



Makale/Research Paper

Seramik Sektöründe İnk–Jet Dekorasyon Uygulamaları

Bekir KARASU¹, Deniz KARABULUT¹, Aytaç BIÇER^{1,2}, Utku Can VAROL^{1,2}, Zehra Emel OYTAÇ^{1,3}

¹Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Eskişehir/
Türkiye

²Türk Demirdöküm Fabrikaları A.Ş, Bozüyük, Bilecik /Türkiye

³Seramik Araştırma Merkezi (SAM), Eskişehir/Türkiye

bkarasu@eskisehir.edu.tr

Received/Geliş: 30.05.2019

Accepted/Kabul: 29.07.2019

Öz: Seramik karolar sadece teknik özelliklerinden dolayı değil aynı zamanda estetik görüntüleri sayesinde tercih edilmektedir. Bu yüzden kaplama malzemelerinde dekorasyon önemli bir süreç aşamasıdır. Mevcut seramik kaplama malzemelerinin üretim sisteminde elek baskı yönteminden, ink–jet dekorasyon teknolojisine geçiş çok yaygın hale gelmiştir. Dijital dekorasyon sisteminin yaygınlaşmasıyla tüketicinin ihtiyacını karşılayacak şekilde estetik görünümün eldesi de kolaylaşmıştır. Seramik karolarda bu tekniğin uygulanması birçok avantajı da beraberinde getirmektedir. İlgili sektörde söz konusu uygulamaya geçen pek çok firma mevcuttur. Ayrıca, ink–jet dekorasyon tekniğiyle ilgili araştırma–geliştirme çalışmalarına devam edilmektedir. Bu makalede ink–jet teknolojisinin zaman içindeki gelişimine yer verilmektedir.

Anahtar kelimeler: Seramik karo; ink–jet dekorasyon; uygulama; gelişim

Ink–Jet Decoration Applications in Ceramic Industry

Abstract: Ceramic tiles are preferred not only for technical properties required but also for aesthetical looks possessed. Therefore, decoration stage during the production is very important. Nowadays in the production of ceramic coating materials moving from silk screening to ink–jet decoration technology became popular. Consequently, aesthetical appearances fulfilling customers demand become easily obtained, as well as supplying many other facilities. In the regarded sector there have been many factories started to apply ink–jet technology, besides there have been many research and development studies carrying out. Hereby, the development of ink–jet technology is mentioned.

Keywords: Ceramic tile; ink–jet decoration; applications; development

1. Giriş

Seramik karo dekorasyon tekniklerinde, hem ekonomik sebepler ve çevresel kısıtlamalar hemde pazar taleplerinin karşılanması ve daha estetik ürünlerin eldesine duyulan ihtiyaç yüzünden son yıllarda büyük değişimler gözlemlenmektedir. Yeni teknolojilerin, ürünlerde yüksek kalite standartlarının korunarak seri üretimi sektöre uğratmayacak şekilde sürece adapte edilmesi gerekmektedir [1–2].

Seramik karo sektöründe kullanılan dekorasyon yöntemleri 1960'lı yıllardan beri gelişim kaydetmektedir. İlk yıllarda yaygın biçimde uygulanan elek baskı tekniği (flat screen printing) yerini, 1970'lerde geliştirilen tambur serigrafı baskıya (rotary screen printing), ardından da 1990'larda ortaya çıkan gravür (rotary gravure printing) baskıya bırakmıştır. Ayrıca, 1990'lı

Bu makaleye atıf yapmak için

Karasu, B., Karabulut, D., Biçer, A., Varol, U. C., Oytaç Z. E., "Seramik Sektöründe İnk–Jet Dekorasyon Uygulamaları" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi, 2019, 6(3); 691-711.

How to cite this article

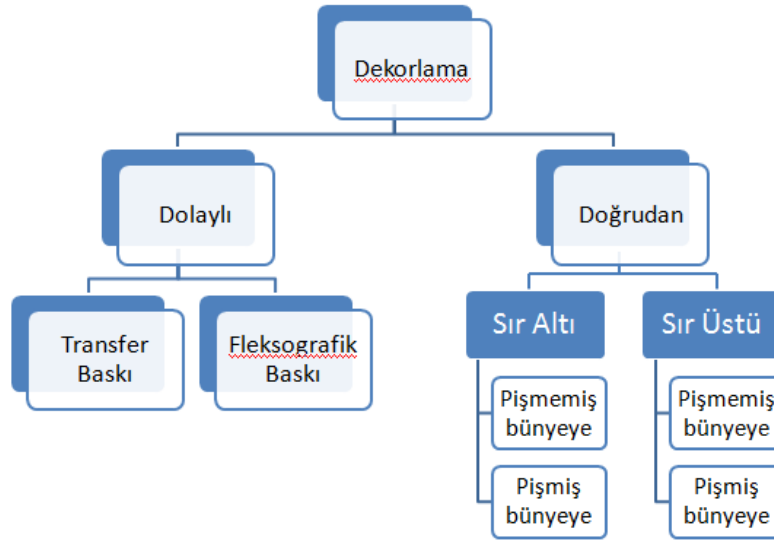
Karasu, B., Karabulut, D., Biçer, A., Varol, U. C., Oytaç Z. E., "Ink–Jet Decoration Applications in Ceramic Industry" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2019, 6(3); 691-711.

yıllarda fleksografi baskı tekniği seramik sektöründe uygulanmaya çalışılmış fakat yaygın biçimde kullanılamamıştır [3].

Yukarıda bahsi geçen tüm yöntemlerde, dekor baskı işlemi esnasında faydalanan ekipmanların mukavemeti düşük, pişmemiş kırılabilir seramik bünyelerle teması gerektiğinden baskı esnasında önemli miktarda üretim hatası ortaya çıkmaktadır. Geleneksel yöntemlerin yeni teknolojilere kıyasla diğer dezavantajlarından bazıları: düşük çözünürlükte baskı kalitesi, yavaş üretim süreci, tekrarlanan üretimlerdeki renk uyumsuzluğu, karo köşelerinde sıklıkla gözlemlenen baskı hataları, yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetleri olarak sıralanabilir. İnk-jet (mürekkep püskürtmeli) baskı teknolojisinin kökeni, 1833 yılında Fransız Felix Savart'ın sıvı jetlerin bir dizi tekrarlanabilir damlalara ayrışmasının, akışkanlar mekaniği yasalarına tabi olduğunu gösteren araştırmasına dayanmaktadır. Fakat ilk ink-jet yazıcı ancak 1951 yılında Siemens tarafından patentlenebilmiştir. Bu tarihten sonra ink-jet baskı teknolojisi üzerine gerçekleştirilen araştırmalar hız kazanmış ve günümüzde masaüstü yazıcılardan üç boyutlu ürünlerin üretimine kadar birçok uygulama alanında kendine yer edinmiştir. Ofis uygulamaları için üretilen ink-jet yazıcılar, resim, poster ve kâğıt baskı gibi çeşitli uygulamalarda, endüstride ise genellikle marka basma ve kodlama işlemleri için kullanılmaktadır. Endüstriyel ink-jet yazıcılarla yalnızca kâğıda değil, ambalaj filmleri, ahşap, teneke kutular ve plastik şişeler gibi birçok malzeme yüzeyine de baskı yapılabilmektedir. Üretim hattında akan ürünlere yapılan baskı işleminde faydalanan mürekkepler ise hızlı kuruyacak şekilde tasarlanmıştır. İnk-jet teknolojisine 10 yılı aşkın bir süredir tekstil ürünlerinin baskısında ve 21. yüzyılın başlarından itibaren seramik karoların dekorasyonunda ticari olarak başvurulmaktadır. Seramik üretim sürecinde pişirim öncesi uygulanan ink-jet dijital baskı teknolojisi günümüzde seramik karo tasarımlarında tercih edilen en yaygın yöntem haline gelmiştir [4]. Ayrıca, son yıllarda bu teknoloji ile seramik ve metal gibi üç boyutlu malzemelerin üretiminin yanı sıra iletken polimerler, organik ışık emen diyotlar, organik transistörler gibi elektrik ve optik cihazların üretimi üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Seramik sektöründe ink-jet dijital baskı teknolojisini geleneksel yöntemlere kıyasla öne çıkaran temel etkenler ink-jet baskı teknolojisinin tamamen dijital ve temassız bir yöntem olmasıdır. Dolayısıyla, geleneksel yöntemlerle baskı uygulanamayan içbükey ve dışbükey yüzeylere sahip ürünlerin dekore edilmesine olanak sağlanır [5]. Baskı esnasında bisküvilerde meydana gelen hataları minimize ettiği ve mürekkebin yüksek verimde kullanımını sağladığı için daha çevreci bir yöntemdir [6-7]. Bu metotta tasarımların depolanması, verilerin dijital olması sayesinde çok daha kolay ve ucuzdur. Farklı tasarımlara sahip karolar kolay bir şekilde sırayla veya aynı anda üretilebilmektedir. İnk-jet dijital baskı yöntemi ile hazırlanan ürünler daha yüksek görüntü kalitesine sahip olmakla birlikte çok daha gerçekçi ve doğal bir görünüm sunmaktadırlar [8].

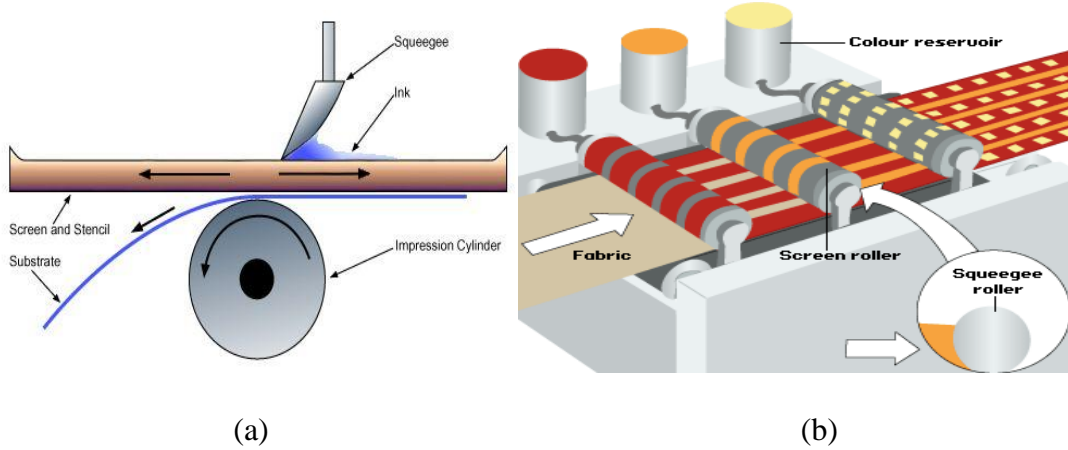
2. Seramik Dekorlama Yöntemleri

Dekorasyon teknikleri karoların yanı sıra sofraya gereçleri ve hediyelik eşyalarda da sıkça kullanılmaktadır. Uygulanan teknikler, uygulama şekline göre Şekil 1'deki gibi gruplandırılmaktadır. Dolaylı baskıda görüntü kâğıt, kauçuk panç, baskılanmış yüzey gibi ara bir altlığa aktarıldıktan sonra seramik yüzeye tatbik edilir. En yaygın dolaylı dekorlama yöntemleri fleksografik ve transfer baskıdır. Aralarındaki temel fark kullanılan altlık malzemesidir. Transfer baskıda görüntü çıktı kâğıdına, fleksografik baskıda ise cam, kauçuk, reçine gibi bir altlığa aktarılır. Dolaylı dekorasyon yöntemleri düzensiz şekilli ürünlerin (sofra ürünü, hediyelik eşya vb.) dekorasyonunda kullanışlıdır. Doğrudan baskı yöntemlerinde ise görüntü doğrudan seramik yüzeye aktarılır. Bu metot ekonomikliği sebebiyle daha çok tercih edilir ancak görüntü kalitesi dolaylı baskıda daha yüksektir. Sır-altı uygulamasında dekor doğrudan karo yüzeyine uygulanabildiği gibi astar (angop) ya da alt sır üzerine de tatbik edilebilmektedir. İstenen etkiye göre üst sır şeffaf ya da opak olabilmektedir. Pişmemiş bünyeye dekor uygulandığında bünyeye gerçekleşebilecek tepkimelerden kurtulmak için daha çok pişmiş bünyeye dekor uygulanması tercih edilmektedir [9].



Şekil 1. Seramik ürünlerin dekorlama yöntemlerinin sınıflandırılması [9]

Seramik ürünlerin dekorasyonunda yaygın kullanılan yöntemlerden biri elek baskıdır. Bu yöntemde, renklendirici pasta elekten altlık yüzeyine bıçak yardımıyla aktarılır. Döner elek baskı da (rotokolor) aynı prensiple döner bir elek kullanılarak otomatik bir sistemle baskı uygulanır. Çok yaygın kullanımına karşın, uygulama sırasında karoların kırılabilmesi, dekorların kenarlara eşit uygulanamaması gibi sorunlara yol açabilmektedir [10].



Şekil 2. (a) Düz elek baskı, (b) Döner elek baskı [11]

2.1. Düz elek baskı

Avantajları:

- Ucuzdur.
- Mekanik olarak kolay bir yöntemdir.

Dezavantajları:

- Uzun zaman alır.
- Dekorasyonu tamamlayan farklı elekleri sıraya koymak zordur.
- Elekler sık sık temizlenmelidir.
- Karonun üzerine uygulanan basınçtan dolayı karo kolayca kırılabilir.

2.2. Döner elek baskı (rotokolor)

Avantajları:

- Daha iyi baskı kalitesi verir.
- Düşük elek aşınması sayesinde elek maliyeti azalır (pastanın iyi reolojik ve iyi yağlama gücünden dolayı).
- Elek rahatlıkla temizlenebilir.
- Karo bant üzerinde ilerlerken düz elek baskı yöntemindeki gibi durmasına gerek yoktur.
- Silikon silindirlere oranla düşük elek ve makine maliyetine sahiptir.

Dezavantajları:

- Eleklerin çıkarılması ve sıraya dizilmesi uzun zaman alır.

Son yıllarda, seramik dekorasyonunda,

- Desen değişiminin çok hızlı, desen arşivlemenin pratik olması,
- Az miktarda ve çeşitte istenen renkte ve çözünürlükte görüntü elde edilebilmesi gibi sebepler yüzünden geleneksel yöntemlere alternatif olarak ink-jet dekorlama teknolojisi geliştirilmiştir.

İnk-jet dekorlama, mürekkebin milyonlarca mikro damlacıklar halinde, elektronik olarak kontrol edilmesini temel alan bir dekorasyon yöntemidir. Bu teknikte belirli özelliklere sahip çözücü (solvent) veya su esaslı özel mürekkepler kullanılmaktadır [12].

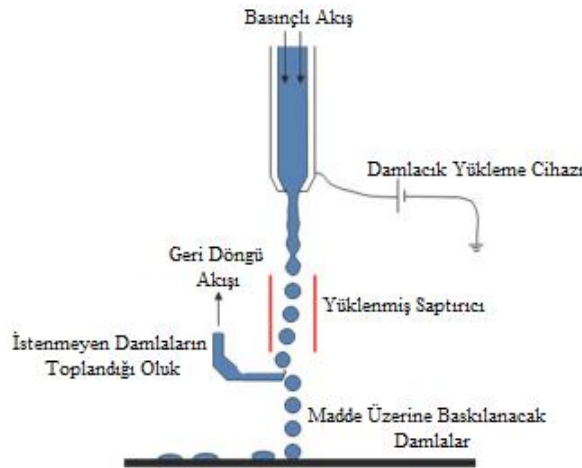
3. Dijital (İnk-Jet) Dekorlama

Geleneksel baskının temel ilkeleri yüzyıllar boyu aynı kalmıştır. Genellikle bir ana şablondan yarı sıvı veya sıvı mürekkep deseninin aktarılması ile bir kâğıt ve bir diğer alt tabakanın doğrudan teması vasıtasıyla gerçekleşir. Baskılanan desende değişiklik sadece baskı makinesi içerisinde fiziksel ve mekanik değişimleri sağlayan ana şablonun değiştirilmesiyle gerçekleştirilir. Seramik karo baskılamada kullanılan geleneksel süreçler esasen kâğıt, kart ve tekstil için geliştirilen süreçlerle aynıdır. Bunlar: düz serigrafî, döner serigrafî, fleksografik ve etiketli baskılama şeklindedir. Mürekkep püskürtmeli baskılama (ink-jet) ise geleneksel yöntemlerin aksine temelde farklı bir süreç gerektirmektedir. Her bir küçük mürekkep damlası, dijital kontrol altında oluşturulmakta ve biriktirilmektedir. Böylece, bir kesit içindeki her bir baskı deseni, birbiri ile aynı veya kolaylıkla bir diğerinden farklı olabilmektedir. Söz konusu teknik yaygın biçimde küçük ölçekli grafiksel baskı ve metin baskılamada kullanılmaktadır. Süreç, üretim sırasında malzemelerin depolanabilmesi için geniş bir ihtimal aralığı sağlamaktadır. Günümüzde kart ve kâğıt üzerinde ticari ölçekte baskılama giderek artmaktadır. Çeşitli etken durumlar bu uygulamaları daha çekici hale getirmektedir. İlgili teknik ilk önce dijital bir işlem üzerine kurulmuştur. Bir x-y ızgarası üzerinde her bir malzeme damlasının konumu belirlenebilir, gerekirse alt tabakanın bozunumunu engellemek veya yanlış hizalanmasını düzeltmek için eş zamanlı değiştirilebilir. Bir ürün, kolayca diğer ürünlerden küçük veya büyük olabilir, ürünler, aynı tasarımın çoklu kopyaları gibi de kolayca üretilebilir. Dijital veriler arasında baskı deseni de tutulacağından fiziksel maske ve şablon kullanımını gerektiren süreçlerde önemli maliyet tasarrufları sağlanabilir. İkinci teknik, temassız bir yöntem üzerine kuruludur ve daha geleneksel yöntemlerde uygulanabilirliği zor veya neredeyse imkânsız kırılmalı altlıklar da işlenebilir. Süreç, en az 1 mm durma mesafesi veya bazı durumlarda çok daha fazlasıyla gerçekleştirilebilmektedir. Dolayısıyla, düz olmayan tabakalar da baskılanabilir. Üçüncü teknikte, çeşitli ve geniş bir aralıkta malzeme biriktirilebilir. Tek sınırlama ise malzemenin fiziksel özellikleri bakımından (esasen ağırlık ve yüzey gerilimi) uygun bir aralıkta bulunma zorunluğu arz ettiğinden sıvı halde olması gerekliliğidir. Pigment, boya, firit ve metalik tanecikler

optik ve elektronik işlevsellikleri sağlayabilmek amacı ile çok çeşitli diğer malzemelerin yanı sıra süspansiyonlardan da kolayca basılabilmektedir [1].

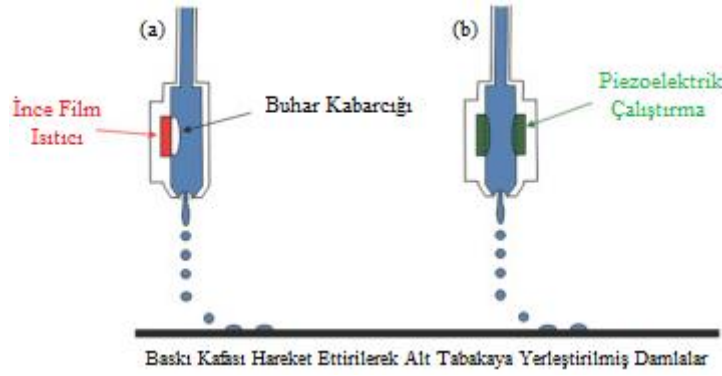
İnk-jet baskılama sistemleri çok yenidir ve ofis otomasyon uygulamaları için 1980'lerin sonlarına doğru geliştirilmiştir. Seramik dekorasyonu için ink-jet baskılama sisteminin olası kullanımı üzerine yapılan ilk çalışmalar 1980'lere dayanmaktadır: W. Roberts (British Cream Research), 20–100 μm 'lik nozulların kullanıldığı bir ink-jet sistemi önermiştir. İlk endüstriyel baskılama makinesi, 2000'de Cevisama Uluslararası Fuar'ında Kerajet firması tarafından sunulmuştur. Ferro firması ise bu makinelerde kullanılacak ilk mürekkep ürünleri patent altına almıştır. Teknolojinin geliştirilmesinde yeni baskı kafaları (print heads) ve pigment esaslı mürekkeplerin paralel gelişimleri kilit unsurları oluşturmuştur. Ancak, endüstriyel gerçekliğe dönüştürülebilme açısından çözülmesi gereken başka konular da mevcut idi. Bunlar: başlıca karo taşıma sistemi, mürekkep besleme sistemi, veri besleme, ilgili kontrol sistemleri ve endüstriyel üretim ortamla bütünleştirme (kurulum) üzerineydi. Diğer konular ise yanmamış ürün kayıplarını azaltan temassız baskılama, kenar süsleme, kabartmaların dekorasyonu, yüksek görüntü çözünürlüğü, renk farklılıklarını azaltan çevrimiçi kontrol-tasarım düzeltimi, sınırsız tasarım çeşitliliği, modellerin anlık değiştirilebilmesi, mürekkep yönetim kolaylığı, hem küçük hem de büyük ölçeklerde süreç ekonomisi, ürünün basitçe özelleştirilmesi, daha kısa sürede ürün geliştirilmesi ve daha az insan gücü şeklindedir [13].

Günümüzde ink-jet baskılama için gerekli damlacık üreteçlerinde ticari olarak kullanılan üç tür mekanizma bulunmaktadır: sürekli mürekkep püskürtmeli (CIJ), isteğe bağlı duraklamalı mürekkep püskürtmeli (DOD) ve elektrostatik mürekkep püskürtmeli baskı (EIJ). Her bir teknik, mürekkebin kendine özgü damla boyut aralığı ve fiziksel özellikleri için özel gereksinimlere sahiptir. CIJ ve DOD teknikleri metin baskılama ve işaretleme uygulamalarında 40 yılı aşkın bir süredir ticari olarak kullanılmaktadır. CIJ mekanizmasında küçük bir düze açıklığından çekilen sıvı, bir kolonun Rayleigh dengesizliği boyunca damla akıntısı oluşturmaktadır. Nozullardan oluşan düze, her bir damla üzerine küçük bir yük aktaran toprağa bağlı bir potansiyelde tutulur. Damlalar, saptırıcı plakalara diğer bir potansiyel uygulayarak yönlendirilir (Şekil 3). Damla çapları genelde 50 μm kadardır ve düzenin çapından biraz daha büyüktür. CIJ yazıcıları, sürekli damla akışı üretir. İstenmeyen damlalar ise oluklara sapar ve israfı engellemek için birçok grafik uygulamasında geri kazanılır. Damla oluşum hızı 50 kHz'den fazla olmalıdır. Damlalar ise 10 m/s'den büyük hızlarla dışarı çıkar. CIJ tekniği, dakikada en yüksek mürekkep miktarını üretse de yerleştirme doğruluğu ile sınırlanır. Bu teknik genellikle ürün işaretleme/markalama ve kodlamada kullanılmaktadır. Yöntemdeki temel endişe sürekli sıvı püskürtme nedeniyle mürekkep israfı ve geri döngü ile kazanılan mürekkebin kirlenmesi sonucu potansiyel farkının açığa çıkmasıdır [14].



Şekil 3. Sürekli mürekkep püskürtmeli bir yazıcının (CIJ) çalışma ilkelerinin şematik gösterimi [15]

İsteğe bağlı duraklamalı mürekkep püskürtmeli baskı (DOD) ile arzu edildiğinde münferit damlalar oluşturulur. DOD, püskürme sırasında bir damlayı yönlendirmez. Damla yerleştirme, alt tabaka veya damla üreticinin mekanik konumlandırılmasıyla gerçekleşmektedir. Düze arkasındaki bir haznede, basınç darbesinin yayılması sonucu damlalar ortaya çıkmaya başlar. Basınç darbesi sıvı damlaları yerlerinde tutabilen yüzey gerilim kuvvetlerinden üstün olmalıdır. Çekilen sıvı kolonu, hazne içindeki sıvının geri döngü akışı ve yüzey gerilim kuvvetlerinin bağdaşması ile bir damla oluşturmak üzere sıkıştırılır. Basınç darbesi hem mekanik çalıştırma (genellikle piezo-elektrik bir cihazla) hem de yerleştirilmiş bir ısıtıcı vasıtasıyla mürekkepteki bir buhar cebinin çökmesi ve oluşumu ile sağlanabilir (Şekil 4). Buhar cebi mekanizması, esasen düşük verimli masaüstü baskılama cihazlarında kullanılmaktadır. Piezo-elektrik çalıştırma ise yüksek hacimli ticari ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak tercih edilmektedir. Damla hacimleri, 10–100 nm çaplı ve 1 pL – 1 nL aralığındadır. Damlalar tercihe bağlı olarak yaklaşık 20 kHz’lik hızla atılmaktadır [14].



Şekil 4. İsteğe bağlı bırakılan mürekkep püskürtmeli bir yazıcının (DOD) çalışma ilkelerinin gösterimi: (a) Isıl, (b) Piezo-elektrik [15]

CIJ ve DOD baskılama teknikleri yüzey gerilim kuvvetleri ve akışkan fiziği ile kontrol edilmekteyken EIJ baskılama tekniği farklı bir ilkeyle çalışmaktadır. EIJ baskılamada, yüklü sıvı yüzeyinde elektrostatik itme sonucu üretilen damlalar kullanılmaktadır. Sıvı yüzeyi eğer yeterince yüksek bir potansiyelde tutulur ve mekanik olarak kısıtlanır ise bulunduğu levhadan deforme olur ve nihayetinde epeyce kavisli bir tepe yüzey (Taylor konisi) meydana getirir. Koni ucuna yakın alan düşümü epeyce geniş olabilir; bu da elektro-püskürtme sürecinde küçük sıvı damlacıklarının atılmasına yol açar. EIJ yazıcılar sıvı yüzey potansiyelini püskürtme eşiğinin hemen altında tutarak münferit damlacıkları dışarı atma potansiyeli içinde kontrollü darbeler kullanarak çalışmaktadır. Bu teknik ancak son zamanlarda ticari elde edilebilirlik kazanmıştır [14].

Etkili bir baskılama işleminde yazıcı performansı, mürekkep özellikleri ve alt tabaka karakteristik özellikleri belirleyici unsurlardır. Mürekkebin fiziksel ve kimyasal özellikleri: mürekkep damlacıklarının oluşumu, alt tabaka ile mürekkep arasındaki etkileşim ve şablon oluşumu için mürekkep damlalarının kuruması açısından mükemmel bir etkiye sahip ink-jet baskılamada hassas değişkenlerdir. Uygulamalarda mürekkep kimyası, donanım seçimini yönlendirmedi ve tanımlanmış uygulamayı yürütmede belirleyicidir. İnk-jet mürekkepleri; faz değişim, çözücü esaslı, su esaslı ve mor-ötesi ışığa ile kürlenabilir mürekkepler olmak üzere dört ana türdedir. Faz değişim mürekkeplerinde ZrO_2 , Al_2O_3 ve $Pb(Zr_{0.53}Ti_{0.47})O_3$ (PZT) gibi bazı inorganik malzemeler kullanılmıştır. Mürekkep püskürtmeli baskıda Au/Cu, $BaTiO_3$, ZrO_2 , NiO ve çözücü esaslı mürekkep içinde seramik pigmentleri de yer alabilmektedir. Çözücü esaslı mürekkepler için terpineol, 2-metoksi etanol, izo propanol ve etanol gibi alkol karışımları kullanır. Eğer gerekli ise mor ötesi mürekkeplerin kuruması için mor ötesi ışımdan faydalanılabilir. İnk-jet mürekkeplerinin hazırlanması, bazı çetrefilli gereksinimlerden dolayı genellikle karmaşıktır. Mürekkepler, geleneksel gereksinimler dışında (uzun raf ömrü, uygun renk özellikleri) çeşitli baskı durumlarına

özgü fiziko–kimyasal özellikler sergilemek zorundadır. Mürekkepteki her bir bileşenin kartuş içinde depolanabilirliğinden, püskürtülebilme, alt tabaka, insan sağlığı ve çevresi üzerindeki davranışına kadar genel performans üzerindeki etkileri değerlendirilmelidir. Mürekkep hazırlamada kararlılık, ağdalık, yüzey gerilimi, pH değeri, elektrolitler, boya/pigment oranı, katı miktarı, köpüklenme ve köpük giderici gibi unsurlar dikkate alınmaktadır [16].

Seramik ink–jet baskılama, dijital baskılamanın başlıca renkleri olan siyan, magenta, sarı ve siyah seramik mürekkepleri gerektirir. Bunlar genellikle renk veren inorganik pigmentler ve püskürtülebilirliklerini sağlayan çözücülerden oluşmaktadır. İnorganik pigmentler püskürtme sırasında düzenin tıkanmasını engellemek ve seramik ürünlerin eldesinde yanma süreci boyunca 1000 °C üzerinde ısı kararlılık sağlamak üzere mürekkep çözücünün içinde oldukça yüksek bir dağılıma sahip olmalıdır. Mürekkep çözücü ise baskı kafasından elverişli bir şekilde püskürebilmek için uygun bir ağdalık ve yüzey gerilimi sergilemelidir.

İnk–jet baskılama sırasında ortaya çıkan/çıkabilecek olgular değişkenlerle bir şekilde bağlantılıdır (Çizelge 1).

Çizelge 1. Mürekkep püskürtmeli baskılama sırasında meydana gelen olgular/problemler ile kullanılan ilgili mürekkebin fiziksel–kimyasal özellikleri ve dekorasyon sırasında mürekkep gereksinimleri [17]

Olgu	Mürekkep Özelliği	Mürekkep Gereksinimi
düze tıkanması	pigment tanecik boyutu	çap < 1 µm
pigment tortusu	zeta potansiyeli (elektrostatik kararlılık)	su esaslı mürekkepler
mürekkep damlaması		
düze üzerine mürekkep yayılması	yüzey gerilimi	20-45 mN/m
karo üzerine mürekkep yayılması		
mürekkep damlama çapı ve şekli	ağdalık	4 - 40 mPa*s
karoya mürekkebin nüfuz etmesi		
mürekkebin yönlendirilmesi	yoğunluk	1.1 - 1.5 g/cm ³
düzelerin aşınması	pH	5 < pH < 10
pigment çözünmesi/dağılması	organik ortamda çözünür olmaması	çok düşük
elektrik iletimi	elektrik iletkenliği	su esaslı mürekkeplerde; > 1000 µS/cm organik çözücü esaslı mürekkeplerde; < 100 µS/cm

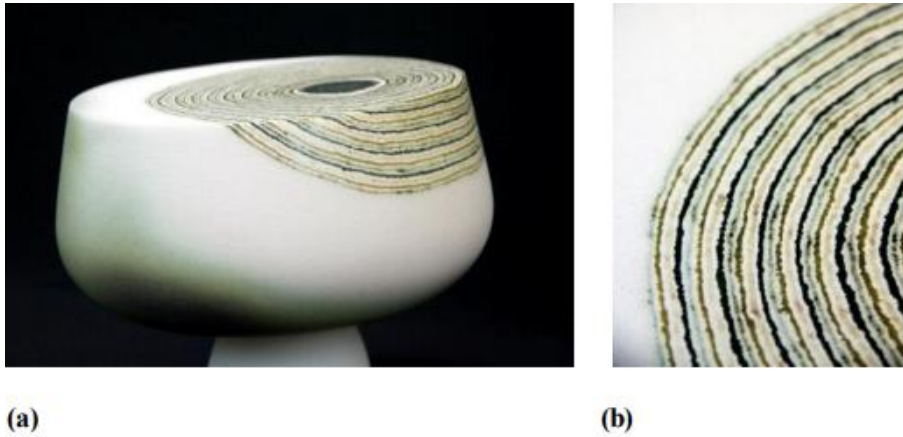
Geleneksel dekorasyon sistemlerinden dijital dekorasyona uzanan yol boyunca renklendiricilerden birkaçı, çeşitli etkenlere ve özellikle de sır ile bünyeler (altlıklar) arasındaki etkileşim ve renklendirme mekanizması üzerinde belirleyici olan tanecik boyutu kistasına uygunluk sağlayamamıştır. Tanecik boyutundaki azalma, renklendirici türüne bağlı olarak renklendirme mekanizması üzerinde farklı bir etkiye sahiptir. Pembe ZrSiO₄ [Fe₂O₃] ve kırmızı ZrSiO₄ [Cd(S, Se)] gibi *tıkalı pigmentler* çekirdek kabuk yapıları tahrip olacağı için öğütülemez. Isıya duyarlı pigment, sır ve bünye sıvı fazlarıyla temas eder. *İdiokromatik pigmentler* birim hacim başına pigment miktarı ve kromofor iyonlarının sıklığı yardımıyla tahmin edilebilir birim hacimdeki renk merkezlerinin yüksek derişimli olmalarını sağlayabilmek amacı ile mikro boyuta indirgenebilir yeşil renk mor ötesi Ca₃Cr₂Si₃O₁₂ ve mavi spinel CoAl₂O₄ gibi kromofor türü ana bileşiklerinden meydana gelmektedir. Sarı zirkon ZrSiO₄: Pr, turkuaz zirkon ZrSiO₄: V, bordo malahit CaSnSiO₅: Cr gibi renksiz bir yapı içinde katkı maddesi iyonları ile renk kazandırılmış *allokromatik pigmentler* renk mukavemetinde birim hacim başına idiokromatik pigmentlere kıyasla daha az sayıda renk merkezi taşıdıklarından önemli derecede bir renk kaybına uğramadan mikro boyuta getirilemezler [17].

4. Seramik Karo Tasarımı ve Uygulamaları

Bir tasarım ürünü olan seramik karo, çeşitli ebatlarda levha formunda üretilen, yer ve duvar kaplaması olarak binaların iç ve dış cephesinde kullanılan bir yapı malzemesi çeşididir. Seramik kaplama malzemesi üreticilerinin tasarımlarında doğayı taklit ve birebir benzerini üretme isteğinin (ağaç, tekstil, taş ve mermer dokusunun gerçeğe yakın görünümü) olduğu görülür. Üreticiler zaman zaman dünyanın farklı bölgelerinde bulunan, birbirinden değerli mermer örneklerinin yüzey ve renk özelliklerini yakalamak için günümüz yüzey tarama teknolojilerine başvurmakta, mermerin yanı sıra, ağaç, taş, duvar kâğıdı, hazır nesne, tekstil gibi malzemelerin görünümünü de kullanmak istemektedirler. Bu dokuların gerçeğe yakın renk ve yüzey özelliklerinin yakalanabilmesinde kullanılan bir makine Cruse tarayıcıdır. Cruse Dijital Imaging Equipment/Cruse tarayıcı, rölyef ve renk taraması yapan bir cihazdır. Rölyef taraması için 900–1200 dpi arası çözünürlükte, renk taraması için talep doğrultusunda 500–800 dpi çözünürlükte tarama yapmaktadır. Renk ve rölyef tarama işlemi sonrası gerekli grafik çalışmalar hazırlanır. Taraması yapılan yüzey genellikle mermer, taş, ahşap, tekstil, deri, doğada bulunan herhangi bir nesne, hazır malzeme vb. olmaktadır. Hazır herhangi bir malzemenin kullanılarak taranması yönteminin yerine sanatçı Şirin Koçak'ın seramik eserlerinin renk ve yüzey taramaları yapılarak iki boyutlu yer veya duvar karesi tasarımlarının eldesi ve ink-jet teknolojisi ile prototiplerinin oluşturulması amacıyla sanatçının eserleri incelenmiş, belli başlı eserler örnek olarak kullanılmıştır. Şirin Koçak'ın “Circle VII”, “Circle IX”, “Circle X”, “The Wall I”, “Yığın Serisi II” isimli eserleri Cruse tarayıcı ile taranarak yüzey ve renk özellikleri esas alınarak iki boyutlu karo tasarımları gerçekleştirilmiştir [8].



Şekil 5. “Circle IX ve X”, kalıp ile şekillendirilmiş, alkali sır uygulanmış, fırça dekorlu, 1150 °C’de pişirilmiş stoneware (çap: 26 cm, yükseklik: 12 cm) 2015 [8]



Şekil 6. (a) “Circle VII”, (b) “Circle VII detay, kalıp ile şekillendirilmiş, alkali sır uygulanmış, fırça dekorlu, 1150 °C’de pişirilmiş stoneware (çap: 26 cm, yükseklik: 20 cm) 2015 [8]

“Circle VII, IX ve X” isimli eserlerinden yola çıkarak Gülsüm Kahraman Yıldırım’ın yaptığı duvar kerosu tasarımlarına bakıldığında Cruse tarayıcıda taranan eser biçimlerinin birebir kullanıldığı görülür. Biçimlerin yan yana getirilerek modüler sistem dâhilinde çoğaltılması ve duvarlarda uygulaması gerçekleştirilmiştir. Renk ve desen yoğunluğu göz önünde bulundurularak eserlerden elde edilen çizgisel hareketlerin Şekil 7’de görüldüğü gibi mekân duvarının merkezinde kullanılmasına karar verilmiştir. Böylece mekân içinde yer alan tasarımın odak noktasının oluşumuna katkıda bulunulmuştur. Aynı isimli eserlerden hareketle Melike Nükte’nin gerçekleştirdiği karo tasarımlarında ise daha yalın bir ifade kullanılmıştır. Şekil 8’de ki tasarımlarda “Circle VII, IX ve X” isimli eserlerin sırlarında görünen pastel tonlar tercih edilmiştir. Eserlerde uygulanan fırça dekorunun küçük birimleri kullanılarak çoğaltma yöntemi ile sade biçimler oluşturulmuştur [8].

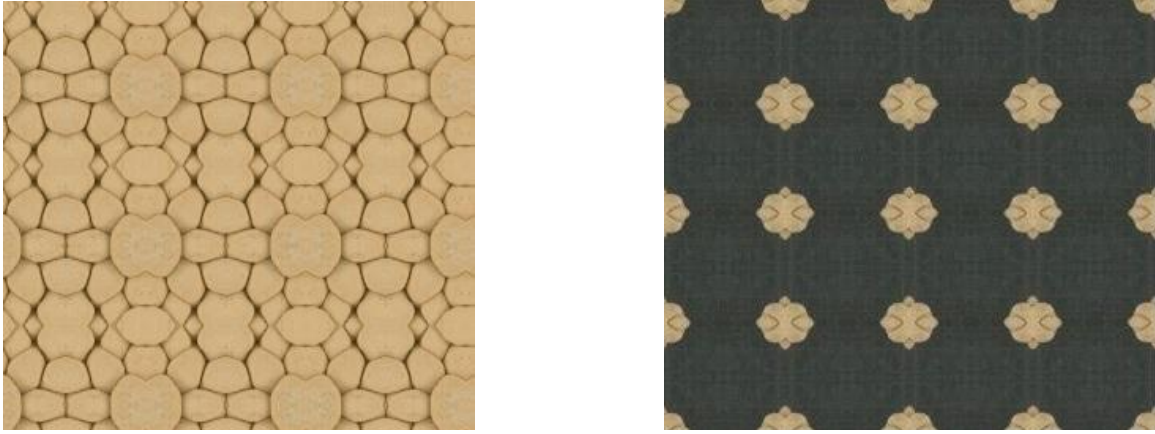


Şekil 7. Şirin Koçak’ın “Circle VII, IX ve X” isimli eserlerinden hareketle Gülsüm Kahraman Yıldırım’ın yaptığı duvar kerosu tasarımları [8]



Şekil 8. Şirin Koçak'ın "Circle VII, IX ve X" isimli eserlerinden yola çıkarak Melike Nükte'nin yaptığı karo tasarımları [8]

"The Wall I" isimli eserde irdelenen kavram olan duvar, ilk çağlardan beri sınırları belirleyen mimari eleman olarak kullanılmıştır. İç ve dış arasındaki çizgiyi tanımlayan duvar, yatay ve dikey sınırları meydana getirir, ses ve görüntü geçirgenliğini ortadan kaldırır ve yarattığı mekân/alanı betimler. Tehditlere karşı korunma, saklanma güdüsü ile kendine ait mekânları yaratma isteği ile oluşturulan eser, sanatçının parmak izlerinin görünürlüğü ile kimlik ve kültür kavramları hakkında da sorgulamalar yapmaktadır [8].



Şekil 9. Şirin Koçak'ın "Yığın Serisi II" isimli eserinden hareketle Melike Nükte'nin yaptığı karo tasarımlarının ink-jet baskı teknolojisi ile gerçekleştirilen örnekleri [8]

5. Dijital Baskı Sistemleri

Bugün itibariyle seramik kaplama endüstrisinde ulaşılan son nokta desen aktarma teknolojisi, dijital baskılardır. Bu tür sistemler, bir bilgisayar komutasında renkli yazıcı mantığında çalışırlar. Dijital baskı sistemlerinin en önemli özelliği, yazıcının ebadı ve boya ihtivasıdır. Boya içeriği, nano boyutlarda işlenmiş pigment ve çözücü solüsyonundan oluşur. Bu üretim teknolojisi yeteneklerini, esnekliğini, verimliliğini, çevreye saygısını, ama en önemlisi tasarımcı sıfatıyla çalışan personelin başrole geçmesini sağlayan harika bir üretim çözümdür. Dijital makinelerle dekorlanacak karo hiç bir şekilde birbirine temas etmez. Desen, yüzlerce enjeksiyondan oluşan kafalar ile püskürme yoluyla karo yüzeyine aktarılır. Dolayısıyla, karo ham mukavemetinin çok fazla önemi kalmaz ve daha az nitelikli killerden karo bünyesi oluşturmakta hiçbir sakınca yoktur [18].

Süreç öncelikle tasarım laboratuvarında başlar. Çalışacak desen Adobe Photoshop formatında hazırlanır. Renk oluşumu diğer tüm teknolojilerin tersine tamamen tasarımcının kabiliyet, disiplin ve estetik duruşu ile ilgilidir. Ürünün rengi ve tonu, desen netliği tasarımcı tarafından hazırlanır.



Şekil 10. Dijital baskı makinesinin görüntüsü

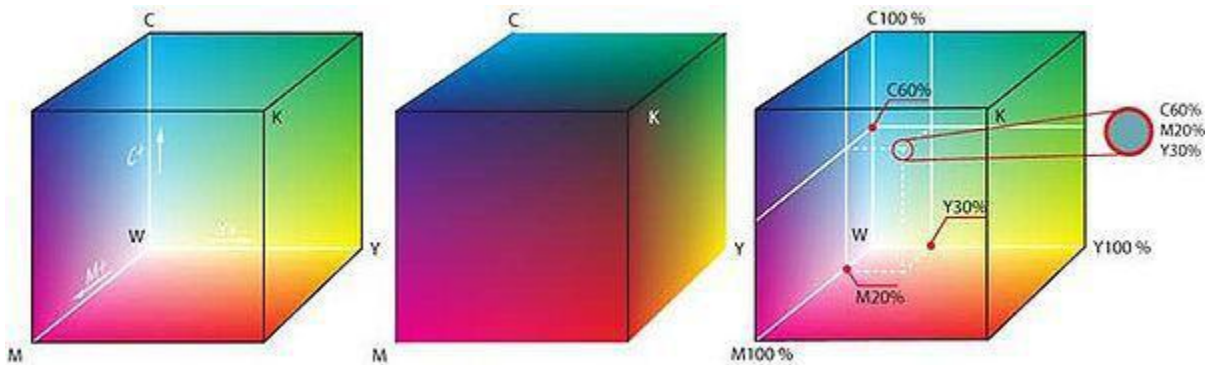


Şekil 11. Dijital baskı makinelerinin baskı kafaları

Desen sisteme taşınabilir bellek ile tanıtılır veya tasarımcı bilgisayarını ile sistem arasında ağ bağlantısı kurularak tanıtılabilir. Sistem, gelişmiş bir program yazılımı, halı band, enjeksiyonlu kafalar ve her kafaya ait mürekkep tankından oluşur.

CMYK, baskıda dört temel işlem renginin kısaltmasıdır [Cyan, Magenta Yellow, Key (black)]. Bu işlemde, mavi, kırmızı, sarı ve siyah renk üst üste basılır. Işık tabanlı RGB formatında ise, temel renk sayısı üçtür. Pigment (boya) tabanlı bir renk uzayı olan CMYK' da ise bu rakamın dörde çıktığı görülür. Renkler şunlardır:

- Cyan: Turkuaz
- Magenta: Galibarda (mor/siklamen)
- Yellow: Sarı
- Key (black): Siyah



Şekil 12. İlgili renk yelpazesi

CMYK özellikle yazıcılar ve matbaalar için geliştirilen bir renk uzayı olmasına karşın, turuncu gibi bazı renklerin basımında tatmin edici sonuçlar vermemektedir. Yeşil gibi ana ve yaygın bir rengin, camgöbeği ve sarı bileşenlerinin karışımıyla eldesinden dolayı CMYK "pahalı" bir baskı teknolojisi şeklinde yorumlanmaktadır. Dolayısıyla, günümüz matbaacılığında giderek artan bir şekilde altı renkli Hexacrome ya da CMYKOG adı verilen yeni standart kullanılmaktadır [18].

Yukarıda incelenen rotatif sistemlerde ki gibi; tasarımcı ve mühendis kanalları üretime uygun şekilde hazırlar. İlk nesil dijital sistemlerde KEY 63 (siyah) mevcut değildi ancak günümüzde sistemin daha da gelişmesiyle siyah rengin kullanımına olanak sağlanmaktadır [18].

5.1. Teknolojinin avantaj ve dezavantajları

Avantajları:

- Cihaz çalışma prensibi gereği desen alanı merkezli ve karo formuna göre (kare, dikdörtgen, altıgen gibi) tasarımcı tarafından “kenardan kenara (edge to edge)” hazırlandığından diğer tüm teknolojilere göre kullanıcılara emsalsiz bir çalışma yeteneği sunar.
- Üzerine desen aktarılacak karo ve cihaz birbirlerine temas etmediğinden ve desen püskürtülerek elde edildiğinden son derece derin rölyef karolarına yüksek çözünürlükte ürünler geliştirebilme şansı ve yeteneği sağlar.
- Ürün geliştirme süreci artık tasarım laboratuvarında yapıldığı için ürün geliştirme son derece pratik, çabuk ve kolay bir hal alır.
- Aynı şekilde ürün devreye alma da aynı hızda olacağından maliyet muhasebesinde en önemli aktörlerden birisi olan fırın boşluğu da minimize edilecektir.
- Karo makineye temas etmediği için daha az nitelikli hammaddeler süreçte kullanılabilir.
- Diğer teknolojilere göre daha az personel ihtiyacı söz konusudur ve sonuçta personel tasarrufu sağlanır.
- Diğer teknolojilere göre çok daha hızlı çalışabildiği için enerji ve kapasiteden avantaj sağlanması ve son olarak üretimde “ürün devreye alma” konusunda sıkıntı oluşmaması, lojistiğe pozitif destek, müşteri odaklılık konusunda esneklik sağladığı için son derece ekonomik, verimli bir teknolojidir.
- Minimum atık çıkışı ile çevreye saygılı bir teknolojidir.
- Esnek üretim sunar ve üretimlerin en büyük sıkıntılarının biri olan minimum “renk tonu” ile üretim yapma imkânı elde edilir.
- Diğer tüm teknolojilere göre mukayese kabul edilemeyecek kadar estetik ürünler üretilir. Tüketiciye farklı, rafine ürünler sunma imkânı tanır.
- Bir üretim sürecinde “estetik eğitim almış” “tasarımcı” personelin ön plana çıkmasına olanak tanır; bu da o sürecin dışarıya bağımlılığını minimize eder [18].

Dezavantajları:

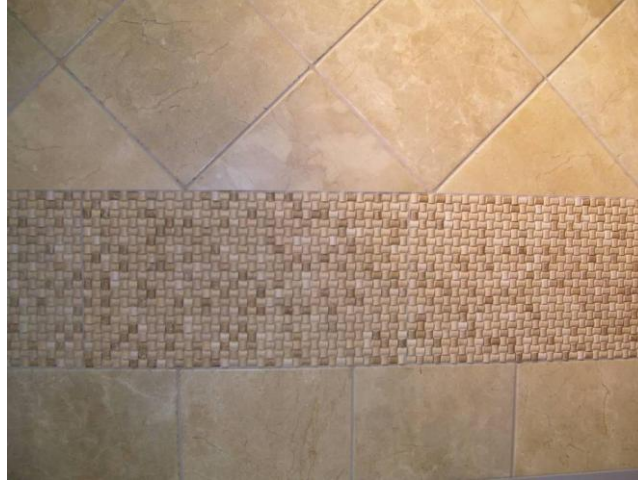
- Yatırım maliyeti günümüz itibarıyla yüksektir. Sistem fazlasıyla elektronik olduğu için bakım/onarım konusu ilgili personelin bu teknolojiye dair yetiştirme süresi göz önüne alındığında temel bakımları zamanında ve tam yapmak gerekmektedir. Aksi takdirde bakım ve onarım dışarıya bağımlı olacak ve son derece yüksek faturaları beraberinde getirebilecektir.
- İlgili üretimden çok az ama öz hata gelir. Her bir baskı kafasını oluşturan yüzlerce enjektör bazen mürekkep veya ortam tozundan tıkanabilir. Tıkanıldığında ise desen üzerinde baskı yapılmamış bir çizgi hatası ortaya çıkar. Neticede, sistemin bulunduğu mekânı tozdan arındırmak ve odanın ısısını sabit tutmak gerekir [18].



Şekil 13. Dijital baskı tekniğiyle geliştirilen karo



Şekil 14. Dijital baskı tekniğiyle geliştirilen duvar karosu



Şekil 15. Dijital baskı tekniğiyle geliştirilen yer-duvar karosu

6. Dijital Dekorasyon Üzerine Gerçekleştirilen Son Dönem Çalışmaları

Bir İtalyan araştırma firması Bolonya Üniversitesi, Endüstriyel Kimya Bölümüyle birlikte TILJET adını verdikleri, geleneksel olmayan, belli kalınlıktaki yüzeylere uygulanabilir yeni bir ink-jet teknolojisi geliştirmişlerdir [19]. Holman ve ark. [20] polimerik çözeltiyi ink-jet baskılamayla porlu bir seramik altlık üzerine uygulayıp yüzey adsorpsiyon özelliklerini incelemişlerdir.

Beyaz seramiklerin dekorasyonu amacıyla kullanılacak sulu pigmentlerin hazırlanmasıyla ilgili yaptıkları çalışmada Obata ve ark. mürekkep püskürtme teknolojisinin başarısının hazırlanacak mürekkeplerin reolojik özelliklerine bağlı olduğunu belirterek, pigmentlerin üretimiyle ilgili en uygun şartların tespiti için çeşitli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Hazırlanan sıvı karışımların akışkanlığının sıvı ortam içerisindeki taneciklerin elektrostatik özelliklerine bağlı olduğu ve pH artışıyla birlikte parçacıkların zeta potansiyelinin negatif değerlere ulaşarak akışkanlığın arttırıldığı belirlenmiştir. Kullanılan dağıtıcı katkı miktarının artışının parçacıklar üzerine tutunma miktarını arttırması nedeniyle elektrostatik itme potansiyelini arttırması ile ağırlığın düştüğü belirtilmiştir. Yapılan çalışmalarda uygun dağıtıcı katkı oranının ağırlıkça % 0,2–0,3 aralığında olduğu tespit edilmiştir [21].

Son yıllarda seramik mürekkeplerini seramik ink-jet teknolojisiyle kullanarak özellikle sensör ve yakıt hücrelerinin yapımında faydalanılacak seramik bileşenlerini üretme fikri araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu bağlamda, Ramakrishnan ve ark. etil alkol içerisine değişen oranlarda ayrı ayrı alümina ve zirkonya tozu ekleyerek hazırladıkları mürekkeplerde damla oluşumu, ejeksiyon, hız ve akış mekanizmasını anlamaya çalışmışlardır [22].

Krishna Prasad ve ark. alümina-etanol ve zirkonya-etanol seramik mürekkeplerini üreterek ağırlık, paketleme yoğunluğu ve dağılıma özelliklerini irdelemiştir. Elde edilen sonuçlarda özellikle dağıtıcı miktarının görünür ağırlık ve paketleme yoğunluğu üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır [23].

Cavalcante ve ark. seramik karoların ink-jet dekorasyon tekniği için geliştirilmiş CoAl_2O_4 , Au, (Ti, Cr, Sb) O_2 , CoFe_2O_4 nano-pigmentlerinin DRS, XRD ve kalorimetreye renk mekanizmalarını ve performanslarını incelemişlerdir [24].

Hutchings yapmış olduğu yayında ink-jet baskının temel prensiplerini göz önüne sermiş ve bu sürecin seramik karoların endüstriyel anlamda dekorlanmasına uygun hale getiren özelliklerini tartışmıştır [3]. Singh ve ark. organik ince film transistörleri, ışık yayan diodlar, güneş hücreleri, iletken yapılar, hafıza gereçleri, sensörler ve biyolojik/farmakolojik konuları da kapsar şekilde ink-

jet baskı teknolojisi ve uygulaması üzerine yaşanan son gelişmeleri yayımlamışlardır [7]. Hud ink-jet baskı teknolojileri ve Magdassi mürekkep gereksinimleriyle formülasyonları üzerine bir kitap bölümü kaleme almışlardır [25].

Derby seramik bileşenlerin üretiminde kullanılan ink-jet baskının başarılı olabilmesinin akış özellikleri ve damla konumunun hassasiyeti gibi belli başlı bir dizi şartı sağlaması gerektiğini vurgulamıştır [26].

Dondi ve ark. seramiklerin dekorasyonunda renklendiricilerden mürekkepe doğru yöneltişte ink-jet baskı için gerekli reolojik özellikler, yüzey gerilimi, zeta potansiyel, sedimentasyon, damlacık boyut ve şekli, penetrasyon kinetiği, tane boyutu, elektrik ve manyetik özelliklerin kontrolü, organik ortamdaki kararlılık ve iyileştirilmiş renk şiddeti gibi gereksinimlere değinmişlerdir [17].

Milattan önceki yıllardan bu yana çeşitli ürün renklendirme işlemlerinde faydalanılan soy metallerin seramik dekorasyon işlemlerinde kullanımı, püskürtmeli baskılama yönteminde altın nano-pigmentler ile gerçekleşmektedir. Altın fiyatının çok yüksek olması, bir alternatif olarak gümüşün kullanımına yönelmesine yol açmıştır ki, bu iki metalin birlikte kullanımı çeşitli optik avantajlar da sağlamaktadır. Blosi ve ark. seramik renklendirici olarak altın, gümüş ve altın-gümüş ikililerinin yer aldığı nano-süspansiyonlar geliştirmek için mikro dalga destekli bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Uyguladıkları bu çevre dostu yöntem ve süspansiyonların uzun ömürlü oluşu sayesinde altın-gümüş bimetalik nano-süspansiyonların kullanımını yaygınlaştıracak avantajlar ortaya konulmuştur. Bu pigmentler sayesinde farklı tonlarda kırmızı rengin gerek saydam, gerekse opak sıklarda elde edilebildiği belirtilmiştir [27].

Piyasada yüksek kaliteli, hızlı ve daha enerji etkin profesyonel yazıcılara olan talep sürekli artmaktadır. İsteğe göre damlacık (Drop-on-Demand-DoD) ink-jet baskı son dönemlerin en çok dikkate alınan baskı teknolojilerinden biridir. Hız, sessiz çalışma, pek çok baskı koşuluna uyumluluk gibi pek çok avantaj sunmaktadır. Yüksek hızda basım yapılırken yaşanabilecek düşük basım kalitesinin üstesinden gelmek üzere Ezzeldin ve ark. DoD ink-jet baskı kafalarına yönelik deney- esaslı bir besleme kontrolünü çalışmışlardır [28].

Solana ink-jet dekorasyonu ile bağlantılı teknolojileri tanımlarken baskı kafası işlemlerine, damlacık ve nokta oluşumuna ve temel baskı bileşenlerine değinmiştir [13].

İnk-jet baskı yöntemini kullanarak seramik bileşenlerin eldesinde nihai ürün 10-100 pL aralığında değişen damlacıkların etkileşimi ve katılaşması neticesinde elde edilmektedir. Belirtilen bu hedefi tutturmak üzere spesifik teknolojik koşulları sağlayan kararlı seramik mürekkeplerinin geliştirilmesi gerekmiştir. Derby ilgili konuda bir makale yayımlamıştır [15]. Jovani ve ark. püskürtmeli baskılama tekniğinde kullanılmak üzere mikro-emülsiyon aracılıklı solvotermal metot ile Cr ve Sb katkılı TiO₂ seramik pigmentleri hazırlamıştır. İlgili yöntemde faz ve parçacık boyutunun kontrol edilebiliyor olması, bu özelliklerin yüksek sıcaklıkta seramik üzerindeki renge etkilerinin gözlemlenmesine izin vermektedir. Çalışma kapsamında 180 °C tek fazlı (anataz veya rutil) katı çözeltiler elde edilmiştir. Her iki fazda da ortalama boyutu 600 nm ve zeta potansiyeli -57 mV olan küresel parçacıklar üretilmiştir. Sırlar üzerinde yapılan uygulamalarda turuncu rengin korunduğu gözlenmiş, dolayısıyla boyut, renk ve elektrostatik kararlılık bakımından üretilen bu pigmentlerin turuncu renk pigmenti olarak kullanımının önemli bir potansiyel sergilediği belirtilmiştir [29]. Peymannia ve ark. nano-CoAl₂O₄ seramik ink-jet mürekkeplerinin fiziksel özellikleri üzerine farklı dağıtıcıların etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada, nano-CoAl₂O₄ pigmentleri çöktürme yöntemiyle sentezlenmiştir. Mürekkepler, sodyum dodesil sülfat (SDS), setil tri metil amonyum bromit (CTAB), polioksi etil oktil fenil eter (Triton X-100) ve poliakril asit-co-itakonik asit (AA-CO-IA) kullanılarak hazırlanmıştır. Poliakril asit-co-itakonik asit (AA-CO-IA) en iyi dağıtıcı olarak bulunmuştur. Hazırlanan seramik mürekkebinin ağırlığının ve yüzey geriliminin, ink-jet

yazıcıları için istenen aralıkta olduğu tespit edilmiştir [30]. Seramik karoların dekorasyonunda ink-jet baskı kullanımı her geçen gün artmaktadır. Mürekkepler geleneksel seramik pigment tanecik çaplarının 0,2–0,6 mm'ye mikronize edilmesi yoluyla üretilmektedirler. Güngör ve ark. da böylesi bir mikronizasyon işleminin pigment tanecik boyu, şekli ve spesifik yüzey alanının nasıl etkilediğini açıklamaya gayret etmişlerdir [31]. Zanelli ve ark. ink-jet yazıcılarda mikronize seramik pigmentlerin faz bileşimi ve renk üzerine etkisini çalışmışlardır. Endüstriyel pigmentler seçilmiştir: Cr–Sb katkılı rutil (turuncu–sarı), Co–Cr–Fe–Mn–Ni spinel (siyah) ve V–katkılı zirkon (turkuaz–mavi). Yüzey alanının artışıyla pigment–sır tepkime hızının arttığı ve camlaşma yüzünden pigment kaybının yaşandığı rapor edilmiştir [32]. Akdemir ve Özel araştırmalarında, ink-jet dekorasyonun en önemli bileşeni olan mürekkeplerin hazırlanmasında kullanılmak üzere yoğun mavi renkli Co–alüminat (CoAl_2O_4) pigmentlerinin uygun öğütme koşulları sağlanarak mikron altı boyuta öğütülmesi ve renk özelliklerinin incelenmesini amaçlamışlardır. Bu kapsamda geleneksel seramik yöntemiyle üretilen Co–alüminat (CoAl_2O_4) pigmenti, öğütme parametrelerinin etkisi incelenerek mikron altı boyuta öğütülmüştür ve öğütme işleminin pigmentlerin renk özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Pigment tozlarının tane boyutu azaldıkça renk tonunda maviden turkuaza doğru bir değişim tespit edilmiştir. Ancak bu değişim, pişirim sonrasında rengin kromasını önemli derecede etkilememiştir [33]. Güngör çalışmasında, çözücü esaslı mürekkeplerin yerine çevre dostu su esaslı mürekkeplerin kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Bu amaca yönelik olarak, üç farklı pigmentin öğütülmesi ve koloidal özelliklerinin su esaslı mürekkepler için uygunluğu konusunda araştırma yapılmıştır. Turkuaz pigmentlerin en etkili öğünen pigment olduğu ve turuncu pigmentin en fazla plastik deformasyona uğradığı gözlemlenmiştir. Farklı üç renkteki su esaslı pigment süspansiyonları mikron altı boyuta öğütülmüş ve elektro–kimyasal açıdan kararlı ve teorik açıdan baskıya uygun süspansiyonlar elde edilmiştir. Renk şiddetinde düşüş ve aşırı öğünme sonucu kristal yapıda farklı oranlarda deformasyon ve jelleşme sorunları ile karşılaşmıştır [34]. Pan ve ark. seramik mürekkeplerin sol–jel, tersinir mikro–emülsiyon, hidro–termal ve mekanik öğütme gibi farklı yöntemlerle hazırlanan seramik mürekkeplerin son dönem gelişmeleri üzerine bir derleme yazısı hazırlamışlardır [16]. Ink-jet baskı sentezi nano teknoloji ve malzeme biliminde işlevsel metal oksitlerin üretiminde gayet faydalı bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. Liu ve ark. bu tür uygulamalarda kullanılan özel mürekkep formülasyonlarına dair bir derleme makalesi yayımlamışlardır [35].

Montorsi ve ark. karo dekorasyonlarının kalitesini renk ve yüzey hataları kapsamında değerlendirmek üzere kurutucu çıkışındaki yeşil parçanın sıcaklığı, astarın, sırn ve camın miktarı, yazıcının çözünürlüğü, sırn çeşidi ve pişirme döngüsünün maksimum sıcaklığı gibi verileri esas alarak deney tasarımı metodunu uygulayarak kapsamlı bir araştırma gerçekleştirmiştir. Yapılan çalışma sonucunda seramik karolardaki renk kalitesinin ağırlıklı olarak yazıcının çözünürlüğüne bağlı olduğu, ancak seçilen deney değişkenlerinin yüzey hataları üzerinde bilinenler dışında neredeyse hiçbir etkide bulunmadığı tespit edilmiştir [1]. Yalnızca saf su ve ağırlık dengileyici olarak mono etilen glikol (MEG) kullanılan seramik mürekkeplerinin püskürtmeli baskılama uygulamalarındaki uygulanabilirliği ve kararlılığı Güngör ve ark. tarafından incelenmiştir. Fiziksel ve reolojik özelliklerin üzerinde durulduğu çalışmada turkuaz zirkon, turuncu rutil ve siyah spinel çözeltileri hazırlanmıştır. MEG kullanımının ağırlığı arttırdığına ve yüzey gerilimini de düşürdüğüne, zirkon ve rutilin Newtonyan sıvı davranışı sergilerken spinelin psüdoplastik özellik gösterdiğine, dağıtıcı kullanımının süspansiyon kararlılığını arttırdığına, zirkon ve rutilin benzer çökme özellikleri sergilerken spinelin düzensiz çökme gösterdiğine değinilmiştir [36]. Ferrari ve Zannini seramik dekorasyonunda yaygın kullanılan bir dizi gereç ve dijital mürekkeple çalışarak organik bileşenleri belirlemek için FTIR spektrometresi ve ısı davranışlarını anlamak için de TG–DTA analizlerini gerçekleştirmişlerdir [4]. Soleimani–Gorgani ink-jet baskı tekniği hakkında genel bilgiler içeren bir kitap bölümünü kaleme almıştır [37]. Bienia ve ark. seramik koloidal süspansiyonlarla ink-jet baskılamada filaman büyümesi ve kopması üzerine incelemeler yapmışlardır [38].

Araştırılması gereken en önemli özelliklerden biri yeni nesil mürekkeplerin seramik malzemelerin üretimi sırasında bacalardaki toplam yayılım (emisyon) üzerine etkisidir. Ferrari ve Zannini bir dizi ticari mürekkep ve kullanılan araçlardan kaynaklı emisyonun karakterizasyonu üzerine yaptıkları çalışmanın bulgularını paylaşmıştır. Kullanılan yöntem; örneklerin propter ateşlemesi ile biriktirilmesi ve sonrasında GC-MS analizi üzerine kuruludur. TG-DTA analizleri ile mürekkep ve kullanılan araçların ısıl davranışları incelenerek çalışmanın kapsamı genişletilmiştir [39].

Baskı kafası hazırlama teknolojisinde kaydedilen ilerlemeler neticesinde, ink-jet pazarına yönelik yeni dekoratif mürekkepler gittikçe daha kullanışlı hal almaktadır. Mor ötesi kür mürekkepleri, litografi, ekran baskısı ve fleksografide kullanılmaktadır. Piezo ink-jet kafa teknolojisindeki gelişmeler, daha yüksek hızlarda, daha büyük pigment boyutlarıyla baskı yapabilmeye ve sadece mor ötesi ışığı altında görülebilecek metalik-parlak-beyaz-flüoresan ve güvenlik baskı mürekkepleri hakkındaki gelişmeler de önemli diğer etkenlerdir [40].

Hong ve ark. doğrudan mürekkep püskürtmeli baskılama yöntemini kullanarak nadir toprak elementleri ile aktive olan YAG seramiklerine dayalı minyatür sintilatörlerin üretimini göstermeye odaklanmıştır. Aktivatör olarak Erbium (Er) seçilerek hidroliz ve çoklu-yoğuşma tepkimeleri altında YAG sol-jel öncü mürekkepleri hazırlanmış, reoloji ve yüzey gerilimi üzerinde mükemmel bir kontrol sağlanarak iyi derecede basılabilirlik yetisi kazanılmıştır. Mürekkep püskürtmeli baskılama sürecinde ortaya çıkan en önemli zorluklardan biri de hat kararlılığıdır. Baskılamada çizgi kararlılığı, baskı sıklığına, damla aralığına ve alt tabaka sıcaklığına büyük ölçüde bağlıdır [41].

Mürekkep püskürtmeli baskı, yaygın halde tercih edilen bir yöntemdir. Ancak bazen renk tekrarlanabilirliği kaybolabilmektedir. Genome ve ark. mürekkep kontrastının baskılanan nesnenin renk fazı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Nesne yüzeyi üzerinde radyasyon transfer denklemi kurularak renk için sayısal hesap yapılmış, baskılanan numunelerin nokta alan değerleri ve spektral yansımaları ölçülmüştür. Ayrıca, farklı nokta alan değerlerine sahip olacak şekilde baskılanan numunelerin teorik spektral yansımaları hesaplanmıştır. Nokta alan oranlarına bağlı olarak renk tonu değişimi tespit edilmiştir [42].

Rahul ve ark. kalın seramik kaplamalı cam malzemelerin üretimine yönelik ink-jet baskılama süreçleri için en uygun değişkenleri belirleyebilmek amacıyla ANOVA (*analysis of variance*) ve Taguchi optimizasyon tekniklerini kullanmışlardır [43].

Hwa ve ark. gözenekli seramik alanında gerçekleşen hızlı ilerlemelerin yanı sıra üç boyutlu (3D) baskılama ile gelecek zaman diliminde neler yapılabileceğine dair bir araştırma yapmışlar, gözenekli seramik malzemeler ile 3D baskılama teknolojisini birçok açıdan kıyaslamışlardır. 3D baskılama sürecindeki gelişim; toza ait tanecik boyutu, akışkanlık ve ıslanabilirlik gibi bazı fiziksel özellikler yardımıyla ifade edilmiştir [44].

Ke ve arkadaşları renk değiştirme özelliği sayesinde işlevsel bir pigment olduğunu ortaya koydukları neodimiyum disilikatı ($Nd_2Si_2O_7$) organik bir çözücü içerisinde mekanik öğütme yöntemi ile seramik mürekkebi formunda üretmiş ve dağıtıcıların tane boyutu dağılımına etkisi ile üretilen $Nd_2Si_2O_7$ 'nin reolojik özelliklerini araştırmışlardır. İzoparafin yağının çözücü olarak kullanıldığı çalışmada sodyum dodesil benzen sülfonat (SDS) iyonik dağıtıcı, polioksi etilen sorbitan mono oleat (PSM) iyonik olmayan dağıtıcı şeklinde tercih edilmiştir. Elde edilen sonuçlar uzun zincir yapıları PSM'nin kısa zincir yapıları SDS'ye göre tanecik toplanmasını daha etkin şekilde engellediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, PSM'nin ağıdalığı azaltıcı etkide bulunduğu belirlenmiş, en uygun PSM oranı ise % 5 olarak verilmiştir [45].

Wijshoff mürekkep püskürtmeli baskı süreci için farklı uzunluk ve ölçeklerde pek çok fiziksel etki alanı içerisinde bir süreçler zinciri olduğunu vurgulayarak istenilen hacim ve akma hızına sahip her tür akışkan damlacık birikiminin nihai bir amaç olduğunu belirtmiştir. Bu yüzden, deneysel çalışmalar ile sayısal teknikleri harmanlayarak süreç zinciri ardındaki fizik üzerine araştırmalar yapmıştır [46].

Bilim ve endüstride, baskılı elektronik ürünlere artan bir ilgi mevcuttur. Bu elektronik ürünler, maliyeti yüksek elektronik bileşenlerin yerine düşük maliyetli bileşenlerin kullanımına olanak sağlamaktadır [47].

Xie ve ark. ayçiçeği yağı sinerjist mikro-emülsiyon polimerizasyonu ile dağılımı oldukça yüksek boya moleküllerini içeren renkli polimerik nano-malzeme hazırlamıştır. Sonrasında, dijital ink-jet baskılama tekniği ile hazır haldeki renkli nano taneciklerle polyester kumaşlar üzerine kaplama yaparak bir uygulama gerçekleştirmişlerdir. Bu boya içerikli polimerik nano taneciklerin yapı ve morfolojileri, FTIR, SEM, TEM ve XRD analizleri vasıtasıyla incelenmiştir [48].

Chen ve ark. mürekkep püskürtmeli baskılama tabakası hazırlamak için çekirdek kabuk yapısına bağlı bir kompozit malzeme geliştirip uygulamışlar, XPS, zeta potansiyel, XRD ve SEM analizleri ile karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Çekirdek kabuk yapısı ile silisin dağılması kolaylaşmış, böylece mürekkep emme performansında artış sağlanarak net bir şekilde baskı görüntüsü elde edilmiştir [49].

Ngo ve ark. üç boyutlu baskılama tekniğinin temel avantajlarını: tasarım serbestliği, müşteri eksenli üretim yapılabilmesi, atık miktarının en aza indirgenebilmesi, karmaşık yapıların üretilebilir olması ve hızlı bir şekilde ilk örnek çalışması yapılabilmesi şeklinde ifade etmişler, biyomedikal, havacılık, bina ve koruyucu yapılarıdaki uygulamaları etrafı bir şekilde tartışmışlardır [50]. Hwa ve ark. maliyet ve üretim hızı bakımından rekabetçi bir sistem olan 3D baskı teknolojisini kullanarak kil esaslı malzemeler üzerinde çeşitli incelemeler yürütmüşlerdir. Nijerya'dan temin edilen Kankara kil tozu ile ebatları 75, 150 ve 250 µm olacak şekilde toz numuneleri hazırlanıp 3D baskılama ile üretilen membran örneklerinde kullanılmışlardır. Sonrasında, güçlü ve gözenekli seramik membranlar 1300 °C'de sinterlenebilir hale getirilmiştir. Karakterizasyon için FE-SEM, VP-SEM ve diğer ilgili analizler yapılarak bazı fiziksel ve mekanik özellikler belirlenmiştir [51].

Kunchala ve Kappagantula baskılama sıvısı içerisine eklenen yoğunlaştırıcı özellikteki nano-taneciklerin, bağlayıcı püskürtme ile hazırlanmış seramik malzemelerin üretilebilirliği ve mekanik performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Nano-taneciklerin varlığı ile numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde belirgin değişimler yaşandığı tespit edilmiştir [52]. Yus ve ark. nano-tanecik benzeri yassı tanecikli su esaslı mürekkeplerin optimizasyonu ve geliştirilmesi üzerinde durmuşlardır. Ni(OH)₂ nano-tanecikleri, bir kararlaştırıcı olan PEI (poli etil enimin) ile birlikte su içerisinde dağıtılarak süspansiyon elde edilmiştir. DEG (di etil glikol) ve su ile bir başka karışım da hazırlanmıştır. Piezo-elektrik ink-jet baskılamada, uygun ağırlık ve yüzey gerilimi sergileyen bu karışımın kullanılması sonucu nano-yassı tanecik süspansiyonuna homojen püskürtülebilir akış davranışı kazandırılmıştır [53].

Chen ve ark. 3D baskılama teknolojisi olmadan rastgele karmaşık şekilli seramik bileşenlerini üretebilmenin son derece zor olduğunu vurgulayarak seramiklerin 3D teknolojisi ile baskılanabilmesi üzerine en son gelişmelere ve ilgili her tür tekniğin tarihsel kökenine araştırmalarında yer vermişlerdir. Enerji kaynağı malzemelerin etkileşimleri, son işlemler/iyileştirmeler, süreç kontrolü ve hammadde özellikleri dâhil önemli birtakım teknik konulara, ayrıca bazı teknik zorluklar ve tavsiyelere değinmişlerdir [54].

7. Sonuç

Mürekkep püskürtmeli baskı, nokta vuruşlu modellere göre daha sessiz çalışma ve fotoğraf kalitesinde renkli baskı yapabilme avantajlarına sahip bir yöntemdir. İnk-jet yazıcılar son yıllarda düşük maliyetlerini korumayı başararak fotoğraf kalitesinde baskı yapabilme yeteneği kazanmışlardır. Günümüzde, gıda, ilaç, kozmetik alanlarında, organik ince film transistörleri, ışık yayan diyotlar, güneş hücreleri, iletken yapılar, hafıza gereçleri, sensörler ve biyolojik/farmakolojik ögeler, otomobil parçaları, elektronik bileşenler, seramik ve cam dekorasyonu, taş ve ahşap ürünleri, borular ve tüpler, kablolar ve teller gibi pek çok endüstriyel uygulamada tercih edilen ve yaygın olarak kullanılan ink-jet baskı, mürekkeplerinin, üretim süreçlerinin ve yazıcılarının gelişimiyle hız kesmeden araştırılmakta, geliştirilmekte ve uygulanmaya devam edilmektedir.

Kaynaklar

- [1] Montorsi M., Mugoni C., Passalacqua A., Annovi A., Marani F., Fossa L., Capitani R., Manfredini T., Improvement of color quality and reduction of defects in the ink jet-printing technology for ceramic tiles production: A design of experiments, *Ceramics International*, 2016, 42: 1459–1469.
- [2] Berto A. M., Ceramic tiles: Above and beyond traditional applications, *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27, 2–3:1607–1613.
- [3] Hutchings I., Ink-jet printing for the decoration of ceramic tiles: Technology and opportunities, *Proceedings of Qualicer 2010, Castellón, 2010*, 1–17.
- [4] Ferrari G., Zannini P., Thermal behavior of vehicles and digital inks for inkjet decoration of ceramic tiles, *Thermochimica Acta*, 2016, 639: 41–46.
- [5] Watanabe O., Hibino T. & Sakakibara M., Development of an aqueous ink-jet printing system for ceramic tiles, *Ceramic Forum International*, 2012, 89 (5): 127.
- [6] Lee J. H., Formulation and characterization of black ceramic ink for a digital ink-jet printing, *Ceramics International*, 2018, 144: 4151–4157.
- [7] Singh M. H., Haverinen H. M., Dhagat P., Jabbour G. E., Inkjet printing-process and its applications, *Advanced Materials*, 2010, 22: 673–685.
- [8] Özeskici Ş. K., Avcıoğlu C., Nükte M., İnkjet dijital baskı teknolojisi ile deneysel seramik karo tasarımı ve uygulaması, *Dumlupınar Üniversitesi, Sosyal Bilimler Dergisi, Özel Sayı*, 2019, 67–80.
- [9] Küçüköğlü E., Kahverengi pigmentlerin inkjet mürekkepleri için öğütülmesi ve karakterizasyonu, *Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojileri Ana Bilim Dalı*, 2014.
- [10] Veri A., Glazing and decoration of ceramic tiles, *Acimac Sala, Modena*, 2014, 66–72.
- [11] Aufschneider N., Durst, Direct digital industrial printing technology: Development, production process and advantages for industrial ceramic tile decoration, *ACIMAC Notebooks: Digital Decoration of Ceramic Tiles, Acimac Sala, Modena*, 28–38, 2002.
- [12] Özel E., Küçüköğlü E., İnkjet mürekkeplerinde kullanılacak nano pigmentlerin atriör öğütme yoluyla elde edilmesi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2014, 14: 197–202.
- [13] Solana V. S., Inkjet printing technology for ceramic tile decoration, *Proceedings of Qualicer 2014, Castellón, 2014*.
- [14] Derby B., Additive manufacture of ceramics components by inkjet printing, *Engineering*, 2015, 1 (1): 113–123.
- [15] Derby B., Inkjet printing of functional and structural materials: Fluid property requirements, feature stability, and resolution, *Annu. Rev. Mater. Res.*, 2010, 40(1): 395–414.

- [16] Pan Z., Wang Y., Huang H., Ling Z., Dai Y., Ke S., Recent development on preparation of ceramic inks in ink-jet printing, *Ceramics International*, 2015, 41: 12515–12528.
- [17] Dondi M. Blosi M., Gardini D., Zanelli C., Ceramic pigment for dijital decoration inks: An overview, *Proceedings of Qualicer 2012, Castellón, 2012*, 1–12.
- [18] Kafadar A., Seramik kaplama sanayinde desen teknolojileri ve uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Güzel Sanatlar Enstitüsü, İzmir, 2012.
- [19] Non-conventional inkjet, *Smart Materials Bulletin*, 2002, p. 6.
- [20] Holman R. K., Uhland S. A., Cima M. J. and Sachs E., Surface adsorption effects in the inkjet printing of an aqueous polymer solution on a porous oxide ceramic substrate, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2002, 247: 266–274.
- [21] Obata S., Yokoyama H., Oishi T., Usui M., Sakurada O., & Hashiba M., Preparation of aqueous pigment slurry for decorating whiteware by ink jet printing, *Journal of Material Science*, 2004, 39 (7): 2581–2584.
- [22] Ramakrishnan N., Rajesh P. K., Ponnambalam P., Prakasan K., Studies on preparation of ceramic inks and simulation of drop formation and spread in direct ceramic inkjet printing, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 169: 372–381.
- [23] Krishna Prasad P. S. R., Venumadhav A. R., Rajesh P. K., Ponnambalam P., Prakasan K., Studies on rheology of ceramic inks and spread of ink droplets for direct ceramic ink jet printing, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 176: 222–229.
- [24] Cavalcante P. M. T., Dondi M., Guarini G., Raimondo M., Baldi G., Colour performance of ceramic nano-pigments, *Dyes and Pigments*, 2009, 80: 226–232.
- [25] Magdassi S., *The chemistry of inkjet inks*, World Scientific Publishing Co. Pte Ltd., Singapore, 2010.
- [26] Derby B., Inkjet printing ceramics: From drops to solid, *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31: 2543–2550.
- [27] Blosi M., Albonetti S., Gatti F., Baldi G., & Dondi M., Au–Ag nanoparticles as red pigment in ceramic inks for digital decoration, *Dyes and Pigments*, 2012, 94: 355–362.
- [28] Ezzeldin M., van den Bosch P. P. J., Weiland S., Experimental-based feedforward control for a DoD inkjet printhead, *Control Engineering Practice*, 2013 21: 940–952.
- [29] Jovaní M., Domingo M., Machado T. R., Elson Longo E., Beltrán-Mir H., Cordoncillo E., Pigments based on Cr and Sb doped TiO₂ prepared by microemulsion-mediated solvothermal synthesis for inkjet printing on ceramics, *Dyes and Pigments*, 2015, 116: 106–113.
- [30] Peymannia M., Soleimani-Gorgani A., Ghahari M., Jalili M., The effect of different dispersants on the physical properties of nano CoAl₂O₄ ceramic ink-jet ink, *Ceramics International*, 2015, 41 (7): 9115–9121.
- [31] Güngör G. L., Kara A., Blosi M., Gardini D., Guarini G., Zanelli C., Dondi M., Micronizing ceramic pigments for inkjet printing: Part I. Grindability and particle size distribution, *Ceramics International*, 2015, 41: 6498–6506.
- [32] Zanellia C., Güngör G. L., Kara A., Blosi M., Gardini D. Guarini G., Dondi M., Micronizing ceramic pigments for inkjet printing: Part II. Effect on phase composition and color, *Ceramics International*, 2015, 41: 6507–6517.
- [33] Akdemir S., Özel E., İnk-jet mürekkepleri için mavi Co-alüminat pigmentlerinin üretilmesi, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, 2015, Cilt 16: 3, 339–349.
- [34] Güngör G. L., Seramik karoların dekorasyonu için su bazlı inkjet mürekkeplerinin geliştirilmesi. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Seramik Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 2015.
- [35] Liu X., Tarn T.-J., Huang F., Fan J., Recent advances in inkjet printing synthesis of functional metal oxides, *Particuology*, 2015, 19: 1–13.
- [36] Güngör G. L., Kara A., Gardini D., Blosi M., Dondi M., & Zanelli C., Ink-jet printability of aqueous ceramic inks for digital decoration of ceramic tiles, *Dyes and Pigments*, 2016, 127: 148–154.

- [37] Soleimani–Gorgani A., Inkjet printing in Printing on Polymers. (<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-37468-2.00014-2>), Elsevier, 2016.
- [38] Bienia M., Lejeune M., Chambon M., Baco–Carles V., Dossou–Yovo C., Noguera R., Rossignol F., Inkjet printing of ceramic colloidal suspensions: Filament growth and breakup, *Chemical Engineering Science*, 2016, 149: 1–13.
- [39] Ferrari G., Zannini P., VOCs monitoring of new materials for ceramic tiles decoration: GC–MS analysis of emissions from common vehicles and inkjet inks during firing in laboratory, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2017, 56:226–236.
- [40] Parraman C., Colour printing techniques and new developments in colour printing, *Colour Design (Second Edition)*, 519–618, 2017.
- [41] Hong Y., Chen Z., Trofimov A. A., Lei J., Chen J., Yuan L., Zhu W., Xiao H., Xu D., Jacobsohn L. G., Kornev K. G., Bordia R. K., Peng F., Direct inkjet printing of miniaturized luminescent YAG: Er³⁺ from sol–gel precursor, *Optical Materials*, 2017, 68: 11–18.
- [42] Genomi H., Ishikawa Y., Kono T., Yamada J., Radiative transfer analysis of the effect of ink dot area on color phase in inkjet printing, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2017, 194: 17–23.
- [43] Rahul S. H., Balasubramanian K., Venkatesh S., Optimizing inkjet printing process to fabricate thick ceramic coatings, *Ceramics International*, 2017, 43(5): 4513–4519.
- [44] Hwa L. C., Rajoo S., Noor A. M., Ahmad N., Uday M. B., Recent advances in 3D printing of porous ceramics: A review, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 2017, 21(6): 323–347.
- [45] Ke S., Pan Z., Wang Y., Ning C., Zheng S. & Huang J., Preparation and characterization of neodymium disilicate ceramic ink by mechanical grinding, *Ceramics International*, 2018, 44: 836–842.
- [46] Wijshoff H., Drop dynamics in the inkjet printing process, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2018, 36: 2027.
- [47] Gebauer J. S., Mackert V., Ognjanović S., Winterer S. M., Tailoring metal oxide nanoparticle dispersions for inkjet printing, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, 526: 400–409.
- [48] Xie K., Tang J., Fu D., Zhang H., Gao A., Preparation of color polymeric nanomaterials containing dispersed dye by sunflower oil synergy and color transfer property by digital inkjet printing, *Progress in Organic Coatings*, 2018, 125: 195–200.
- [49] Chen Y. F., Jiang B., Liu L., Du Y., Zhang T., Zhao L. W., Huang Y. D., High ink absorption performance of inkjet printing based on SiO₂@Al₁₃ core–shell composites, *Applied Surface Science*, 2018, 436: 995–1002.
- [50] Ngo T. D., Kashani A., Imbalzano G., Nguyen K. T. Q., Hui D., Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges, *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143: 172–196.
- [51] Hwa L. C., Uday M.B., Ahmad N., Noor A. M., Rajoo S., Zakaria K. B., Integration and fabrication of the cheap ceramic membrane through 3D printing technology, *Materialstoday Communications*, 2018, 15:134–142.
- [52] Kunchala P., Kappagantula K., 3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers, *Materials & Design*, 2018, 155: 443–450.
- [53] Yus J., Gonzales Z., Sanchez–Herencia A.J., Sangiorgi A., Sangiorgi N., Gardini D., Sanson A., Galassi C., Caballero A., Morales J., Ferrari B., Semiconductor water–based inks: Miniaturized NiO pseudocapacitor electrodes by inkjet printing, *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39 (9): 2908–2914.
- [54] Chen Z., Li Z., Li J., Liu C., Lao C., Fu Y., Liu C., Li Y., Wang P., He Y., 3D printing of ceramics: A review, *Journal of the European Ceramic Society*, 2019, 39 (4): 661–687.