütlesel haline sabuntaşı (*speckstein*) denir. Özellikle porselen sanayiinde ergitici olarak kullanılır. Seramik sanayiinde pişirim sıcaklıklarını düşürmesi bakımından maliyeti olumlu etkiler (Genç, 2013, s. 38). Çalışmada geniş pişme intervali sağlamak amacıyla talk kullanılmıştır.

**Boraks:** Çok yüksek camlaşma oranına sahiptir. Boraks 1000°C'de erimeye başlar ve 1200-1300°C sıcaklıklarda tamamen eriyerek camsı yapıya dönüşür (Genç, 2013, s. 23). Boraks hem sırlarda hem de çamur yapımında eritici ve camlaşma özelliği için kullanılmaktadır.

**Soda:** Sodyum karbonat olarak da adlandırılan bu bileşik beyaz renkli kristalin bir tuzdur. Suda kolay çözüldüğü için sırda sırçalaştırılarak kullanılırlar (Hacızade, 2019, s. 195).

**Magnezit:** Magnezit %47,6 MgO ve %52,4 $CO_2$ içeren ve içinde az miktarda $Fe_2O_3$ bulunan magnezyum karbonattır (Erdoğan ve Yıldız, 1995, s. 15). Isıya dayanıklılık gösterdiğinden düşük dereceli sırlarda bulutlanmalara sebep olurken, yüksek derecelerde pürüzsüz yüzeyler oluşturabilir (Hopper, 1984, s. 85).

## 6. Reçete Uygulamaları

Üçlü ve dörtlü diyagrama göre kurgulanan reçetelerin hazırlanma aşamasının ilk basamağını tartım işlemi oluşturur. Tartımlar hassas terazide titizlikle tamamlanmalıdır. Kuru tartımları tamamlanan çamur bünyelere su emme özelliklerine göre 40-80 ml arasında su ilave edilerek öğütme işlemine hazır hale getirilir. 10 dakika bilyeli jet değirmende öğütme işlemi gerçekleştirilen reçeteler yaş çamur halini (balçık) alır. Öğütme işlemi tamamlanan yaş çamurun alçı plakalar üzerinde bekletilip fazla suyu

uçurularak plastik (yoğurulabilir) hale getirilir. Hava kalmayacak şekilde makine haznesine aktarılan çamurlar yazıcıda baskıya hazır hale getirilir ve basılır.

### 6.1. Üçlü ve Dörtlü Diyagram Yöntemi ile Hazırlanan Bünyelerden Örnekler

Bu çalışmada akışkan, plastiklik özelliği seramik yazıcılar ile uyumlu, makinadaki basım aşamasından başarı ile geçen, yüzeyde çatlak oluşumu ve deformasyon gözlenmeyen, mukavemeti yüksek olan P1R2, P1R14, P2R5, P2R12, P3R17, P6R12, P6R18, P7R4,D4R8, D5R6 kodlu reçeteler sunulmuştur. Sunulan reçeteler arasında özellikle P1R2, P1R14, P2R5, P2R12, P6R12, P6R18 kodlu reçeteler tek pişirimde ve düşük derecede pekişebilen sırsı yüzey özellikleri ile dikkat çekmektedir. Elde edilen sonuçlar reçeteleri, yüzey görümleri, kuru, pişme, toplum küçülme oranları ve su emme yüzdeleri ile Tablo 2-8'de verilmektedir.

**Tablo 2**. Piramit 1'e ait sonuçlar

| **Piramit 1**<br>**Pişirim Sıcaklığı: 900°C** | Yüzey Görüntüsü | Kuru Küçülme Yüzdesi | Pişme Küçülme Yüzdesi | Toplu Küçülme Yüzdesi | Su Emme Yüzdesi |
|---|---|---|---|---|---|
| R2<br>%80 Karacasu Kili<br>%10 Talk<br>%10 Boraks |  | %8 | %1,6 | %9,6 | %4,8 |
| R14<br>%60 Karacasu Kili<br>%10 Talk<br>%30 Boraks |  | %7 | %2,1 | %9,1 | %5,9 |

**Tablo 3**. Piramit 2'ye ait sonuçlar

| **Piramit 2**<br>**Pişirim Sıcaklığı: 900°C** | Yüzey Görüntüsü | Kuru Küçülme Yüzdesi | Pişme Küçülme Yüzdesi | Toplu Küçülme Yüzdesi | Su Emme Yüzdesi |
|---|---|---|---|---|---|
| R5<br>%80Konya Kili<br>%10 Kuvars<br>%10 soda |  | %6 | %0 | %6 | %5 |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| R12<br>%60 Konya Kili<br>%30 Kuvars<br>%10 soda |  | %8 | %0,5 | %8,5 | %17 |

**Tablo 4**. Piramit 3'ye ait sonuçlar

| **Piramit 3**<br>**Pişirim Sıcaklığı: 900°C** | Yüzey Görüntüsü | Kuru Küçülme Yüzdesi | Pişme Küçülme Yüzdesi | Toplu Küçülme Yüzdesi | Su Emme Yüzdesi |
|---|---|---|---|---|---|
| R17<br>%50 Kaolen<br>%40 Talk<br>%10 Vollastonit |  | %6 | %0,2 | %6,2 | %11 |

**Tablo 5**. Piramit 6'e ait sonuçlar

| **Piramit 6**<br>**Pişirim Sıcaklığı: 900°C** | Yüzey Görüntüsü | Kuru Küçülme Yüzdesi | Pişme Küçülme Yüzdesi | Toplu Küçülme Yüzdesi | Su Emme Yüzdesi |
|---|---|---|---|---|---|
| R12<br>%60 Kaolen<br>%30 Boraks<br>%10 Kuvars |  | %8,5 | %0,5 | %9 | %13 |
| R18<br>%50 Kaolen<br>%30 Boraks<br>%20 Kuvars |  | %5 | %4,2 | %9,2 | %13,8 |

**Tablo 6**. Piramit 7'e ait sonuçlar

| **Piramit 7**<br>**Pişirim Sıcaklığı: 900°C** | Yüzey Görüntüsü | Kuru Küçülme Yüzdesi | Pişme Küçülme Yüzdesi | Toplu Küçülme Yüzdesi | Su Emme Yüzdesi |
|---|---|---|---|---|---|

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| R4<br>%80 Afyon Kili<br>%20 Kuvars |  | %10 | %11,5 | %21,5 | %25 |

**Tablo 7**. Diyagram 4'e ait sonuçlar

| **Diyagram 4**<br>**Pişirim Sıcaklığı: 900°C** | Yüzey Görüntüsü | Kuru Küçülme Yüzdesi | Pişme Küçülme Yüzdesi | Toplu Küçülme Yüzdesi | Su Emme Yüzdesi |
|---|---|---|---|---|---|
| R8<br>%40 Karacasu Kili<br>%20 Kuvars<br>%10 Talk<br>%30 Bentonit |  | %6 | %6,8 | %12,8 | %18,8 |

**Tablo 8**. Diyagram 5'e ait sonuçlar

| **Diyagram 5**<br>**Pişirim Sıcaklığı: 900°C** | Yüzey Görüntüsü | Kuru Küçülme Yüzdesi | Pişme Küçülme Yüzdesi | Toplu Küçülme Yüzdesi | Su Emme Yüzdesi |
|---|---|---|---|---|---|
| R6<br>%20 Talk<br>%20 Vollastonit<br>%30 Bentonit<br>%30 Kaolen |  | %11 | %1,1 | %12,1 | %31 |

## 7. Sonuç

İlk ortaya çıkışından bu yana büyük bir hızla gelişimini sürdüren üç boyutlu yazıcı teknolojisi günümüzde seramik alanında hem sanatsal hem de küçük ölçekli endüstriyel üretim süreçlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Bu teknolojinin geçtiğimiz elli yıldaki gelişimi, seramik sanatı ve endüstrisi üzerindeki günümüz etkileri, üç boyutlu yazıcıların seramik alanında kullanımının çok daha büyük bir hızla devam edeceğine dair bir öngörü sağlamaktadır. Bu tip yazıcıların endüstriyel ürünlere yönelik seri üretim olanakları henüz tam olarak yaygınlaşmamış olup olası imkânlar üzerine çalışmalar devam etmektedir. Bunun ötesinde üç boyutlu yazıcıların çalışma prensipleri kullanılarak yapılan sanatsal eserlerde yazıcının çalışma prensibine aykırı müdahalelerle sanatçıların yeni estetik arayışları da halen sürmektedir.

Bu çalışma sonucunda Konya, Afyon, Eskişehir ve Karacasu killeri ile oluşturulan reçetelerin üç boyutlu yazıcılarda baskı alma sürecinde olumlu sonuçlar verdiği ve baz bir bünye reçetesi oluşturabildiği

gözlenmiştir. Baskı sürecindeki bu başarı aynı zamanda eklenen eritici özelliği gösteren hammadde çeşidine göre değişiklik göstermektedir. Eriticiler üzerine genel bir değerlendirme yapılacak olursa; düşük derecede üç boyutlu yazıcılarda baskıya uygun pekişmiş bir bünye elde edebilmek için en etkili eriticinin soda ve boraks olduğu söylenebilir. Hem baskı sürecindeki başarıyı hem de pekişmiş bünye elde etme başarısını etkileyen bir diğer önemli husus ise eritici oranıdır. Karacasu ve Konya kilinden oluşturulan reçetelerde sırsı bir yüzey görünümü elde edebilmek için % 20 oranında eritici katkısı yeterli iken, Eskişehir ve Afyon kili ile yapılan denemelerde eritici katkısının %50'ye kadar çıkarılması gerektiği görülmüştür. Killer yerine karışımda kaolin kullanıldığında ise eritici oranını %70'lere kadar arttırmak gerektiği belirtilmelidir.

Bu çalışma ile su emme oranı düşük, mukavemeti yüksek, düşük derecelerde pekişebilen ve tek pişirimde sırsı yüzeylerin elde edildiği sonuçlara ulaşılmıştır. Böylece sır pişirimi gerektirmeyen, enerji ve hammadde maliyetini düşürecek bünyeler elde etme imkânı sağlanmıştır. Özellikle kuvars ve eritici oranları yüksek olan bünyelerde geleneksel yöntemlerle şekillendirme yapmak oldukça zordur. Şekillendirilebilen ürünlerde ise kuruma veya pişirim sürecinde deformasyon ve çatlaklar oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan killer hem suyu homojen bir şekilde emmekte hem de yavaş bir kuruma süresine sahip olmaktadır. Bu sebeple yazıcılarda kullanılabilecek çamur reçeteleri göz önüne alındığında farklı hammadde katkılarına uygun killer olduğu sonucuna varılmıştır.

Üç boyutlu yazıcılarla ve projenin konusu olan çamur tipleriyle sektöre ait ana akım ürünlerden farklı ürünler üretmek mümkündür. Hem üretilebilecek ürünün teknik özellikleri hem de biçimsel, işlevsel ve form özellikleri açısından bu çalışma gelişime açıktır. Ayrıca düşük derecelerde tek pişirimle nihai ürün elde edilebilmesi, alçı kalıp, silikon, polimer v.b. yardımcı malzemeler olmaksızın yapılabilecek üretimler sayesinde çevreci ürünler ve üretim yöntemleri geliştirilebilir. Bununla beraber yazıcıda yapılabilecek geliştirmeler ile tasarımcı ve sanatçıya malzeme geliştirme ve geri dönüştürülebilir malzeme kullanmanın yolunu açması gibi çalışmaların yapılması da bu alana yönelik sürdürülebilirliği öngörülebilir kılmaktadır.

Üç boyutlu yazıcılarda kullanılabilecek bünye tasarımları ile literatürde ayrı bir çalışma alanı oluşturulması da mümkündür. Üç boyutlu yazıcılarla seramik üretiminin hem bünye araştırmalarında hem de biçimsel ve işlevsel yeniliklerin gerçekleştirilmesinde, sanat, tasarım ve mühendislik üçgeninde yeni bir üretim kültürü getireceği gözlemlenmiştir. TÜBİTAK destekli bu çalışmaların ülkemize faydalı olarak yenilikçi araştırmaların ve uygulamaların bir basamağını oluşturması hedeflenmektedir.
Elle şekillendirme, çömlekçi çarkıyla şekillendirme, alçı kalıp ile şekillendirme, kuru pres yoluyla şekillendirme gibi şekillendirme yöntemlerinin haricinde, seramik şekillendirme yöntemleri arasında üç boyutlu yazıcılarla şekillendirme de literatüre girmiştir. Seramik endüstrisinde de prototipleme amacıyla kullanılmaya başlanan üç boyutlu yazıcılar gerek sanatsal gerekse endüstriyel seramik üretiminde de bir gelecek vaat etmektedir.

Bu çalışma, tüm bu imkânlar gözetildiğinde, yeni bir üretim yöntemini, ürün grubunu ve bu ürünleri oluşturacak malzeme çeşitliliğini geliştirmeyi de amaçlamıştır. Seramik malzeme ile çok farklı kategoride ürünler elde etmek mümkündür. Bunların şekillendirme yöntemleri farklı olduğu gibi kullanılan çamur tipleri de uygulama özelliklerine göre farklılıklar göstermektedir. Seramik endüstrisinde ağırlıklı olarak yarı manuel, döküm ve çeşitli pres yöntemleriyle biçimlendirme yapılmaktadır. Bu yazıcıların biçimlendirme özelliğine uygun estetikte sade biçimli ürünler üretilebileceği gibi karmaşık ve standart üretim yöntemleriyle üretilemeyecek formlar yaratmak da mümkün olacaktır. Bu çalışma farklı biçim-işlev-yapı arayışlarına uygun tasarım önerileri sunabilmekte, farklı sektörlere yönelik yaygın olmayan, yenilikçi ürünler ortaya koyabilmektedir. Üç boyutlu yazıcılarla ve farklı çamur tipleriyle yapılan bu çalışmadaki uygulamalar sınırlı sayıda (*limited edition*) veya tasarım niteliği bakımından özgün, benzersizlik (*unique*) niteliklere sahip ürünlerin üretimine örnek teşkil etmektedir. Proje mimari iç ve dış cephe kaplamalarına da alternatif üretim yöntemi sunmakla birlikte, günümüzde büyük bir hızla yayılan ve geliştirilen büyük yazdırma alanına sahip üç boyutlu yazıcılar ile dikey bahçe ve organik hammaddelerle üretilen prefabrik evlerin yapımına da ön çalışma niteliğindedir. Hızlı bir ivme ile gelişim gösteren katmanlı üretim teknolojisi tuğla ve kiremit sektörü gibi farklı pazarlara da ulaşabilecek kapasitededir. Bu yönüyle geleneksel yerel üretime de katkı sağlayacak alternatif çamurların üretimine ve kullanımına da direkt katkı sağlayacaktır.

## Kaynakça

Al-Maliki J. Q. & Al-Maliki A. J. Q. (2015). The processes and technologies of 3d printing. *International Journal of Advances in Computer Science and Technology,* 4(10), 161-165. http://www.warse.org/IJACST/static/pdf/file/ijacst024102015.pdf

Arcasoy, A. ve Başkırkan H. (2020). *Seramik Teknolojisi.* Literatür Yayıncılık.

Chen, Z., Li, Z., Li, J., Liu, C., Lao, C., Fu, Y., Liu, C., Li, Y., Wang, P. & He, Y. (2019). 3d printing of ceramics: A review, *Journal of The European Ceramic Society,* 39 (4), 661-687. https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2018.11.013

Cui, X. Ouyang, S., Yu, Z., Wang, C. & Huang, Y. (2002). A study on green tapes for LOM with water-based tape casting processing, *Materials Letters,* 57 (7), 1300-1304. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X02009758

Earl, N. (2017). 3d printing and the open source movement. *Museum of Applied Arts & Sciences.* https://maas.museum/inside-the-collection/2017/09/26/3d-printing-and-the-open-source-movement/

Erdoğan, N. ve Yıldız, R. (1995). *Magnezit ve bazik refrakter malzeme teknolojisi.* Lale Ofset.

Genç, S. (2013). *Artistik seramik sırları: Sır sanatı.* Boyut Matbaacılık.

Hacızade, F.(2019). *Seramiğin kimyası.* Çizgi Kitabevi.

Heidari-Rarani, M., Rafiee-Afarani M. & Zahedi A. M. (2019). Mechanical characterization of FDM 3d printing of continuous carbon fiber, *Composites,* 175, 107147/1-8. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107147

Hopper, R. (1984). *The ceramic spectrum: A simplified approach to glaze & color development.* Krause Publications.

Mohd Pu'ad, N.A.S., Abdul Haq, R. H., Mohd Noh, H., Abdullah, H. Z., Idris, M. I. & Lee, T. C. (2020). Review on the fabrication of fused deposition modeling (FDM) composite filament for biomedical applications, *Materials Today: Proceedings,* 1(29), 228-232. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.535

Mühür, M. (2016). 3b yazıcı ile basılan seramik ürünler üzerine bir değerlendirme. *Seramik Türkiye,* 49, 88-97. https://serfed.com/seramik-turkiye-dergisi

Özgündoğdu, A. F. (2014, Eylül 5-20). *Seramik üretiminde çağdaş bir biçimlendirme yöntemi olarak üç boyutlu yazıcılar* [Sempozyum bildirisi], Eskişehir Tepebaşı Belediyesi, 8. Uluslararası Eskişehir Pişmiş Toprak Sempozyumu, (s. 213-227). Eskişehir Tepebaşı Belediyesi, Eskişehir, Türkiye. http://pismistoprak.tepebasi.bel.tr/bildiriler/bildiri8.pdf

Rhodes, D. (1957). *Clay and glazes for the potter* (1. Baskı). Chilton Company.

Taçyıldız, E. (2018). *Seramik sırrının sırrı.* Hayalperest Yayınevi.