3B BASILABİLİR ELEKTRONİK DEVRELER İÇİN İLETKEN PARÇACIKSIZ GÜMÜŞ MÜREKKEP KULLANAN BİR EKLEMELİ İMALAT SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE BASIM KALİTESİNİN SOĞUK PLAZMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Altuğ BAKIRCI

T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

3B BASILABİLİR ELEKTRONİK DEVRELER İÇİN İLETKEN PARÇACIKSIZ GÜMÜŞ MÜREKKEP KULLANAN BİR EKLEMELİ İMALAT SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE BASIM KALİTESİNİN SOĞUK PLAZMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Altuğ BAKIRCI
0000-0003-0438-6337

Prof.Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR
0000-0003-0816-4029
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2025
Her Hakkı Saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

3B BASILABİLİR ELEKTRONİK DEVRELER İÇİN İLETKEN PARÇACIKSIZ GÜMÜŞ MÜREKKEP KULLANAN BİR EKLEMELİ İMALAT SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE BASIM KALİTESİNİN SOĞUK PLAZMA İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Altuğ BAKIRCI

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Geleneksel PCB üretim yöntemleri, seri üretime uygun olmakla beraber kişiye özel ürün tasarımı, hızlı prototipleme gereksinimi ve çevresel sürdürülebilirlik açısından yetersiz kalmaktadır. Bu çalışma, iletken nanoparçacık katkılı veya parçacıksız mürekkep püskürtmeli eklemeli imalat sistemleri üzerine odaklanarak, düşük maliyetli ve esnek elektronik üretimine yönelik özgün bir yaklaşım sunmaktadır. Çalışmada, suda çözünebilen parçacıksız metal-organik gümüş mürekkep sentezlenmiş; bu mürekkep, çalışma içerisinde tasarlanıp üretilen piezo kontrollü damlacık püskürtme kafası ile test edilmiştir. Mürekkebin yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümleri alınmıştır. %2 ve %2,5 gümüş içeren mürekkeplerle, 150–300 mm/dk hızlarda ve 1–7 katman arasında serici ve damla püskürtme olmak üzere iki yöntem tam faktöriyel içeren 8 deney (toplam: 56 farklı örnek) ile denenmiştir. En stabil ve tasarruflu sonuç serme yönteminin kullanıldığı, 300 mm/dk hızda, %2,5 gümüş içeren mürekkep ve 5 katmanla, 0,427 Ω direnç değeri ile elde edilmiştir. Çalışma dahilinde soğuk plazma cihazı yapılmıştır. Bu yapılan cihaz ile katmanlar arası soğuk plazma uygulamasıyla iletkenlik ve esneklik artırılmaya çalışılmıştır. Numuneler toplamda 10 adet farklı çap içeren (3-5-7-10-15-20-25-30-35-40 mm) silindirlere sarılarak esneklik performansı test edilmiştir. Mikroskopla hat çizgilerinin doğrusallığı ve kahve lekesi etkisi incelenmiş, optik profilometre ile 1'den 20 katmana kadar basılmış elektrotların yüzey profili ve kalınlık dağılımları analiz edilmiştir. Kapasitör devresi üretilerek bu devrenin direnç ve kapasitans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Katmanlar arası plazma uygulamasıyla sistemin iletkenlik ve mekanik dayanımının artırılması cihaz tasarımlarının yanında bu çalışmanın özgün yönünü oluşturmaktadır. Oluşturulan kapasitör devresinde plazma uygulaması sayesinde %44,75 malzeme tasarrufu sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Basılı elektronik, esnek elektronik, iletken mürekkep, parçacıksız mürekkep, gümüş mürekkep, soğuk plazma
2025, xxv + 205 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

DEVELOPMENT OF AN ADDITIVE MANUFACTURING SYSTEM THAT USES CONDUCTIVE PARTICLE-FREE SILVER INK FOR 3D PRINTED ELECTRONIC CIRCUITS AND IMPROVEMENT OF PRINTING QUALITY WITH COLD PLASMA

Altuğ BAKIRCI

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Prof. Dr. M. Cemal ÇAKIR

Conventional PCB manufacturing methods are well-suited for mass production, they fall short in addressing the growing demand for customised product design, rapid prototyping, and environmental concerns. This study presents a novel approach to cost-effective and flexible electronics manufacturing by focusing on inkjet-based additive manufacturing systems, utilizing both nanoparticle-enhanced and particle-free conductive inks. Water-based particle-free metal-organic silver ink was synthesized and tested using a piezoelectrically controlled drop-on-demand printhead specifically designed and developed. Surface tension and contact angle measurements of the ink were conducted. Two variants of the ink, containing 2% and 2.5% silver, were evaluated at print speeds between 150–300 mm/min using two distinct deposition methods: microplotting and inkjet printing. A full factorial design with eight experimental runs was applied (different 56 samples), testing 1 to 7 printed layers. The most stable and efficient result—a resistance of 0.427 Ω—was achieved using the microplotting method at 300 mm/min with the 2.5% silver ink five layers. A custom-built cold plasma device was employed to enhance interlayer conductivity and flexibility. Flexibility tests were conducted by wrapping samples around cylinders of varying diameters (3 to 40 mm). Linearity and the coffee-ring effect were analyzed under optical microscopy. Surface topology and thickness of exposed cold plasma and normal electrodes with 1 to 20 layers were measured using an optical profilometer. Capacitor circuit was created, and measurements of its capacitance and resistance were performed. Beyond the system design, the enhancement of conductivity and mechanical durability through interlayer plasma application constitutes the study's key innovation. Thanks to the plasma application in the created capacitor circuit, 44.75% material savings were achieved.

Key words: Printable electronics, flexible electronics, conductive ink, particle free ink, silver ink, cold plasma
2025, xxv + 205 pages.

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam boyunca yapmış olduğum tüm çalışmalarda bilgi birikimi ve deneyimi ile sabırlı bir şekilde bana yol gösteren ve her daim madden ve manen de yanımda olarak bana destek olan anlayışlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Prof. Dr. Mustafa Cemal ÇAKIR hocama teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam boyunca projemizde ve tez izleme komitesinde yer alan, elektronik alanındaki bilgisiyle de her daim yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Umut AYDEMİR hocama ve malzeme alanındaki değerli görüşlerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Agah UĞUZ hocama teşekkürlerimi sunarım.

Doktora çalışmam boyunca sanayi danışmanlığımı yapmış olan ve doktora öğrenimimin her aşamasında bilgisi, ilgisi ve firma içinde de projenin yürütülmesinde tam desteğini sunan değerli müdürüm Sayın Fatih ATEŞ'e ve doktora sürecim boyunca anlayışıyla desteklerini sunan şefim Sayın Onur KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çok değerli bilgileri ve maddi manevi destekleriyle sorularımı cevaplayıp ilgilenen elektrik elektronik mühendisi arkadaşlarım Hasan BOLAT'a ve gerekirse bizzat kollarını sıvayarak yardımcı olmaya çalışan, kaynaklarını seferber eden değerli arkadaşım Tugay DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca doktora sürecim boyunca anlayışlarıyla destek olan değerli arkadaşlarıma, üniversitedeki araştırmacı arkadaşlarıma, değerli meslektaşım Sayın Dr. Mehmet Kıvanç TURAN'a, değerli hocam Dr. Cihat ENSARİOĞLU'na ve değerli meslektaşım Sayın Dr. Melek ÇALIŞKAN TEMİZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın son safhasında bilgisi ve el marifetiyle yanımda bulunan değerli iş arkadaşım Emirhan KOÇ'a ve stajları sırasında isteklerimi kırmayarak yerine getiren Kadir KAYHAN ve Onur KORUKÇU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Üniversite ve sanayiyi bir araya getirerek doktora çalışmasının ortaya çıkmasına 2244 Projesi ile zemin hazırlayan ve burs desteğiyle projenin sürdürülebilirliğini sağlayan TUBİTAK'a ve Üniversite içerisinde gerekli çalışma alanlarını sunan Bursa Uludağ Üniversitesi ile bu projenin sanayi ayağını oluşturan desteklerini esirgemeyen Ermetal Otomotiv ailesine teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde benden desteklerini esirgemeyen gerekirse kendilerinden ödün vererek yola devam etmemi sağlayan, her gün ettikleri dualarla her an yanımda bulunan ve haklarını ödeyemeyeceğim çok değerli anne ve babama, manevi desteklerini ve anlayışlarını esirgemeyen değerli ağabeyim ve ablama teşekkürlerimi sunarım.

Altuğ BAKIRCI
17/06/2025

Bu tez çalışması TÜBİTAK 2244 Üniversite-Sanayi İşbirliği programı kapsamında, TÜBİTAK ve Ermetal Otomotiv ve Eşya Sanayi Ticaret A.Ş tarafından 118C125 numaralı proje ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	viii
ABSTRACT	ix
TEŞEKKÜR	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI	7
2.1. Mikropompa	19
2.2. Nanoparçacık Katkılı İletken Mürekkep	30
2.3. Nanaparçacıklı Mürekkep için Islak Bilyalı Öğütme	34
2.4. Parçacıksız Mürekkepler	35
2.5. Damla Oluşumunda Dalga Formunun Etkisi	41
2.6. Üretim ile İlgili Problemler	44
2.7. Mikro Serici Sistemi	47
2.8. Soğuk Plazma	52
3. MATERYAL ve YÖNTEM	59
3.1. Kendinden Çek Valfli Mikro Pompa Düzeneği	59
3.2. Çek Valfsiz Mikro Pompa Düzeneği	68
3.3. Dozaj Pompasının Hazırlanması	70
3.4. Üç Eksen Harekete Sahip Sistemin Belirlenmesi	74
3.5. Elektronik Devrenin Kurulması ve Programlanması	77
3.6. Damla Kontrol Yöntemi	84
3.7. Sistem Montajı	86
3.8. Mürekkebin Oluşturulması	88
3.9. Elektrotların Üretilmesi, Yapılacak Testler ve Ölçüm Yöntemleri	97
3.10. Mürekkebin Özelliklerinin Belirlenmesi	106
4. BULGULAR TARTIŞMA	110
4.1. Mikro Pompa Çalışmaları	110
4.2. Bilyalı Öğütme Çalışmaları	115
4.3. Dalga Formu Çıktıları	118
4.4. Soğuk Plazmanın Alttaşa Etkisi	119
4.5. Parçacıksız Mürekkebin Performansı	119
4.6. Katmanlar Arası Soğuk Plazma Uygulanmış Elektrotların Performansları.	154
5. SONUÇ	167
KAYNAKLAR	172
EKLER	190
EK 1. Persitaltik Pompanın Kontrolünü Sağlayan Kod Bluğu	191
EK 2. Şırınga Dozaj Pompasının Arduino Kodu	192
EK 3. Bilyalı Öğütme Düzeneğinin Motorunu Döndüren Kod Bloğu	194
EK 4. 1. Katmandan 20. Katmana Kadar Basılan Numunelerin G-kod Bloğu	195
ÖZGEÇMİŞ	203

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
A	Amper
d	Difüzörün dar çapı
D	Difüzörün geniş çapı
L	Difüzör uzunluğu
nF	Nanofarad
Oh	Ohnesorge sayısı
Re	Reynold sayısı
V	Volt
W	watt (güç)
w	Diktörtgen kanal genişliği
We	Weber sayısı
α	Temas açısı
θ	Difüzör açısı
Ω	Ohm (direnç)

Kısaltmalar	Açıklama
AgNP	Gümüş nanoparçacık
DoD	İsteğe bağlı damla (Drop on demand)
DTF	Direkt transfer filmi
FDM	Eriyik yığma modeleme (Fused Deposition Modeling)
PCB	Baskılı devre kartı (Printed circuit board)
PLA	Poli laktik asit
SLA	Stereolitografi

ŞEKİLLER DİZİNİ

		Sayfa
Şekil 2.1.	Geleneksel PCB üretimi ve eklemeli imalat ile PCB üretimi (Y. Dong vd., 2018)	7
Şekil 2.2.	Dispersiyon stabilitesi için elektrostatik ve sterik itki örnekleri, ve zeta potansiyeli şeması (Freire vd., 2011; Matter vd., 2020)	9
Şekil 2.3.	Basılabilir mürekkebin tanım aralığı (Maleki & Bertola, 2020)	9
Şekil 2.4.	Nanopartükül katkılma, homojenizasyon durumu ve aerojel eldesi (Matter vd., 2020)	9
Şekil 2.5.	Farklı şekil, boy, oran, kalınlık ve yüzdelerde altın nanoparçacık katkılı solüsyonların renksel farkları (Khan vd., 2019)	10
Şekil 2.6.	İnkjet teknolojisinin sınıflandırılması (Shah vd. 2021'den değiştirilerek alınmıştır)	11
Şekil 2.7.	Piezoelektrik aktuatörlü mürekkep püskürmeli yazdırma işleminin tek açıklıktaki çalışmasının ayrıntılı illüstrasyonu (Gonzalez-Macia vd., 2010).....	12
Şekil 2.8.	Gümüş nanoparçacık katkılı mürekkep baskılı elektrodun sinterlenmesi sonucu direnç değişimi (Stüwe vd., 2015).	13
Şekil 2.9.	Soldaki şekilde farklı çizgi kalınlıklarında ve farklı sıcaklıklarda direnç değişimi verilmiştir(Mavuri vd., 2019); sağdaki şekilde ise farklı alttaşlarda farklı alttaş sıcaklıklarında gümüş nanoparçacık katkılı mürekkebin direnç değerleri verilmiştir (Smith vd., 2017)	14
Şekil 2.10.	Baskı sisteminin şematik gösterimi (Qin, 2015).....	15
Şekil 2.11.	IDTechEx' e göre 2015-2025 yılları arasındaki basılı elektronikteki olası pazar payları ve 2020-2030 araştırmasında Precedence Research'a göre 2020'deki yüzdelik pazar payı	15
Şekil 2.12.	Precedence Research'a göre 2024'te 16,82 milyar dolar olan basılı elektronik pazarı 2034 yılında 83,77 milyar dolar olacağı tahmin ediliyor	16
Şekil 2.13.	Allied Market Research'e göre sektörlerin kendi içindeki 2022'den 2032'ye esnek basılı elektronikteki pazar payları artışı	16
Şekil 2.14.	Allied Market Research'e göre giyilebilir teknolojinin alt segmentlere göre 2020 yılı ve 2031 yılı arasındaki yüzde değişim oranı	17
Şekil 2.15.	Solda testere dişi eklenmiş difüzör çalışması (Xu vd., 2014), ortada yuvarlatılmış testere dişlerine sahip bir difüzör görseli (Izzo vd., 2007) ve sağda testere dişi tabanlı pompa odası (Q. Yan vd., 2021)	20
Şekil 2.16.	Soldaki görselde ıraksak ve yakınsak lüle yerine dallanma yapan kanllar (Q. Yan vd., 2021); ortadaki	

	görselde pompa odası giriş ve çıkış kısımlarında farklı sayılara ve kalınlıklara sahip difüzör mekanizması örneği (H. Li vd., 2021); sağda bir pompa odasına bağlanan üç kanal ve akışkan tahliyesi ortadaki bir orifizden yapılmakta (Y. Cheng & Lin, 2007)	20
Şekil 2.17.	Çoklu bölüme sahip tesla valf kanal yapısına sahip çalışma (Monika vd., 2021); ortada parametre ve yapısal farkları olan tesla valfi kanal yapısına sahip tasarım karşılaştırması (K. Li vd., 2021); Sağda ise farklı bir tesla valf tasarım yaklaşımı (Shaikh vd., 2021).....	21
Şekil 2.18.	Bölme sayısına ve parametre değişimine bağlı tesla valfi verim çalışması (García-Morales vd., 2021); sağda çoklu bölüm tesla valf odasına sahip bir kanalda hıza bağlı debi kontrol çalışması (Yontar vd., 2021)	21
Şekil 2.19.	Tesla valf yapısından esinlenerek geliştirilmiş kanal yapısı (X. Chen vd., 2021); ortada benzer mantıkla çalışan bir kanal tasarımı (X. He vd., 2019) ve sağda tesla valfi benzeri prensiplerle çalışan farklı tasarımlar (Thomas & Muruganandam, 2018)	22
Şekil 2.20.	A) Farklı kalınlıklarda ve farklı düz kol sayılarında dairesel çek valf (L. He vd., 2020) B) esnekliği artırmak için kol yapısına kıvrımlar eklenmiş bir mikro pompa çek valfi (J. Dong, Cao, vd., 2020) C) 5 kollu bir pasif çek valf membran (H. K. Ma vd., 2015).....	23
Şekil 2.21.	Elastik valfli kanala sahip piezoelektrik tahrikli mikro pompa yapısı (W. Huang vd., 2021); sağ da şekillendirilmiş kanal ve akış yönüne ve kanal tipine bağlı şekillendirilmiş mebran ile çek valf tasarımı (Mosadegh, 2010)	23
Şekil 2.22.	Piezoelektrik diski aynı zamanda valf olarak kullanabilen peristaltik pompa (D. H. Wang vd., 2019).	24
Şekil 2.23.	Üç adet piezoelektrik malzeme ile tahriklenen peristaltik pompada sinyal gönderim sırası (Graf & Bowser, 2008)	25
Şekil 2.24.	Dış bir ortamda çalışarak mikro pinleri tahrikleyen piezolu mikro pompa yapısı (T. Ma vd., 2019); sağında yaylarla desteklenmiş normal durumda kapalı bir peristaltik mikro pompa yapısı (Trenkle vd., 2011)	25
Şekil 2.25.	Farklı membran tasarımları (Mohith vd., 2019)	26
Şekil 2.26.	Mikro akışkan sistemlerde pasif çek valf yaklaşımları solda şemsiye tipi valf (X. Wu vd., 2021); sağda bilyeli çek valf (Y. Wang, Uesugi, vd., 2019)	26
Şekil 2.27.	Mikro pompa sistemindeki difüzör boyutlarının harflendirilmesi (Olsson, 1998)	29
Şekil 2.28.	Gümüş-1,2 oxalate-diaminopropane metal organik bileşiğinin formu (Rustamova vd., 2022)	36
Şekil 2.29.	Sinterleme ve elektrotun direnci arasındaki ilişki (Rustamova vd., 2022).....	36

Şekil 2.30. Sıcaklığa ve süreye bağlı olarak direncin değişimi ve sıcaklığa ve süreye bağlı olarak sinterlenen parçacıkların birleşmesi, b maddeleri 130°C gerçekleştirilmiştir (Y. Dong vd., 2015) 38
Şekil 2.31. Damlacık şekilleri: A) Sürekli akış; B) Uydu damlacığına sahip damla; C) Atılamayan damla ve kuyruğu; sağda damlanın menisküs (hilal) görünümü (Harris vd., 2015; Seipel vd., 2020)..... 41
Şekil 2.32. Solda voltaj genliği ve bekleme süreleri; sağda örnek bir w dalga yapısı (Khalate vd., 2012; Oktavianty vd., 2019) 43
Şekil 2.33. Mürekkebin özelliklerine göre yazdırma sırasında ortaya çıkan sıvının yapıları ve Ohnesorge diyagramı (Buga & C. Viana, 2022)..... 45
Şekil 2.34. Kenar dalgalanmaları ve sıçratmaları içeren literatürdeki bazı örnek görseller A) (Vida vd., 2025) B) (Reinhold vd., 2013) C) (Htwe & Mariatti, 2022) D) (Ivanišević vd., 2019) E) (Zheng vd., 2014) F) (Vyas vd., 2011) G) (Mahajan vd., 2015) H) (Cho vd., 2017) I) (Rehmani & Arif, 2021) J) (Rohit, 2017) K) (Rohit, 2017) L) (Ge, 2017) M) (Hamad, Mian, vd., 2020) N) (Chien Dang vd., 2015) O) (Cruz, 2015) P) (Abhinav K vd., 2015) 47
Şekil. 2.35. Mikro serici sisteminin çalışma prensibi: iletken mürekkebin sürülmesi (Cai vd. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)..... 48
Şekil. 2.36. Soğuk plazma oluşturma şekilleri A) Dielektrik bariyer deşarjı B) Kaymalı ark deşarjı C) Plasma jet D) Korona desarj plazma (Abolore vd., 2024; Domonkos vd., 2021) 55
Şekil 2.37. PET yüzeye uygulanmış atmosferik soğuk plazma sonucu yüzey profili örneklerinin AFM analizi sonuçları A) referans plazma uygulanmamış durum; B) 60 s plazma uygulanmış; C) 120 sn plazma uygulanmış (Poletti vd., 2003) 57
Şekil 3.1. Tasarlanan mikro pompa görünümü ve sağdaki resimde pompa odasına giriş ve çıkışların görseli..... 60
Şekil 3.2. Geliştirilmiş 3 odalı peristaltik mikro pompa..... 61
Şekil 3.3. Üçlü mikro pompanın reçineli 3 boyutlu yazıcıda üretilebilir şekilde yarıya bölünmüş parçanın alt yarısı.. 61
Şekil 3.4. Chitubox programında modellerin konumlandırılması ve destek elemanlarının atılması 62
Şekil 3.5. Chitubox programında kullanılan baskı ve destek ayarları. 62
Şekil 3.6. Reçineli 3 boyutlu yazıcıdan çıkan tek piezolu mikro pompa 63
Şekil 3.7. FDM 3 boyutlu yazıcıdan çıkan parça ve sağda reçineli 3 boyutlu yazıcıdan çıkan tek piezolu mikro pompa..... 64
Şekil 3.8. Piezo ve naylon membran..... 64

Şekil 3.9.	Montajlanmış mikro pompa sistemin görüntüsü	64
Şekil 3.10.	Basınç sensörü tasarımı ve üretilmiş montajlanmış hali.	65
Şekil 3.11.	Farklı malzemelerle basılmış mikro pompalar (sırasıyla: FDM yazıcı ile Tough PLA, PLA; SLA yazıcı ile Reçine).....	66
Şekil 3.12.	Farklı toleranslarda basılmış mikro pompalar, ok işareti akış yönünü gösterir.....	67
Şekil 3.13.	Mikro pompa şeklindeki piezolu pompa ve direkt nozul olarak tasarlanmış piezolu inkjet kafası (ortadaki PET-G, diğer ikisi PLA)	68
Şekil 3.14.	Farklı kanal tiplerine sahip inkjet kafaları	68
Şekil 3.15.	Sıvı silikonlu PE film, ortada kendinden yapışkanlı Polyamid film ve sağda prinç üzerine direkt PE filme sahip piezo elemanlar	69
Şekil 3.16.	Sırasıyla; kestamit, PET-G ve PLA malzemeden üretilmiş mikro pompalar	69
Şekil 3.17.	Kestamitten üretilmiş piezo diskli darbe üretici ve tasarım görseli.....	70
Şekil 3.18.	Nozulla belirli aralıklarla mekanik vuruş ile titreştiren ve nozul ucundaki damlayı düşüren sistem	70
Şekil 3.19.	Sırasıyla modifikasyonu yapılmış peristaltik pompa ve sıfırdan tasarımı yapılmış peristaltik pompa.....	71
Şekil 3.20.	Sırasıyla DC motor, Nema 17 Step motor, PLA kaplin ve kalıp çeliğinden imal edilmiş kaplin	72
Şekil 3.21.	Kompakt damla üreteci tasarımı ve prototipi	72
Şekil 3.22.	Şırınga dozaj pompası.....	73
Şekil 3.23.	Çift piezolu düzeneğin görseli	74
Şekil 3.24.	Şırınga hava alma düzeneği taslak görseli ve uygulaması	74
Şekil 3.25.	1. Sistem tasarımın montaj görünümü	75
Şekil 3.26.	2. Sistem tasarımın montaj görünümü	75
Şekil 3.27.	İlk kullanılan ve üretilen sistemin görüntüsü.....	76
Şekil 3.28.	Son sistemin tasarımı ve üretilmiş görüntüsü	76
Şekil 3.29.	Sinterleme ve kurutma işlemi için kullanılacak 500w 220V ısıtıcılı plaka ve sisteme montajlanmış hali	77
Şekil 3.30.	Sistemin genel görüntüsü ve sağ da sistemin havasının alındığı yerleşim şekli.....	78
Şekil 3.31.	Piezo kontrol devre şeması	79
Şekil 3.32.	Tek yönlü hareket sağlayan mosfetli devrenin şeması ve grafiksel görseli	80
Şekil 3.33.	8 bacaklı röle ile tersleme devresinin şeması ve grafiksel görseli	81
Şekil 3.34.	Dört adet mosfetle voltajı tersleyen sistemin devre şeması ve grafiksel gösterimi.....	82
Şekil 3.35.	8-32V DC girişi ±45V-390V DC çıkışa yükselten Voltaj dönüştürücü.....	83
Şekil 3.36.	Damla atımının yavaş çekim optimizasyon kayıtları.....	85

Şekil 3.37.	Arduino'nun verdiği sinyalin çıktısı sırasıyla 3. pin ve 7. pin çıktısı	86
Şekil 3.38.	Z ekseninin end-stop switchinin konumlandırılması.....	87
Şekil 3.39.	Mikro pompa düzeneğinin kontrolünün sağlandığı mosfetli sistemin son hali	87
Şekil 3.40.	Pano içi kablolama son hal	88
Şekil 3.41.	Damla üreteç sisteminin kablolarının dışarıdan dolaştığı ve kabloların sigma profillerin içerisinden dolaştığı son hali ve piezo ve pompa kontrol düğmeleri	88
Şekil 3.42.	Bilyalı öğütme için ayarlanan toz bilya ve sıvı hacmi sonunda kavanozun görünümü	91
Şekil 3.43.	Bilyalı öğütme düzeneği parçaları ve düzeneğin çalışan hali	91
Şekil 3.44.	Levenhuk Rainbow 2L PLUS Işık Mikroskopu	92
Şekil 3.45.	Redüktörlü sistem tasarımı ve 2200kV'lık drone motorlu sistem	93
Şekil 3.46.	Tüplerin takıldığı santrifüj tasarımı ve sistemin genel görüntüsü	93
Şekil 3.47.	Mürekkep karıştırma düzeneği: dc motor, ısıtıcı fişek, termistör sıcaklık sensörü ve karışım kabı.....	94
Şekil 3.48.	Karıştırma düzeneğinin karıştırıcısı kaşık şeklinde ilk tasarım ve düz tasarım olan ikinci tasarım	94
Şekil 3.49.	Sıcaklık ve zaman ayarlı ultrasonik cleaner düzeneği ve sağda oda nemlendiricinin ultrasonik karıştırıcı olarak denenmesi	95
Şekil 3.50.	Ultrasonik homojenizatör düzeneği.....	95
Şekil 3.51.	Gümüş asetat sentezi ve distile su ile yıkanarak saflaştırılması.....	96
Şekil 3.52.	Gümüş mürekkebin titre edilme yoluyla elde edilmesi..	96
Şekil 3.53.	Elde edilen sıvı süzülerek çökelmiş kirleticilerin uzaklaştırılarak gümüş mürekkebin saflaştırılması	97
Şekil 3.54.	Eklemeli imalat ile üretilecek baskılı devrenin üretim sürecinin akış şeması	98
Şekil 3.55.	Basım kalitesini görebilmek için tasarlanıp tek katman g-code çıkarılmış desen	98
Şekil 3.56.	Düz, dairesel dönüş ve köşe dönüşüne sahip desenler; solda tasarım ve sağda g-kodun görselleştirilmiş hali	99
Şekil 3.57.	Repiteir host dilimleyici programında tek katmandan 20 katmana kadar g-kodun görüntüsü.....	99
Şekil 3.58.	Direnç ölçümlerinin yapıldığı multimetre cihazı.....	101
Şekil 3.59.	Plazma ateşleyicisinden oluşturulan kaymalı plazma ark deşarjı.....	102
Şekil 3.60.	Hava çekirdekli transformatör ile korona deşarjı oluşturma çalışması	102
Şekil 3.61.	Damla üretici ve aynı profil üzerine sabitlenmiş soğuk plazma üreticinin sistemde konumlandırması	103
Şekil 3.62.	200 mm uzunluğundaki elektrotun g-kod oluşturucu programdaki görüntüsü.....	104

Şekil 3.63. Basılı elektrotun bükülme çapının tespiti için tasarlanmış ve üretilmiş çap düzenekleri 104
Şekil 3.64. Kapasitör devreleri soldan sırasıyla; L4, L3 ve L2 baskılı devresi g-kod deseni 105
Şekil 3.65. 10ml'lik Piknometre ile gümüş mürekkeplerin yoğunluğunun tespit edilmesi 106
Şekil 3.66. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçüm cihazı 107
Şekil 3.67. DTF PET film üzerindeki damla temas açısı ölçümleri A) distile su 90,35° B) %2 gümüş içeren mürekkep 86,83° C) %2,5 gümüş içeren mürekkep 77,83° D) %5 gümüş içeren mürekkep 68,12° 108
Şekil 3.68. DTF PET film üzerindeki damla temas açısı ölçümü doğrulanması..... 108
Şekil 3.69. DTF PET film üzerindeki damla temas açısı ölçümü A) 3,5 W plazma uygulanmış yüzey, B) 25 W soğuk plazma uygulanmış yüzey 109
Şekil 3.70. Güç ölçüm cihazı 109
Şekil 4.1. Tek piezo ile atılan damlaların görseli..... 113
Şekil 4.2. Su ile baskı denemeleri..... 113
Şekil 4.3. Farklı derişimlerde mürekkep-su karışımı ile yapılan basım denemeleri 114
Şekil 4.4. Solda bilyalı öğütme öncesi tozların görnümü; sağda öğütüldükten sonrakı 640x büyütülmüş karışımın görüntüsü 115
Şekil 4.5. 64x, 160x ve 640x yakınlaştırma ile DTF PET film üzerindeki mürekkebin görüntüsü 116
Şekil 4.6. DTF PET filmin yüzeyi 116
Şekil 4.7. Parlak fotoğraf kağıdı yüzeyinde farklı ölçeklerde kahve lekesi deseni..... 117
Şekil 4.8. DTF PET film üzerine damlatılmış ve kurumuş damla üzerinde yaklaşık 2 mm mesafede alınan 20 MΩ direnç değeri 117
Şekil 4.9. Oksitlenmiş demir parçacıklı mürekkebin parlak fotoğraf kağıdı üzerine tekrarlı basılmış görseli..... 118
Şekil 4.10. Mürekkep yokken piezoda oluşan dalga formu ve sağda mürekkep doluyken oluşan dalga formu..... 118
Şekil 4.11. Plazma uygulanmış yüzeye damlatılmış su görüntüleri ve temas açıları 119
Şekil 4.12. Parçacıksız berrak şefaf %2 derişimli gümüş mürekkebin eş zamanlı sinterleme işleminde kurumadan sinterlemeye kadar aldığı formlar..... 119
Şekil 4.13. %5 gümüş içeren parçacıksız mürekkebin sinterleme sırasında değişen formu 120
Şekil 4.14. %2 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan 150 mm/dk hızla basılan ve 135°C sinterlenmiş damlaların görüntüsü 120
Şekil 4.15. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 6 katmana ve 16. katmandan 20.

katmana kadar olan 300 mm/dk hızla 135°C sinterlenmiş damlaların görüntüsü ve ortada 1 katmandan 7 katmana kadar aynı parametrelerde basılmış farklı bir desen 122
Şekil 4.16. %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan 150 mm/dk hızla 135°C sinterlenmiş damlaların görüntüsü..... 124
Şekil 4.17. %2,5 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan damla yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C'de sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü..... 125
Şekil 4.18. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C mürekkebin sinterlenmiş görüntüsü..... 126
Şekil 4.19. 8 katman ve üstü yapılmış deneylerde katman sayılarına göre 30 mm boyundaki elektrotların farklı parametrelerde ve farklı yöntemle basılmış numunelerin direnç ölçümleri 128
Şekil 4.20. %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü 129
Şekil 4.21. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü; soldaki ilk katmanın kuruması esnasında çekilmiş görüntüsü 130
Şekil 4.22. %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü 131
Şekil 4.23. Katman sayılarına göre 30 mm boyundaki elektrotların farklı parametrelerde ve farklı yöntemle basılmış numunelerin direnç ölçümleri..... 132
Şekil 4.24. Deney 1: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri ilk katman 1,8 mm olmak üzere yaklaşık 2,3 mm civarındadır, A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot 134
Şekil 4.25. Deney 2: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri yaklaşık 1,8 mm civarındadır, A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot..... 135

Şekil 4.26. Deney 3: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri ilk katman 1,8 mm olmak üzere yaklaşık 2,2 mm civarındadır, A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot 136
Şekil 4.27. Deney 4: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri yaklaşık 1,8 mm civarındadır, A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot..... 137
Şekil 4.28. Deney 5: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot..... 138
Şekil 4.29. Deney 6: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot..... 139
Şekil 4.30. Deney 7: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot 140
Şekil 4.31. Deney 8: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot 141
Şekil 4.32. İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi solda %2, sağda %2,5 2 katmanlı olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri yaklaşık 1,8 mm civarındadır 142
Şekil 4.33. İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişliği takribi 3 mm ve 15 kat atılmış hattın görseli ve kahve lekesinin incelenmesi 142
Şekil 4.34. İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan serme metodu ile basılan tek katmanlı hattın görselin 64x büyütülmüş görüntüsü ile hat doğrusallığının incelenmesi 143
Şekil 4.35. Deney 1: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C

	sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 2 katman B) 3 katman C) 4 katman D) 5 katman E) 6 katman F) 7 katman.....	145
Şekil 4.36.	Deney 2: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 2 katman B) 3 katman C) 4 katman D) 5 katman E) 6 katman F) 7 katman.....	146
Şekil 4.37.	Deney 3: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 2 katman B) 3 katman C) 4 katman D) 5 katman E) 6 katman F) 7 katman.....	147
Şekil 4.38.	Deney 4: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 2 katman B) 3 katman C) 4 katman D) 5 katman E) 6 katman F) 7 katman.....	148
Şekil 4.39.	Deney 5: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 3 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 3 katman B) 4 katman C) 5 katman D) 6 katman E) 7 katman.....	150
Şekil 4.40.	Deney 6: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 2 katman B) 3 katman C) 4 katman D) 5 katman E) 6 katman F) 7 katman	151
Şekil 4.41.	Deney 7: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 2 katman B) 3 katman C) 4 katman D) 5 katman E) 6 katman F) 7 katman	152
Şekil 4.42.	Deney 8: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi A) 2 katman B) 3 katman C) 4 katman D) 5 katman E) 6 katman F) 7 katman	153
Şekil 4.43.	Plazma deneylerinin görselleri.....	155
Şekil 4.44.	Solda Plazma 2 deneyindeki 3,5 W plazmanın görseli; sağda Plazma 3 deneyindeki 25 W plazmanın görseli....	156

Şekil 4.45.	Bükülme çapı direnç değişimi deneyi için üretilmiş silindirler	157
Şekil 4.46.	Bükülme çapı deneyi için 200 mm elektrotun tek tur silindire sarılmış elektrotun görseli	157
Şekil 4.47.	Bükülme çapı deneylerinde okunan direnç değerleri	161
Şekil 4.48.	Plazma 1 deneyi sonucu elektrot yüzey profili (0 W plazmasız)	161
Şekil 4.49.	Plazma 2 deneyi sonucu elektrot yüzey profili (3,5 W)	162
Şekil 4.50.	Plazma 3 deneyi sonucu elektrot yüzey profili (25 W)	162
Şekil 4.51.	Kapasitör devresi denemesi A) 4 tur dönen devre B) 3 tur dönen devre A) 4 tur dönen devre C) 2 tur dönen devre D) 2 tur dönen katman arlarına soğuk plazma uygulanmış devre	163
Şekil 4.52.	Kapasitör devrelerinin kapasitans miktarını artırmak için esnek elektrotlardan yararlanılarak rulo hale getirilmesi	165

ÇİZELGELER DİZİNİ

		Sayfa
Çizlege 2.1.	Cam alttaş üzerine basılmış farklı iletken nanoparçacık katkılı mürekkebin sinterlenme sıcaklıkları ve elde edilen dirençler (Wiklund vd., 2021).....	13
Çizelge 2.2.	Farklı alttaş üzerine basılmış gümüş nanoparçacık katkılı mürekkebin farklı kürleme yöntemleriyle sinterlenmesi ve elde edilen dirençler (Wiklund vd., 2021)	13
Çizelge 2.3.	Literatürde piezoelektrik ile yapılmış mikro pompa çalışmalarındaki pompa odası boyutları	27
Çizelge 2.4.	Piezoelektrik materyalle tahriklenen mikro pompa yapılarında mikro kanal ölçüleri	28
Çizelge 2.5.	Piezo malzeme ile tahriklenen mikro pompalarda dairesel çek valf boyutları.....	29
Çizelge 2.6.	Mikro pompalarda kullanılan diyafram özellikleri (Mohith vd., 2019).....	30
Çizelge 2.7.	Su bazlı iletken mürekkepler (Ibrahim vd., 2023).....	31
Çizelge 2.8.	İletken nanoparçacık katkılı mürekkeplerde kullanılan malzemeler.....	33
Çizelge 2.9.	Gümüş bazlı parçacıksız mürekkepler (W. Yang vd., 2019).....	40
Çizelge 2.10.	Soğuk plazma uygulamaları parametre değerleri	53
Çizelge 3.1.	Peristaltik mikro pompa üretim çalışılması için deney parametreleri	67
Çizelge 3.2.	İletken mürekkep oluşturabilmek için kullanabileceğimiz ve ulaşılabilir kimyasallar listesi (*ChemSpider*, 2025; *Pub Chem*, 2025).....	89
Çizelge 3.3.	Deney numaralarının, basım yönteminin, deneye ait hız verisinin ve deneyde kullanılan mürekkebin yüzdelik oranını verildiği deney tasarımı tablosu	100
Çizelge 3.4.	Deney numaralarının, basım yönteminin, deneye ait hız verisinin ve deneyde kullanılan mürekkebin yüzdelik oranını verildiği deney tasarımı tablosu	104
Çizelge 4.1.	Eklemeli imalat ile üretilen pompa düzeneklerindeki o ring kanalı derinlik çalışması.....	111
Çizelge 4.2.	%2 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan 150 mm/dk hızla damla püskürtme yöntemiyle basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri	121
Çizelge 4.3.	%2 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1. katmandan 6. katmana ve 16. katmandan 20. katmana kadar olan 300 mm/dk hızla damla püskürtme yöntemiyle basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri	123

Çizelge 4.4. %2,5 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1. katmandan 7. katmana kadar olan 150 mm/dk hızla damlatma yöntemiyle basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri 124
Çizelge 4.5. %2,5 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1. katmandan 7. katmana 300 mm/dk hızla damla püskürtme metodu ile basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri 126
Çizelge 4.6. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C mürekkebin sinterlenmiş elektrotların direnç ölçümleri 127
Çizelge 4.7. 300 mm/dk hızda %2,5 oranında gümüş içeren mürekkebin serme yöntemiyle basımı sonucunda ölçülen direnç değerleri 130
Çizelge 4.8. 150 mm/dk hızda %2 oranında gümüş içeren mürekkebin serme yöntemiyle basımı sonucunda ölçülen direnç değerleri 131
Çizelge 4.9. 150 mm/dk hızda %2,5 oranında gümüş içeren mürekkebin serme yöntemiyle basımı sonucunda ölçülen direnç değerleri 132
Çizelge 4.10. Yöntem, basım hızı, gümüş içeriği ve katman sayısına göre 30 mm uzunluğundaki 135°C sinterlenmiş numunelerin direnç ölçüm değerleri 133
Çizelge 4.11. Yöntem, basım hızı, gümüş içeriği ve katman sayısına göre 30 mm uzunluğundaki 135°C sinterlenmiş numunelerin optik profilometre ile yükseklik (µm) ölçüm değerleri 154
Çizelge 4.12. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmış plazma deneylerinden elektrotun sağ, orta ve sol kısmınlarından ölçülen direnç değerleri 156
Çizelge 4.13. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmamış Plazma 1 deneyi sonucun oluşturukan 200 mm uzunluğundaki elektrotun silindirlere sarıldıkları sırada sağ ve sol kısmınlarından ölçülen direnç değerleri 158
Çizelge 4.14. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmış Plazma 2 deneyi sonucun oluşturukan 200 mm uzunluğundaki elektrotun silindirlere sarıldıkları sırada sağ, orta ve sol kısmınlarından ölçülen direnç değerleri 159
Çizelge 4.15. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmış Plazma 3 deneyi sonucun oluşturukan 200 mm uzunluğundaki elektrotun silindirlere sarıldıkları sırada sağ ve sol kısmınlarından ölçülen direnç değerleri 160
Çizelge 4.16. Kapasitör devresinin elektrot hatlarının sol orta ve sağ taraflarından alınmış direnç değerleri 164

Çizelge 4.17. Kapasitör devresi oluşturma deneyinde elde edilen kapasitans değerleri 166

1. GİRİŞ

PCB üretimindeki geleneksel üretim teknikleri tek düze parçaların çok fazla sayıda elde etmeyi amaçlayan seri üretim için geliştirilmiş yöntemlerdir. Fakat gelişen teknoloji ile birlikte üretim kabiliyetlilerinde artması bir takım pazarlama stratejileri ve bazı sağlık problemlerinde kişisel bazlı ürüne ihtiyaç duyulması gibi çeşitli etkenlerle günümüzde bireylerin karakteristik ölçülerine ve kişisel isteklerine yönelik ürünlerin de ön plana çıkmasına sebep olmuştur. Bazı durumlarda ise seri üretim için geliştirilen ürünlerin ön çalışmaları sırasında çok sayıda deneme yanılmaya ihtiyaç duyan prototip üretimine gereksinim olmaktadır. Karmaşık ve uzun proseslere sahip geleneksel üretim teknikleri ile tek seferlik olan prototip üretimi son derece maliyetli, zaman alıcı, insan sağlığına ve çevreye zararlı kimyasallar içerir. Bu sebeplerle hızlı prototipleme bir diğer adıyla eklemeli imalat teknolojilerinin gelişmesi sektörde ciddi anlamda bir boşluğun ve ihtiyacın giderilmesine olanak tanımıştır.

Genel anlamda eklemeli imalat sistemleri karmaşık ve uzun prosesleri tek bir prosese indirgemeyi amaçlar. Proses sayısının düşürülmesi ek donanım, malzeme, işgücü ve tecrübeli elemana olan ihtiyacın da düşürülmesi anlamına gelir. Bu sebeple birçok farklı eklemeli imalat sistemleri geliştirilmiştir. İhtiyaçların düşürülmesi eklemeli imalat sistemlerinin seri üretime de uyarlanabilir hale getirilmesi için ciddi bir ışık yakmıştır. Bunlardan bir tanesi de mürekkep püskürtmeli yazıcılardır.

Mürekkep püskürtmeli eklemeli imalat sistemi mürekkebin içeriğine göre farklı amaçlarla kullanılabilir. Metal veya seramik nano katkılanan mürekkep ile mekanik parçalar yazdırılabileceği gibi elektrik iletkenliği yüksek gümüş, bakır veya altın gibi nano katkılamayla iletken elektrotlar basılabilir. İletken mürekkep püskürtmeli eklemeli imalat sistemi kabiliyetleri neticesinde esnek ekranların üretilmesine de imkan sağlayan OLED (Organic Light Emitting Diode) gibi teknolojilerin önü açılmış ve bu yöntem seri üretimde uygulanabilmiştir. Kişiselleştrilmiş çok fonksiyonlu elektronik cihazların katma değeri ve bu elektronik cihazlara olan ilgi ve ihtiyaç giderek artmaktadır.

Eklemeli imalat sistemleri ne kadar karmaşık çok malzemeli prosesleri tek bir prosese indirgeyip prototipin meşakkatsiz bir şekilde oluşturulmasını sağlasa da beraberinde birçok üretim kusurunu da içerir. Örneğin Toz yataklı ergitme (PBF- Powder Bed Fusion) sistemleri ve Toz yataklı Bağlayıcı Püskürtme (BJ - Binder Jetting) prosesleri iç yapı kusurlarını beraberinde getirmektedir. Aynı şekilde iletken nanoparçacık katkılı mürekkep püskürtmeli yazdırılabilir ürünlerde iletkenlerin birbiriyle temasının olması ve uygun sıcaklıklarda sinterlenmesi iletkenlik için önem arz etmektedir.

Mikro pompalar, mikro ölçekte sıvı veya gazları kontrol etmek için kullanılan küçük ölçekli pompa sistemleridir. Mikro elektromekanik sistemler (MEMS) veya mikroakışkanlar gibi alanlarda kullanılırlar. Mikro pompalar, yüksek hassasiyet, hızlı tepki süresi ve düşük güç tüketimi gibi avantajları nedeniyle birçok uygulamada tercih edilir. Mikro pompalar, mürekkep damlacıklarının doğru boyutta ve doğru miktarda olmasını sağlamak için kullanılır. Bu sayede yüksek çözünürlüklü baskılar elde edilebilir. İnkjet baskı sürecinde, mürekkep damlacıkları kontrol edilebilir bir şekilde püskürtülmelidir. Mikro pompalar, inkjet baskı sürecinde iletken nanoparçacıklı mürekkeplerin hassas bir şekilde püskürtülmesini sağlar. Mürekkep, mikro pompalar aracılığıyla bir basınç farkıyla hareket ettirilir ve istenen şekilde püskürtülür. Mikro pompalar, mürekkebin akış hızını ve basıncını kontrol ederek doğru bir şekilde püskürtülmesini sağlar. Böylece yüksek kaliteli ve yüksek performanslı baskılar elde edilmesine olanak tanır. Mikro pompalarda yakınsak ve ıraksak duvarlar, akışkanın hızını ve basıncını kontrol etmek için kullanılırken, çek-valfler ise akışın tek yönlü olmasını sağlayarak geri akışı engeller. Bu bileşenlerin bir araya gelmesiyle mikro pompalar, birçok alanda başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Yakınsak duvarlar, akışkanın ileri doğru hareket ettiği bir geometriye sahiptir. Bu tür duvarlar, akışkanın hızını artırmak ve basıncını düşürmek için kullanılır. Genellikle dar bir kanalın sonunda bulunurlar ve sıvının akışını yoğunlaştırarak daha yüksek bir hızla çıkmasını sağlarlar. Iraksak duvarlar ise yakınsak duvarların tam tersine akışkanın geriye doğru hareket ettiği bir geometriye sahiptir. Bu tür duvarlar, akışkanın basıncını artırır ve hızını azaltır. Iraksak duvarlar genellikle mikro pompaların çıkış kısmında bulunur ve akışkanın kontrol altında düzgün bir şekilde çıkmasını sağlar.

Mikro pompaların önemli bir bileşeni çek-valflerdir. Çek-valfler, akışın yalnızca bir yönde gerçekleşmesine izin veren valf mekanizmalarıdır. Mikro pompalarda kullanılan çek-valfler, geri akışı önlemek ve akış yönünü kontrol etmek için önemlidir. Genellikle yaylar veya membranlar kullanılarak tasarlanırlar. Çek-valfler, bir akış kanalında tek yönlü bir kapak olarak hareket ederler. Akış ileri yönde gerçekleştiğinde, kapak açılır ve akış serbestçe devam eder. Ancak akış geri yönde olursa, kapak kapanır ve geri akışı engeller. Bu, istenmeyen geri akışı önlemek ve sıvı veya gazın doğru yönde hareket etmesini sağlamak için önemlidir. Mikro pompalardaki çek-valfler, doğru ve güvenilir bir akış kontrolü sağlar. Bu, sistemdeki sıvı veya gazın istenilen yere ulaşmasını ve geriye doğru hareketini engeller. Çek-valfler ayrıca sistemdeki basınç dengesini de korur. Damlacık kontrolünün hassas bir şekilde yapılması ve istenilen boyutta damlacıkların nozul ucundan püskürtülmesi için iletken mürekkebi kontrol edilmesi ve eklemeli imalat sisteminin içersin de akışkanın hareketini sağlamak için mikro pompa veya mikro pompalar kullanılması uygun görülmektedir.

İsteğe bağlı damla üretme sistemleri farklı püskürtme sistemleriyle çalışabilmektedir. Kontrollü bir piezolu peristaltik mikro pompa ile damla atılabilir. Bunun yanında inkjet kafasının ayrı mikro pompa veya basınç düzenleyici sisteminin ayrı olduğu yapılarda mevcuttur. Önemli noktalardan biri damlanın her damla atılmasından sonra eşit miktarda sıvı ile beslenebilmesidir.

İletken mürekkep basımında ticari mürekkep fiyatları maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda yüksektir. Sarf malzeme olarak kullanılan bu mürekkepler iletken mürekkepli inkjet metodunun temel yapı taşlarından biridir. Herhangi bir basım hatası olduğunda veya fonksiyon arızası ile karşılaşıldığında mürekkep israf olabilmektedir. Bu sebeple mürekkebin olabildiğince uygun bütçeli olması hem çalışmaların önünü açacaktır hem de daha az maliyetle üretim yapılabilir hale getirecektir.

İleri teknoloji esnek giyilebilir elektronik cihazlara olan ihtiyaçların giderek artması ve birtakım üretim kolaylıkları ve mikro nano ölçekte üretim kabiliyeti üstünlükleri sebebiyle iletken nanoparçacık katkılı veya parçacıksız metal organik mürekkep püskürtmeli eklemeli imalat sistemlerinin araştırılması, var olanların irdelenmesi ve

esnek yüzeye yazdırılabilir elektroniğin dayanımları ve karakteristiği üzerine çalışılmaya ihtiyaç vardır.

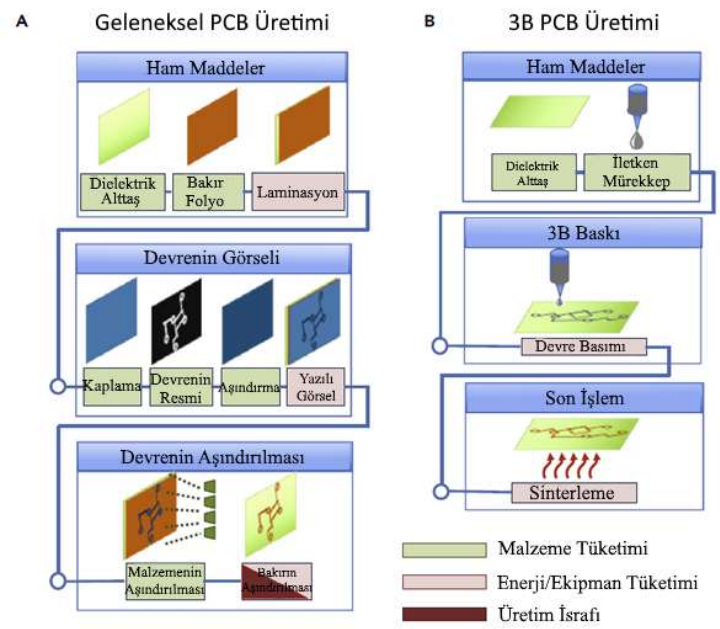
Bu çalışma kapsamında ilk olarak iletken mürekkep ile basım yapabilen eklemeli imalat cihazının kalbi olan mürekkebin istenilen hacimde püskürtülebilmesi sağlayacak piezolu peristaltik mikro pompalı basım kafası çalışmalarına yer verilmiştir. Peristaltik mikro pompa düzeneğinde tespit edilen üretim zorlukları ve sızdırmazlık problemleri gibi dezavantajları sebebiyle hem damla püskürtme kabiliyeti hemde dozajı ayarlayan kendinden çek valfli peristaltik pompa yerine; mürekkep beslemesi için pozitif deplasmanlı bir dozaj pompası ve damla püskürtülmesini sağlayan mikro pompalı baskı kafası tasarlanıp üretilmiştir. Çalışmaların sağlıklı yürütülebilmesi için parçacıklı ve parçacıksız mürekkebin üretilmesi için gerekli kimyasalların seçilmiştir ve üretim sırasında gerekli olacak, bilyalı öğütme, santrifüj ve soğuk plazma için cihazlar üretilmiştir. Belirlenen kimyasallar ile suda çözünebilen parçacıksız gümüş mürekkep üretimi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen parçacıksız metal organik suda çözünebilen mürekkep ile elektrot yollar oluşturulup direnç ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bununla beraber soğuk plazma cihazı üretilerek gümüş elektrot yolların esneklik iletkenlik gibi özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine durulmuştur. Genel olarak literatürde soğuk plazma yüzey karakteristiğini değiştirmek ve alttaşın zarar görmemesi için düşük sıcaklıklarda sinterlemek amacıyla en üst katmana uygulanmıştır. Bazı çalışmalarda aerosel jet sistemine entegre edilmiş soğuk plazma mekanizmasından bahsedilmiştir. Aerosel jet sisteminde kullanılan soğuk plazmanın amacı mürekkebin jetlenebilmesi için yoğun bağlayıcılar içeren mürekkeplerin içerisindeki bağlayıcıların ortamdan uzaklaştırılmasına dayanır ve sıvı mürekkebe uygulanır. Bu çalışmanın özgün yönü cihaz tasarımlarının ve üretimlerinin çalışma kapsamında yapılmasıyla beraber kurumuş katmanlarlar arasına uygulanacak soğuk plazmanın katmanlar arasındaki yüzeyi pürüzlendirerek katmanların birbirleirne daha iyi nufüz etmesini ve böylece katmanların birbilerini daha iyi tutarak esnekliği ve iletkenliği artıracağı hipotezine dayanır ve tüm bu ileri teknoloji olarak kabul edilen sistemin ekonomik olarak uygun ve ulaşılabilir araç gereçlerle yapılabilmesini sağlar.

Tez yapılanması Giriş, Kuramsal Temeller ve Kaynak Araştırması, Materyal ve Yöntem, Bulgular Tartışma, Sonuçlar, Kaynaklar ve Ek dokümanların verilmesi şeklinde kurgulanmıştır. Giriş bölümünde tezin amacı, bu alanda araştırma yapılmasının gerekliliğine değinilmiştir. Bu bölümde tezde adı geçen kritik terimlerin genel tanımı ve tez için önemlerinden bahsedilmiştir. Ayrıca giriş bölümünde tez kapsamında yapılan alt çalışmalar ve bu çalışmanın kapsamı ve yenilikçi yönlerine değinilerek tez hakkında bir temel sağlanmıştır. İkinci bölümde tez içerisinde kullanılan, üretilen, tasarlanan ekipmanlar ve sarf malzemelerin hangi kaynaklar üzerine temellendirilerek oluşturulduğuna değinilmiştir. Ayrıca bu tez Üniveriste-Sanayi işbirliğine dayanmasından dolayı piyasa araştırması ve üretilecek eklemeli imalat cihazının rakiplerinin durumuna değinilmiştir. Bu kapsamda tezin 2. Bölümünde piyasa araştırılması, rakip analizi, mikropompa, mikropompaların boyutlar ve bu boyutların amacı, nanoparçacık katkılı iletken mürekkep, nanoparçacık üretimi için ıslak bilyalı öğütme yöntemi, parçacıksız mürekkepler, mürekkebi damlatabilmek için dalga formunun şekli ve etkisi, isteğe bağlı damla püskürtülmesi proseslerinde oluşan üretim kusurları, mikro serici sistemi ve soğuk plazmanın ne olduğu ve kullanımı ile ilgili kaynaklar verilmiştir. Tezin 3. bölümü olan Materyal ve Yöntem kısmında kendinden çek valfli mikro pompa düzeneği, çek valfsiz mikro pompa düzeneği, dozaj pompasının geliştirilmesine, üç eksen harekete sahip sistemlerin belirlenmesine yönelik yapılan çalışmalara, 3 eksen sistemi kontrol eden ve aynı zamanda pompa düzeneklerini çalıştıracak olan elektronik devrenin kurulması ve programlanmasına, damlanın kontrol yöntemine, mürekkebin oluştulmasına, geliştirilen sistemle elektrotların üretilmesine, üretilen soğuk plazma cihazına, deney tasarımlarına, elektrotlara yapılacak test ve ölçüm yöntemlerine değinilmiştir. 4. Bölüm Bulgular ve Tartışma kısmında mikro pompa çalışmalarının ve bilyalı öğütme çalışmlarının sonuçlarına değinilmiştir. Ayrıca dalga formu çıktıları verilmiş ve soğuk plazmanın alttaşa etkisi damlacık temas açısı ölçümleri gösterilerek parçacıksız mürekkepten üretilen elektrotların ve üretim yöntemlerinin karşılaştırmalı performansının ortaya konduğu direnç ölçümleri, elektrot görselleri verilmiş ve elektrotların doğrusalığı ile ilgili sonuçlar mikroskop görüntüleri ve optik profilometre aracılığıyla paylaşılmıştır. Ayrıca kapasitans devresi basılarak katmanlar arasına plazma ile çekilen devre ile karşılaştırılmıştır. Bulgular ve Tartışma bölümde yeri geldiğinde literatürle ilgili yapılan çalışmalar karşılaştırılarak çalışmanın bilimsel

durumu irdelenmiştir. Tezin son bölümü olan sonuçlar kısmında tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların derlenmiş bilgisine ve tüm yapılan çalışmalar göz önüne alınarak nihai çıkarımlara yer verilmiştir. Ekler bölümünde çalışmada kullanılan peristaltik pompanın kontrolünü sağlayan kodlar, şırınga dozaj pompasının kodları, bilyalı öğütme düzeneğinin kodları ve tez kapsamında yazılan birinci katmandan 20 katmana kadar yirmi elektrotun basımını gerçekleştiren g-kod paylaşılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER ve KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüz teknolojisinde mikro ölçekli sistemler ve kişisel cihazlar önem kazanmıştır. Bu sebeple eklemeli imalat üzerine çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Kişisel cihazlara olan talebin artmasıyla elektronik cihazların esnek, giyilebilir ve mikro ölçeklerde üretimine ilgi oluşmuştur. Nano-mikro ölçekte devre baskıları çeşitli kimyasallara ve karmaşık cihazlara ihtiyaç duyulan multi-prosesler içeren çeşitli zorlukların ve teknolojinin bir arada bulunduğu bir üretim yapısına sahiptir (Y. Dong vd., 2018; E. Ozkan vd., 2018; Shamsudin vd., 2021). Aynı zamanda bu karmaşık proseslerde 200 çeşit kimyasalın kullanıldığı ve atık su konusunda çevreye ciddi zararları olmaktadır (Goodship vd., 2019; Noor, 2021). PCB üretimlerinde kullanılan proseslerin çoğunluğu seri üretime uygun proseslerdir. Tek ve özgün yapılara ihtiyaç ise yüksek oranda artmaya devam etmektedir (Q. Li vd., 2019). Şekil 2.1'de geleneksel yöntemlerle üretilen çoklu prosesler içeren bir basılı elektrot üretim prosesi ile eklemeli imalat ile üretilmiş mürekkep püskürtmeli basım metodunun arasındaki işlem adımları verilmiştir.

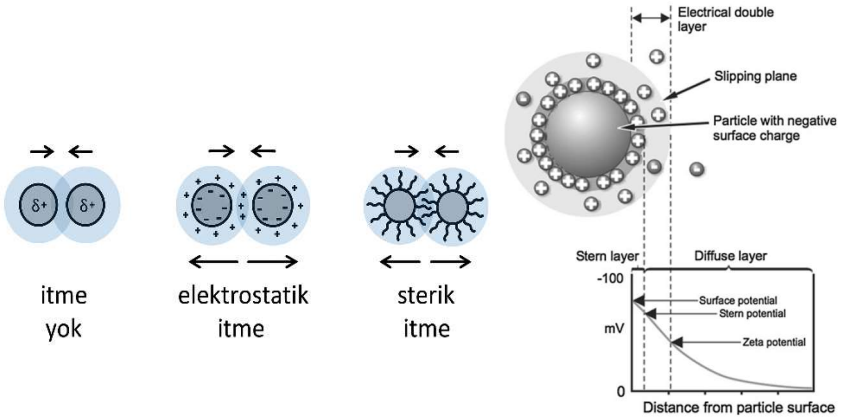


Şekil 2.1. Geleneksel PCB üretimi ve eklemeli imalat ile PCB üretimi (Y. Dong vd., 2018)

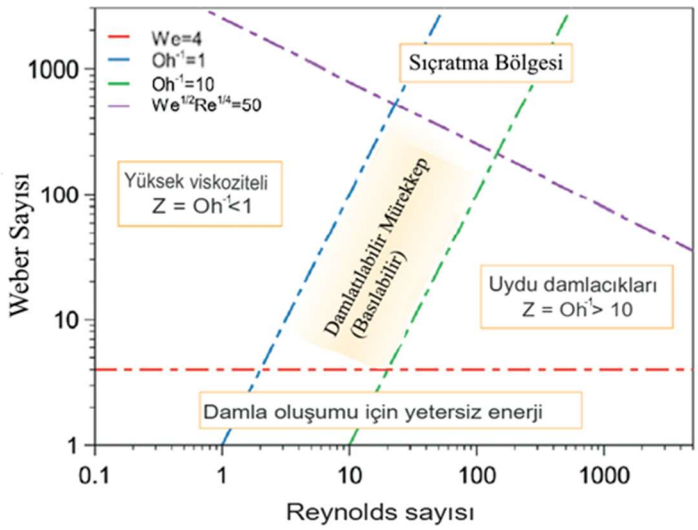
Li ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada esnek cihazlar için basılı elektrot üretiminin hangi proseslerle yapılabildiğini araştırmışlardır. Yukarıdan aşağıya ve aşağıdan yukarıya

üretim metotları incelenmişlerdir. Metotlar incelendiğinde özelleştirilmiş elektrot üretimine uygunluk olarak mürekkep püskürtmeli baskı teknoloji olarak görülmektedir. Mürekkep püskürtmeli teknolojisi tekstil ve kâğıda baskı olarak uzun yıllardır bilinmektedir. Nano teknolojinin gelişmesiyle iletken nano partikül katkılı mürekkepler ile devre basımını gerçekleştirmek mümkün hale gelmiştir. Esnek alttaş üzerine elektrot basımı sayesinde sağlık, haberleşme, tekstil, askeri ve birçok alanda, sensörler, optikler, esnek ekranlar, güneş hücreleri, seçici frekans geçirgenliğine sahip yüzeyler gibi uygulamaları yapılabilir olmuştur (Q. Li vd., 2019; W. Wu, 2019).

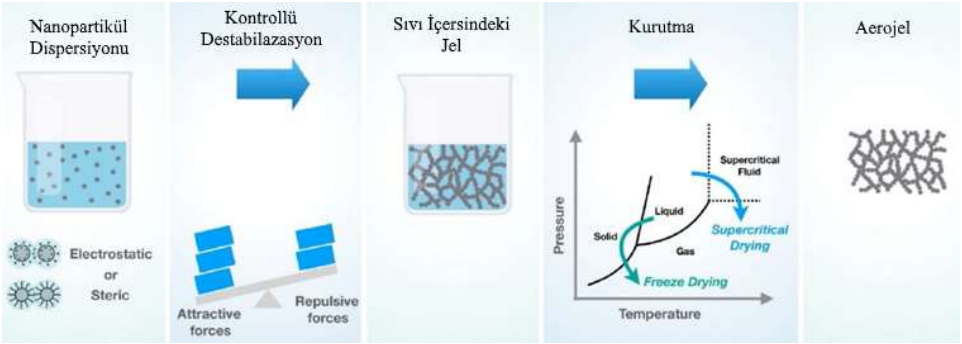
Nano partiküller, 100 nm ‘den daha düşük bir boyuta sahip olan partiküllü maddeler içeren malzemelerin geniş bir sınıfıdır. Nano partiküller, basit moleküller değillerdir ve üç katmandan oluşurlar. Yüzey katmanı, küçük moleküller, metal iyonlar ve polimerlerle aktif hale getirilebilen; kabuk katmanı, her haliyle kimyasal olarak çekirdekten farklı bir malzeme olan; çekirdek, nano parçacığın kendisi oluşturan merkez kısımdır. Kolloidal dispersiyon olarak da geçen iletken nano katılı mürekkebin flokülasyon ve koagülasyona yenik düşmeyerek yüzey katmanında partiküller arasında belirli bir uzaklıkta kalmasını sağlayacak elektriksel itki olan zeta potansiyeline sahip homojen akışkan haline getirilmesi gerekir. Gerekli durumlarda homojinasyon sağlanması için bazı katkı malzemeleri karışıma eklenerek sterik itkide oluşturulabilinir (Şekil 2.2). Basılabilir alanlarda bir mürekkep için bazı viskozite ve akışkan özelliklerine dikkat edilmelidir (Şekil 2.3) (Maleki & Bertola, 2020; Mostafaei vd., 2021; Samos-Puerto vd., 2019). Katkılama miktarı ve homojinasyon sağlanamazsa nanoparçacıkların birleşmesi söz konusu olacaktır. İçeriğin durumuna bağlı olarak aerojel elde edilebilir (Şekil 2.4). Genel şekline bağlı olarak bu malzemeler 0, 1, 2, 3 boyutlu olabilirler. Bu malzemelerin önemi, boyutlarının maddenin (içeriğinin) fizikokimyasal özelliklerini etkilediği ortaya çıktığında fark edilmiştir. Örneğin, Şekil 2.5 ‘te gösterildiği gibi altın nano parçacıkları farklı boyutlarda üretilmiştir. Bu nano partiküller, biyo-görüntüleme uygulamalarında kullanılan, boyutlarının ve şekillerinin değişimine bağlı olarak karakteristik renkler ve özellikler göstermişlerdir. Altın nano partiküllerinin oluşan solüsyonun rengi en-boy oranına, nano kabukların kalınlığına ve altın konsantrasyonuna (%) göre değişmektedir (Htwe & Mariatti, 2021; Khan vd., 2019; Matter vd., 2020; Venkatesh, 2018).



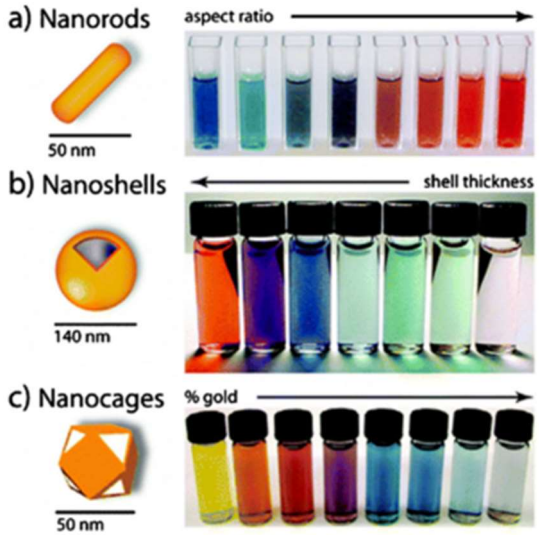
Şekil 2.2. Dispersiyon stabilitesi için elektrostatik ve sterik itki örnekleri, ve zeta potansiyeli şeması (Freire vd., 2011; Matter vd., 2020)



Şekil 2.3. Basılabilir mürekkebin tanım aralığı (Maleki & Bertola, 2020)



Şekil 2.4. Nanopartükül katkılma, homojenizasyon durumu ve aerojel eldesi (Matter vd., 2020)

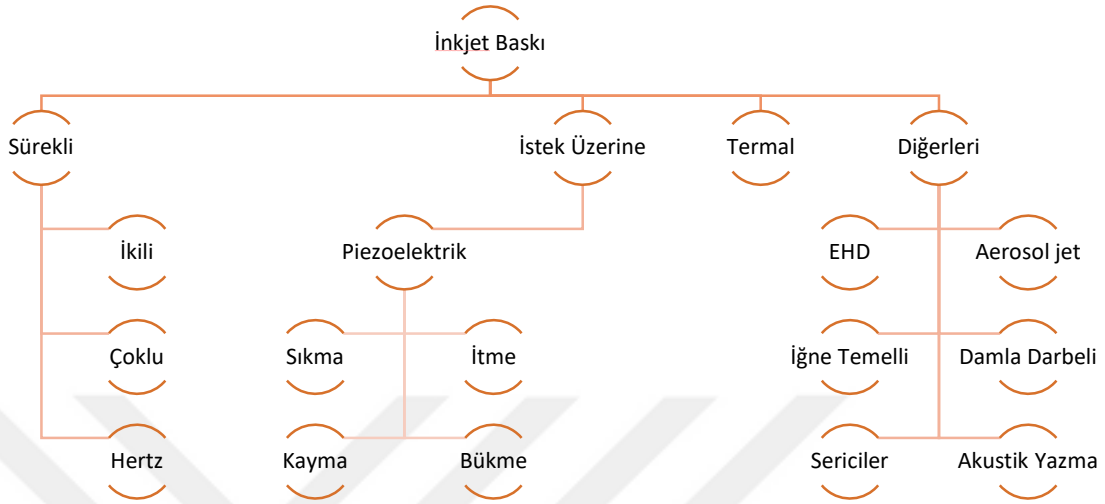


Şekil 2.5. Farklı şekil, boy, oran, kalınlık ve yüzdelerde altın nanoparçacık katkılı solüsyonların renksel farkları (Khan vd., 2019)

Nano partiküllerin en önemli özelliği, diğer parçacıklarla daha kolay etkileşimini sağlayan yüzey alanı-hacim oranıdır. Nano partiküllerde, yüksek yüzey alanı-hacim oranı difüzyonun daha hızlı gerçekleşmesini sağlamaktadır. Nano partiküller, karbon temelli, metal, seramik, yarı iletken, polimer ve lipit tabanlı olabilirler. Metal nano partiküller, plazmon rezonans ve optik özellikleri bakımından üstün özelliklere sahiptirler. Ayrıca, metalik nano partiküller, yüksek yüzey enerjisi, yığın hallerine kıyasla daha yüksek yüzey alanı-hacim oranı, kuantum uyumluluk ve plazmon uyarımı gibi karakteristiklere sahiplerdir. Özellikle altın ve gümüş gibi soy metaller, anti-mikrobik ve anti-kanser etkin maddeleri gibi medikal ve kataliz alanlarındaki gibi bilim ve teknoloji alanlarında araştırmacılar tarafından ilgi görmektedirler (Khan vd., 2019; Mazare vd., 2018; Pandiyan vd., 2019; Velmurugan vd., 2022).

Mürekkep püskürtme teknolojisinde mürekkebi püskürtmek için birçok metot mevcuttur. Bunlar temel olarak Şekil 2.6'da da verildiği gibi sürekli inkjet ve talep üzerine damla (DoD) olarak ikiye ayrılmaktadır (Shah vd., 2021). DoD yapısı gereği mürekkebi sürekli kullanılmadığı iletken nano katkılanmış mürekkebin bozulmasını ve israfını en az seviye indiren sürekli inkjete göre bazı avantajlara sahiptir. DoD teknolojisi de kendi içerisinde valf-jet, termal inkjet, piezo inkjet, Elektrostatik inkjet ve akustik inkjet gibi farklı teknolojiler barındırır. Bu teknolojilerin ayrımı mürekkebin nozul ağzından dışarıya atan

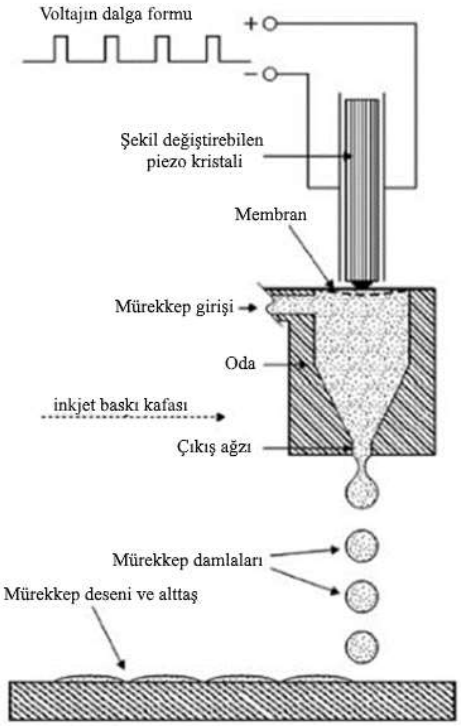
aktüatörün tipine göre isimlendirilmiştir. Bu teknolojilerden en hassas kontrole sahip piezoelektrik inkjet baskı sistemidir (Hoath, 2016; Hutchings & Martin, 2012; K. S. Kwon vd., 2020).



Şekil 2.6. İnkjet teknolojisinin sınıflandırılması (Shah vd. 2021'den değiştirilerek alınmıştır)

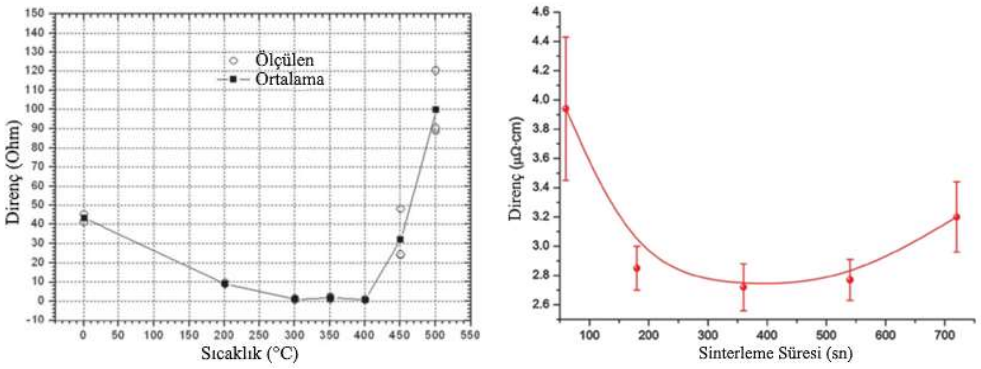
Piezoelektrik, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine (doğrudan etki) veya elektromekanik enerjiye (ters etki) çeviren katı hal dönüştürücüsüdür. Mekanik olarak indüklenen elektriksel polarizasyon doğrudan gerilim ile orantılıdır. Piezoelektrik, elektriksel büzülme ile kristallerin elektrokimyasal özelliklerine çağrışım yapar. Elektriksel büzülme, bütün dielektrik malzemelerin evrensel özelliğidir. Çünkü elektriksel yüklü tanecikler ayrılma sürecindeki başlangıç pozisyonlarından zoraki olarak yer değiştirdiğinde, uygulanan elektriksel alandaki deformasyon kısmi olarak elektriksel kutuplaşmanın göstergesidir. Piezoelektrik etkisi aynı zamanda 3 boyutlu yazıcı uygulamalarında da kullanılmaktadır. Piezoelektrik mürekkep püskürtmeli yazıcı teknolojisi son yıllarda oldukça sık kullanılmaktadır. Piezoelektrik mürekkep püskürtmeli yazıcı başlıklarının mürekkep damlacıkları için güçlü kontrol yeteneğine ve yüksek yazım doğruluğa sahip olmalarının yanı sıra ısıtılmaya gereksinim duymamaktadırlar. Bu yüzden, mürekkep uyumunda daha fazla esneklik sağlamaktadır. Piezoelektrik mürekkep püskürtmeli yazıcı başlıklarının farklı uygulamalarında, dalga formlarının sürülmesi doğrudan damlacığın hızını ve hacmini kontrol etmektedir (Hutchings & Martin, 2012; Poplavko & Yakymenko, 2020).

Tipik bir talep üzerine damla (Drop-on-Demand, DoD) temelli piezo püskürtmeli yazıcı başlığı birbirine paralel birkaç mürekkep kanalından oluşmaktadır. Her bir kanala voltaj sinyali uygulandığında mürekkep kanalında basınç osilasyonları üreten bir piezo aktüatör ile sağlanmaktadır. Bu basınç osilasyonları başlık ucundan damlayı dışarı itmektedir (Gonzalez-Macia vd., 2010; Stoyanov vd., 2016) (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Piezoelektrik aktuatörlü mürekkep püskürmeli yazdırma işleminin tek açıklıktaki çalışmasının ayrıntılı illüstrasyonu (Gonzalez-Macia vd., 2010).

İletken nanoparçacık katkılı mürekkep basıldıktan sonra iletken parçacıkların birbirlerine yaklaşması ve iletimin güçlendirilmesi için sinterlenmelidirler. Sekil 2.8'de Stüwe ve diğerlerinin (2015) yaptığı çalışmada gümüş nanoparçacık katkılı mürekkebin sinterleme sıcaklıklarına ve sinterleme sürelerine göre direnç değişimi verilmiştir. 350 saniye ve 300-400°C arasında direnç değerinin en düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.8. Gümüş nanoparçacık katkılı mürekkep baskılı elektrodun sinterlenmesi sonucu direnç değişimi (Stüwe vd., 2015).

Sinterleme sıcaklıkları ve kürleme yöntemleri iletkenlik üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bunların yanında alttaşın malzemeside iletkenlik üzerinde etkileri mevcuttur (Wiklund vd., 2021). Çizlege 2.1 ve Çizlege 2.2'de alttaşın, sinterleme yönteminin ve mürekkebin farklı olduğında direnç üzerindeki etkileri verilmiştir.

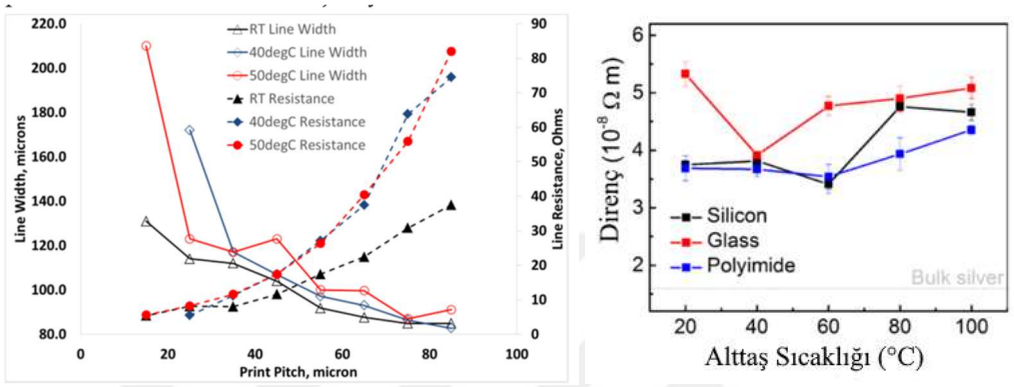
Çizlege 2.1. Cam alttaş üzerine basılmış farklı iletken nanoparçacık katkılı mürekkebin sinterlenme sıcaklıkları ve elde edilen dirençler (Wiklund vd., 2021)

Nanoparçacık Mürekkebi	**Sinterleme Sıcaklığı (°C)**	**Özdirenç (μΩ·cm)**
Gümüş	200	4
Bakır	200	18
Altın	240	714
Alüminyum	600	41,2
Nikel	230	460
ITO	400	100

Çizelge 2.2. Farklı alttaş üzerine basılmış gümüş nanoparçacık katkılı mürekkebin farklı kürleme yöntemleriyle sinterlenmesi ve elde edilen dirençler (Wiklund vd., 2021)

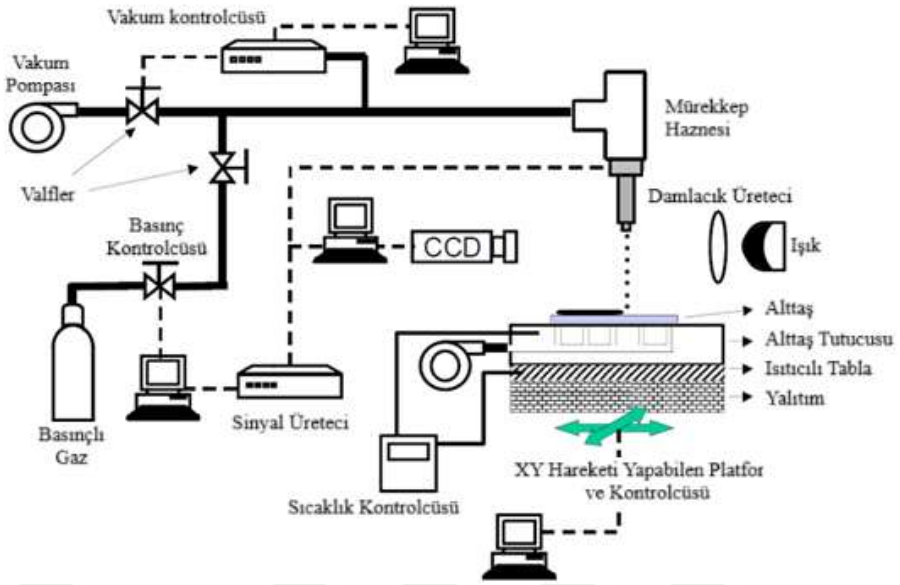
Sinterleme Yöntemi	**Direnç (μΩ·cm) Cam Yüzey**	**Direnç (μΩ·cm) PI Yüzey**
Termal	4,00	3,60
Flaş Lamba	5,59	3,30
IR Lamba	3,00	65,50
Lazer	3,41	4,60
UV	48,00	6,50
Argon Plazma	8,73	15,00
Mikrodalga	-	30,00
Elektriksel	2,47	17,00

Mavuri ve diğ. (2019) ve Smith ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmalarda alttaş sıcaklığının önemi vurgulanmıştır. 20-60°C sıcaklıklar arasında ayarlanabilir alttaşın direnç ve yüzeyi tutunma özelliklerini artırmada önemli olduğu görülmüştür. Şekil 2.9'da alttaş sıcaklığının dirence etkisi verilmiştir. Aynı zamanda çekilen elektrot genişliğinin de iletkenlik ve sıcaklık seçiminde etkili olduğu görülmektedir.



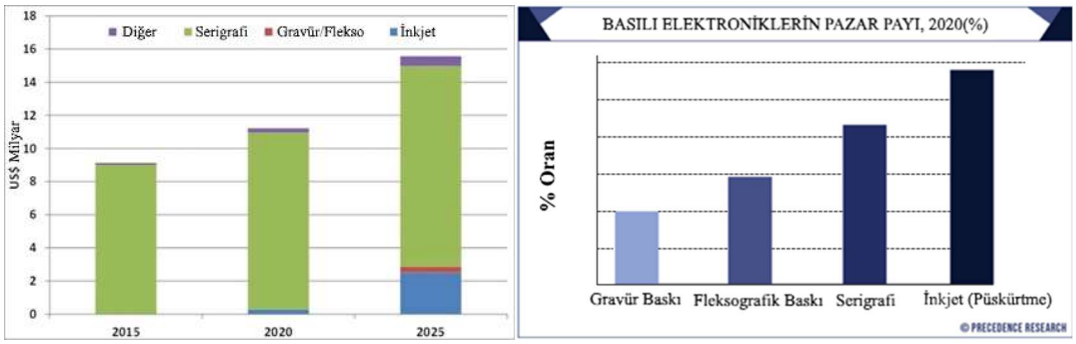
Şekil 2.9. Soldaki şekilde farklı çizgi kalınlıklarında ve farklı sıcaklıklarda direnç değişimi verilmiştir(Mavuri vd., 2019); sağdaki şekilde ise farklı alttaşlarda farklı alttaş sıcaklıklarında gümüş nanoparçacık katkılı mürekkebin direnç değerleri verilmiştir (Smith vd., 2017)

Piezo baskılı sistemin kurulabilmesi için bazı parçalara ihtiyaç olmaktadır. Temelde bu parçalar piezo entegreli baskı kafası, mürekkep haznesi, mürekkep haznesine basınç kontrolü yapan kontrol sistem ve pompa, piezo kontrol sürücüsü, baskı kafasından atılan damlayı izlemek üzere yüksek hızlı kamera ve kameranın çektiği görüntüyü işleyen sistem veya monitör, basım yapılacak alttaşı tutan genel olarak vakuma sahip tabla, tabla ısıtıcısı ve hassas XY eksen kontrolü tabla olarak sayılabilir. Şekil 2.10'da parçaların ve yerleşimleri verilmiştir.

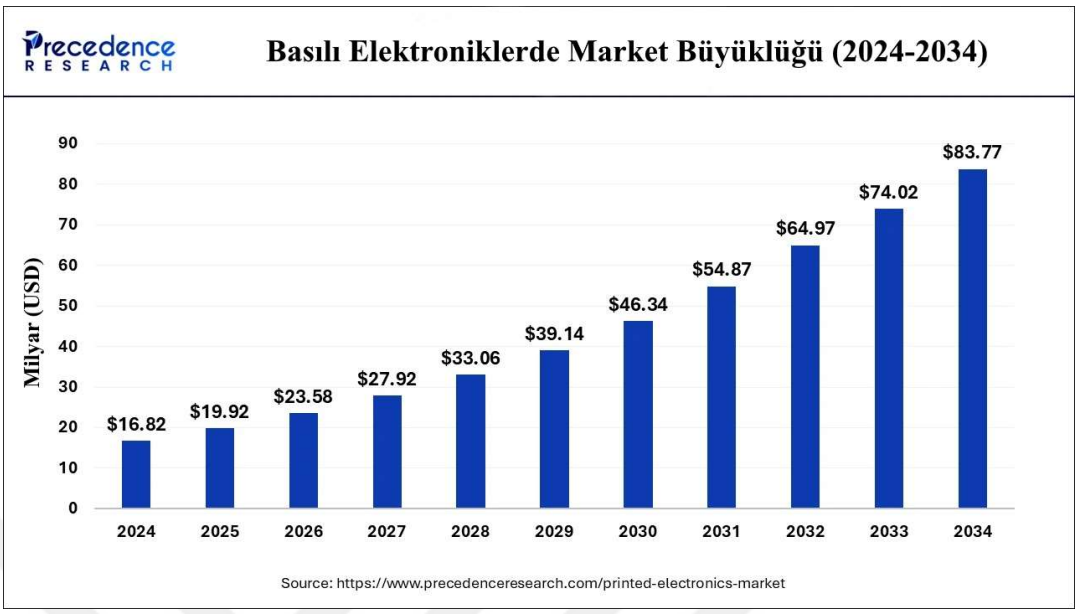


Şekil 2.10. Baskı sisteminin şematik gösterimi (Qin, 2015)

Sektörde giyilebilir elektronik ve prototip PCB üretimi için ihtiyaç gün geçtikçe artmaktadır. Bu arzın karşısında geliştirilen bazı cihazlar ve bunların farklı kabiliyetleri bulunmaktadır. Cihaz kabiliyetlerinin yanı sıra giyilebilir elektronik cihazlarda neyin tercih edildiği konusu cihaz parametrelerin belirlenmesinde ve cihazın özelleştirilmesinde önemli konulardandır. Şekil 2.11'de basılı elektronikte 2015 senesinde serigrafi (screen printing) pazara hakimken 2020 yılına geldiğimizde OLED teknolojisiyle de beraber inkjet teknolojisinin pazarı domine ettiği görülmektedir. Şekil 2.12'ye bakıldığında 8,5 milyar $ olan basılı elektroniğin Pazar büyüklüğü 2030 yılında yaklaşık 5 kat büyüyerek 44,4 milyar dolar seviyelerine geleceği tahmin edilmektedir.

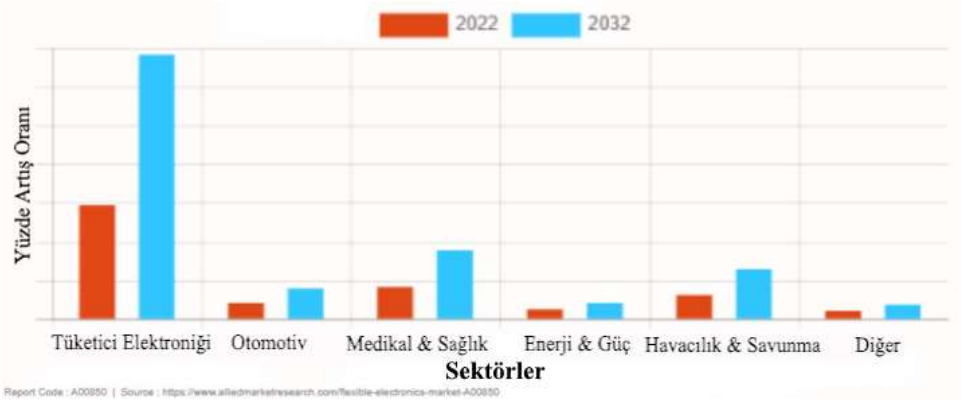


Şekil 2.11. IDTechEx' e göre 2015-2025 yılları arasındaki basılı elektronikteki olası pazar payları ve 2020-2030 araştırmasında Precedence Research'a göre 2020'deki yüzdelik pazar payı



Şekil 2.12. Precedence Research'a göre 2024'te 16,82 milyar dolar olan basılı elektronik pazarı 2034 yılında 83,77 milyar dolar olacağı tahmin ediliyor

Pazar araştırmalarına bakıldığında esnek alttaşa sahip basılı elektroniğin Pazar payının büyüdüğü görülmektedir. Esnek elektronikte Pazar araştırmasına bakıldığında tüketici elektroniğinin pazarı domine ettiği ve en büyük büyümeyi göstereceği ön görülmektedir (Şekil 2.13).

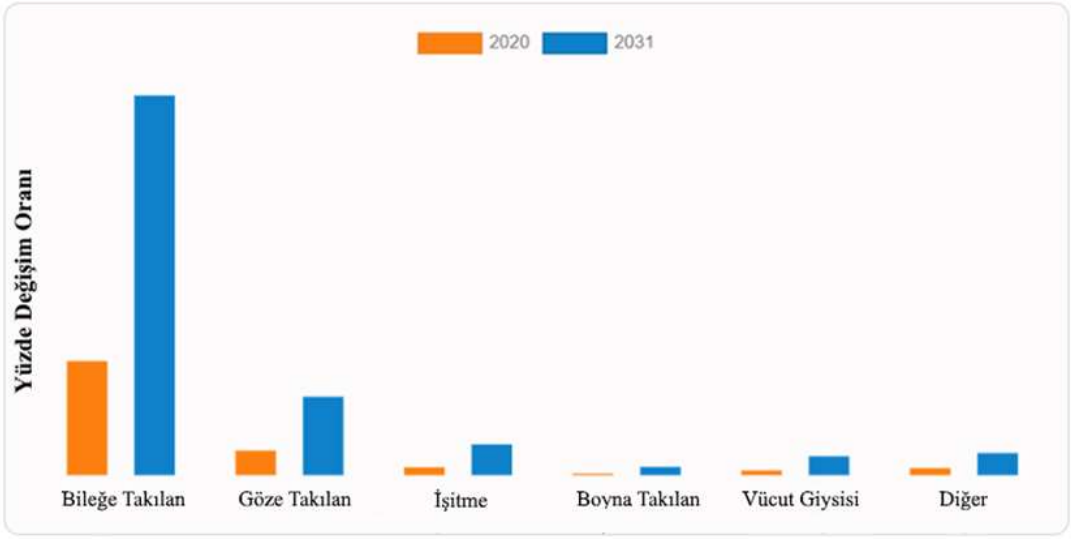


Şekil 2.13. Allied Market Research'e göre sektörlerin kendi içindeki 2022'den 2032'ye esnek basılı elektronikteki pazar payları artışı

Giyilebilir sensör IDTechEx üç dalga halinde ayırmaktadır. İlk dalga, uzun yıllardır giyilebilir cihazlara dahil edilen, genellikle on yıllar önce giyilebilir ürünler için geliştirilen ve bugün olgun endüstriler olarak var olan sensörleri içerir. Örnek olarak

saatlerin içindeki sensörler veya işitme cihazındaki sensörler verilebilir. Akıllı telefonlara yapılan büyük teknoloji yatırımının ardından ikinci bir giyilebilir sensör dalgasından bahsedilebilinir. Akıllı telefonlardaki sensörlerin çoğu, giyilebilir ürünlerde kullanılmak üzere kolayca uyarlanabilir; giyilebilir hale getirilebilirler. Üçüncü dalga giyilebilir sensörler ise direkt olarak giyilebilir tek başlarına kullanılabilen cihazlardır ve sporcu bileklikleri ve Google glass gibi akıllı gözlükler örnek olarak verilebilir.

Giyilebilir teknoloji ile ilgili Pazar araştırmalarına bakıldığında bilek, göz, kulak (duyma), boyun, vücut ve diğerleri şeklinde görmek mümkündür (Allied-Market-Research, 2022). Şekil 2.14'te giyilebilir teknolojinin kullanım yerlerine göre Pazar dağılımı verilmiştir. Araştırmalara da dayanarak bilek giysisinin sektörü domine ettiği ve gelecekte daha çok tercih edileceğini göstermektedir.



Şekil 2.14. Allied Market Research'e göre giyilebilir teknolojinin alt segmentlere göre 2020 yılı ve 2031 yılı arasındaki yüzde değişim oranı

Yapılan çalışmalara bakıldığında genel itibarıyla 10-30 yaş arası erkeklerde spor yaralanmalarının sıklıkla görüldüğü ve antrenman sırasında doğru duruş, doğru ivme, doğru açı gibi hareketlerin sağlıklı ve doğruluğunun tespitinde bir takım giyilebilir cihazlara ihtiyaç duyulduğu görülebilir (Aroganam vd., 2019).

Piyasada bulunan iletken yol yazdırılabilen cihazlara bakıldığında iki temel tip göze çarpmaktadır. Bunlar büyük boyutlarda ve 400 kg üzerinde toplam ağırlıkları olan endüstriyel tip olarak adlandırılabilecek cihazlar ve genellikle 100 kg altında ve bir A4 kağıdı boyutlarında baskı yapabilen masaüstü tip yazıcılardır.

Genel özellikler olarak cihazlarda tabla sıcaklığı ayarı, tablada alttaşı tutmak için vakum, 2 adet damlacıkları izleme ve kalibrasyonu yapabilmek için kamera sistemi, UV, termal veya NIR gibi kürleme sistemi bulunmaktadır.

Rakip analizleri çıkarılırken doğrudan ve dolaylı rakipler göz önünde bulundurulmuştur. Örneğin yolu kazıyıp daha sonra şırınga mantığı iletken lehim ile yolu dolduran sistem dolaylı rakip olarak ele alınmıştır. Bu tarz cihazlarda en büyük dezavantaj iletkenlik değerlerinin iletken nanoparçacık katkılı mürekkep püskürtmeli cihazlara kıyasla düşük olmasıdır ayrıca şırınga sistemi kullanıldığından damlacık püskürtmeli cihazların çok nozullu teknolojisine kıyasla yavaş kalmaktadır. Aerosol jet kullanan sistemlerde de baskı kafasının tek oluşu hız konusunda problemler oluşmasına yol açmaktadır.

Konvansiyonel elektroniklerin üretim metotları, çevre dostu olmayan, zaman alan ve karmaşık eklemeli ve çıkarmalı (aşındırmalı) üretim tekniklerinden oluşmaktadır. Bu yüzden, 3 boyutlu yazdırılan elektroniklerin amacı bu eksiklikleri azaltmak ve aynı zamanda düşük maliyetli elektroniklerin üretimini sağlamak ve çeşitli alt taşların üzerine direkt olarak üretilebilecek elektriksel komponentlerin ve devrelerin tasarımsal özgürlüğünü arttırmaya yardımcı olmaktır.

Metalik nano partiküllü mürekkepler ticari marketlerde hazır olarak bulunmaktadırlar ve diğer mürekkep türlerine kıyasla daha yüksek elektriksel iletkenliğe sahip oldukları için iletken yolların ve desenlerin üretilmesi için genel olarak kullanılmaktadırlar. Farklı malzeme kompozisyonlarının metalik nano partiküllü mürekkeplerle yazdırılan final desenin elektriksel, kimyasal ve malzeme özelliklerini doğrudan etkilemektedir.

Bu çalışmanın amacı, iletken esnek elektrotlara sahip elektronik aygıtların üretilebilmesi için 3B yazıcıların geliştirilmesidir. Nano katkılı mürekkep kullanılarak yapılan bu

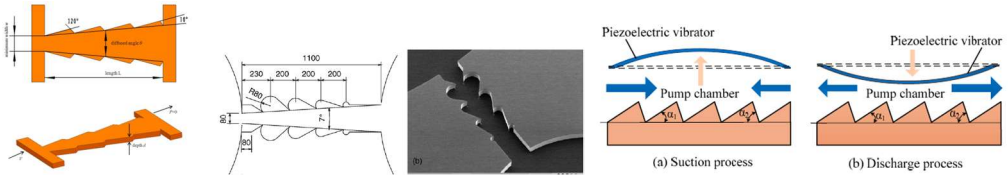
cihazlarda desenleme oldukça önemlidir. Desenin hassasiyeti için hassas bir hareket sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda damlacık kontrolü için baskı kafasının mikro kanallı yapısı, nozul şekilleri, piezoların uygun konumlandırılması ve uygun tekniklerin kullanılması gerekir. Baskı kafası tasarımı ile püskürtülecek mürekkebin damlacık hızı ve büyüklüğü kontrol edilecektir. Hassas bir hareket sistemiyle de desenin doğruluğu gerçekleştirilecektir. Böylelikle, oluşacak son ürünün yüzey şekli, boyutları ve pürüzsüzlüğünün kontrol edilebilmesi sağlanacaktır. Bunun sonucu olarak, kolay ve hızlı bir şekilde daha ekonomik olarak yüksek performanslara sahip elektronik aygıtların yazdırılabilmesi sağlanacak ve hangi parametrelerin baskıda daha etkin olduğu araştırılacaktır. Esnek yüzeye basılan ve sinterlenen elektrotun soyulma, mukavemet ve yorulma karakteristikleri incelenecektir.

2.1. Mikropompa

Mikro pompalarda akışkanın hızlandırılması basınçların düzenlenmesi ve akış yönü kontrolü için genel olarak kanallarda difüzör duvar yapıları kullanılmaktadır. Difüzör kanal yapıları yakınsak ve ıraksak olarak iki temele ayrılmaktadır. Benzer durum nozul uçlarında da görülmektedir. Nozul uçlarında ıraksak ve yakınsak kanal duvarlarından farklılıklar gösterebilir. Örneğin mikro pompa çıkışında ıraksak kanal kullanılırken nozul ucuna doğru yakınsak duvarlar tercih edilmektedir (Gerlach vd., 1995; Olsson, 1998; Tahmasebipour & Paknahad, 2019; Thomas & Muruganandam, 2018; Van Der Bos vd., 2011; Q. Yan vd., 2021). Piezoelektrik malzeme veya herhangi bir tahrik sisteminin pompa odasındaki hacmi değiştirmeye yönelik hareketi sırasında akışkan her iki yönede gitme eğiliminde bulunur. Pompa giriş çıkışlarındaki kanal duvarlarının ıraksak veya yakınsak oluşu, farklı tasarımsal yaklaşımların gerçekleştirilmeye çalışılması veya çek valf kullanılma ihtiyacı bu geri kaçmanın engellenmesinin ihtiyacından doğmuştur (Izzo vd., 2007; Mohith vd., 2019; Tahmasebipour & Paknahad, 2019; Woias, 2005; Zeng vd., 2023; J. H. Zhang vd., 2017).

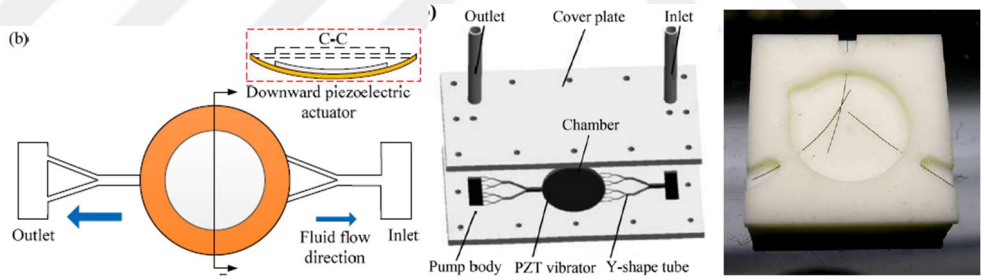
Pompa giriş çıkışlarından yakınsak ve ıraksak difüzör kullanımında değişik yöntemler denenmiştir. Yol boyunca duvarlarda testere dişi benzeri çıktılar eklenmiştir (Asadi Dereshgi vd., 2021; Thomas & Muruganandam, 2018; Xu vd., 2014). Bazı çalışmalarda

bu yoldaki çıkıntılar yuvarlatılma yapılarak akış kontrol edilmeye çalışılmıştır (Izzo vd., 2007). Bu yapıların düz daralan veya genişleyen yollardaki akış veriminin arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.15'te bu akış yönünü düzenleyici yapılara örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Solda testere dişi eklenmiş difüzör çalışması (Xu vd., 2014), ortada yuvarlatılmış testere dişlerine sahip bir difüzör görseli (Izzo vd., 2007) ve sağda testere dişi tabanlı pompa odası (Q. Yan vd., 2021)

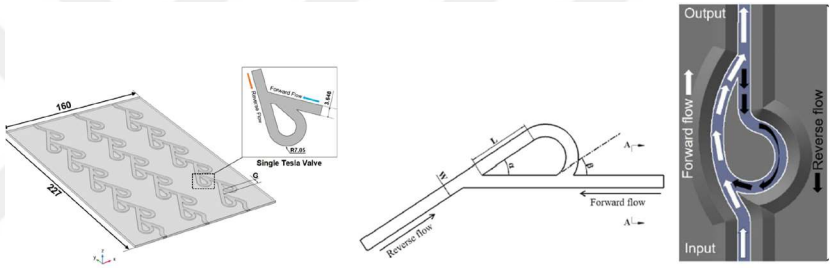
Bazı çalışmalarda ise pompa odasına bağlanan kanal, bağlanmadan önce veya pompa çıkışında ufak küçük kanallara ayrılarak verim artırılmaya çalışılmıştır (Q. Yan vd., 2021). Benzer şekilde tek bir pompa odasına birden fazla ufak kanal ile akışkanın pompa odasına dolması da hedeflenebilir (Y. Cheng & Lin, 2007) (Şekil 2.16).



Şekil 2.16. Soldaki görselde ıraksak ve yakınsak lüle yerine dallanma yapan kanllar (Q. Yan vd., 2021); ortadaki görselde pompa odası giriş ve çıkış kısımlarında farklı sayılara ve kalınlıklara sahip difüzör mekanizması örneği (H. Li vd., 2021); sağda bir pompa odasına bağlanan üç kanal ve akışkan tahliyesi ortadaki bir orifizden yapılmakta (Y. Cheng & Lin, 2007)

Sıvıyı pompalamak için ayrı bir parça kullanmadan akışkanı hareketlendirme ve yönlendirmeye dair yapılan valfsiz mikro pompa çalışmalarında en çok kullanılan ve verimi artırılmaya çalışılan yöntemlerden biri de tesla valfi kanal yapısı kullanımıdır. Bu tasarımın ana avantajlarından biri, mekanik parçaların olmamasıdır. Bu sayede, hem mikro ölçekte valf üretimi zorluğundan kurtulunmuş hem de sürtünme veya aşınma gibi sorunlardan kaynaklanan enerji kayıplarının minimum düzeyde olması sağlanmaktadır.

Ayrıca, kompakt bir yapıya sahip olduğu için mikro pompa uygulamaları için idealdir. Tesla valfi ve tesla valfinden esinlenerek yapılan çalışmalarda sıvının doğal akışı pompalanmak istenen yönde kolaylaştırılıp düzgünleştirilirken; ters yönde olası bir akışkan hareketinin engellemesi akışın ters yönde hareketi sırasında çeşitli kanallar ve ceplere girmek zorunda bırakılmasıyla yapılmaktadır (Iverson & Garimella, 2008; Thomas & Muruganandam, 2018). Tesla valf yapısının açıları, ölçülerini ve tekrar sayılarının optimize edilerek akışkan davranışının ve valf veriminin ölçüldüğü pek çok çalışma bulunmaktadır (García-Morales vd., 2021; Iverson & Garimella, 2008; K. Li vd., 2021; Monika vd., 2021; H. Wang & Chen, 2022; Zeng vd., 2023). Valfsiz mikro pompa yapılarında kaçakların minimize edilmesi için çoklu bölüm kullanımı, parametre ayarlarının değiştirilmesi veya kanal yapısın verimi artıracak şekilde yeniden tasarlanması yapılabilir (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Çoklu bölüme sahip tesla valf kanal yapısına sahip çalışma (Monika vd., 2021); ortada parametre ve yapısal farkları olan tesla valfi kanal yapısına sahip tasarım karşılaştırması (K. Li vd., 2021); Sağda ise farklı bir tesla valf tasarım yaklaşımı (Shaikh vd., 2021)

Valfsiz tesla valfi mikro pompalarda geri kaçağın önlenmesi için çoklu bölme kullanımı yapılabilmektedir. Şekil 2.18'de çoklu bölme sayıları ve parametre değişimleriyle ilgili çalışmalar verilmiştir.

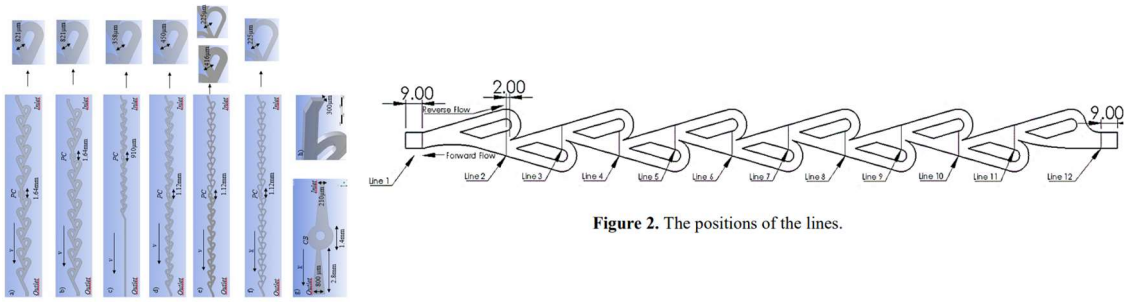
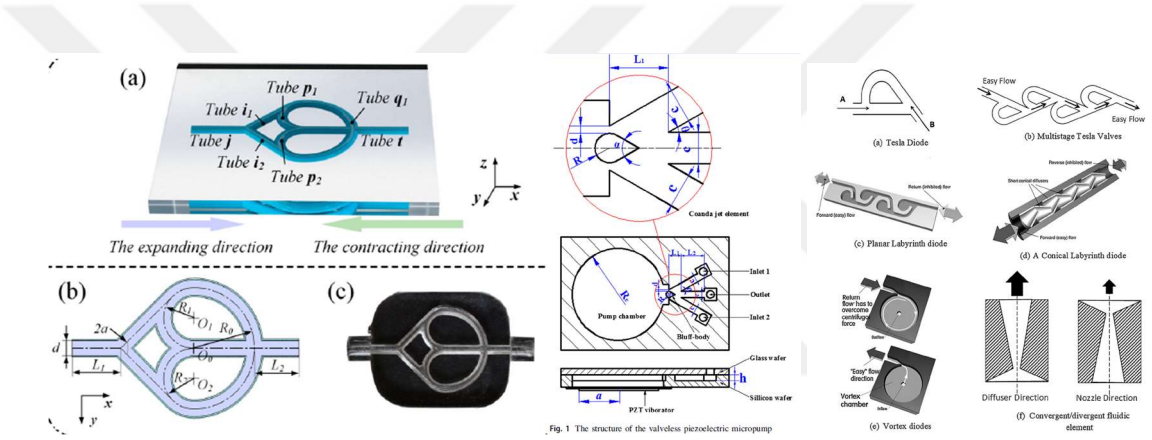


Figure 2. The positions of the lines.

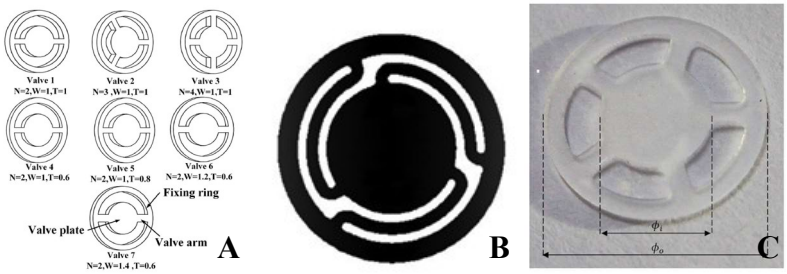
Şekil 2.18. Bölme sayısına ve parametre değişimine bağlı tesla valfi verim çalışması (García-Morales vd., 2021); sağda çoklu bölüm tesla valf odasına sahip bir kanalda hıza bağlı debi kontrol çalışması (Yontar vd., 2021)

Valfsiz mikro pompa çalışmalarına birkaç örnek Şekil 2.21 da verilmiştir. Piezonun pompa odasına baskı uygulamasıyla giriş ve çıkış yönüne doğru pompa odasından akışın kaçış hareketi olur. Valfsiz mikro pompa çalışmalarında amaç akışkanın istenilen akış doğrultusunda zorlanmadan veya yön değiştirmeden ilerlemesi sağlanırken çıkış yönünden gelebilecek olan akışkanın ceplere girmesi veya yön değiştirerek hızının ve enerjisinin harcanmasıyla o yönde akışkan hareketini engellemeyi amaçlar. Fakat mikro kanallarda ince hesaplanmış bu yapıları oluşturmak üretim zorluklarını beraberinde getirmesi sebebiyle bu çalışmada tercih edilmemiştir.



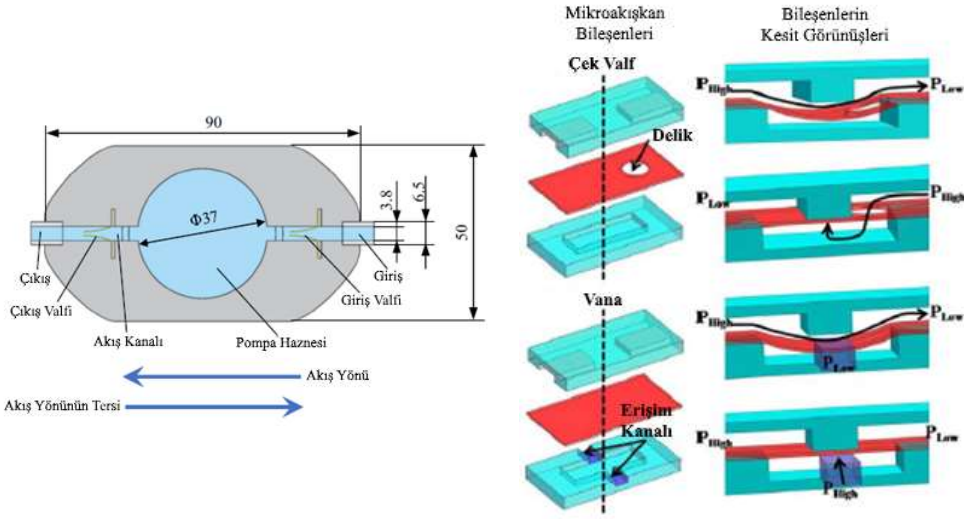
Şekil 2.19. Tesla valf yapısından esinlenerek geliştirilmiş kanal yapısı (X. Chen vd., 2021); ortada benzer mantıkla çalışan bir kanal tasarımı (X. He vd., 2019) ve sağda tesla valfi benzeri prensiplerle çalışan farklı tasarımlar (Thomas & Muruganandam, 2018)

Mikro pompa yapılarında akışkanı yönlendirmek için farklı valf tipleri veya kanal tipleri kullanılabilmektedir. Birçok çalışmada dairesel çek valfler tercih edilmiştir. Bu dairesel çek valfter dışarıda bir simit dairesi ortasında ise bir içi dolu daire şeklinde tasarlanmışlardır (Şekil 2.20). Dış simit halka sabitlenirken içerideki daire ince bağlantılarla serbest halde yerleştirilir. Dışarıdaki simit geometrisi ortadaki daireye ince yollar ile bağlantı kurulması esnekliğin sağlanması valf duyarlılığının artırılıp azaltılması ile basınç değişimlerinde iç halkanın hareket etmesi prensibine dayanarak çalışır. Bu ince yolların sayısı ve şekli valf verimini etkilemektedir. Yol kalınlık ve diğer parametrelerin değişimiyle debi ölçümüne bağlı valfin ve pompanın verimi ölçülmektedir.



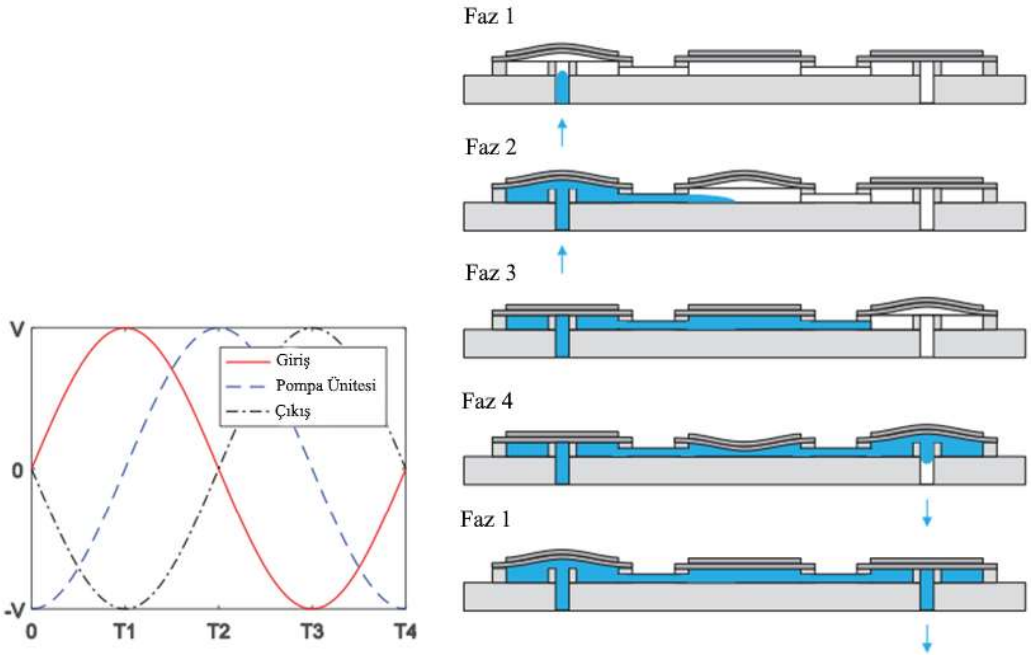
Şekil 2.20. A) Farklı kalınlıklarda ve farklı düz kol sayılarında dairesel çek valf (L. He vd., 2020) **B)** esnekliği artırmak için kol yapısına kıvrımlar eklenmiş bir mikro pompa çek valfi (J. Dong, Cao, vd., 2020) **C)** 5 kollu bir pasif çek valf membran (H. K. Ma vd., 2015)

Pasif olarak çek valf görevi görebilen farklı yapılarda oluşturmak mümkündür. Örneğin 37 mm pompalama odası kullanılan bir çalışmada kanal içerisine elastik konik bir yol takılarak ters yönlü geçiş yapacak akışın durdurulması hedeflenmiştir (W. Huang vd., 2021). Başka bir çalışmada kanal içerisinde belirli noktalarda çıktılar yapılmış ve bu çıkıntılara ve akışın geçiş yönüne bağlı şekillendirilmiş membran kullanılarak akış yönü kontrolü sağlanmaya çalışılmıştır (Mosadegh, 2010). Şekil 2.21'de akışkanın hareketiyle tek yönlü geçişi sağlayan yapılara örnekler gösterilmiştir.



Şekil 2.21. Elastik valfli kanala sahip piezoelektrik tahrikli mikro pompa yapısı (W. Huang vd., 2021); sağ da şekillendirilmiş kanal ve akış yönüne ve kanal tipine bağlı şekillendirilmiş mebran ile çek valf tasarımı (Mosadegh, 2010)

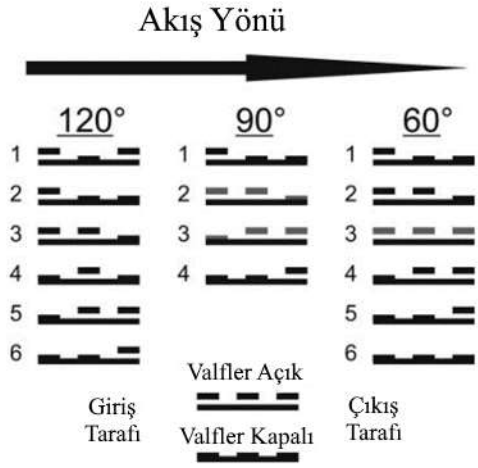
Akış ve hacim kontrolü için peristaltik pompa yapısı piezoelektrik tahrik mekanizmasıyla birleştirildiği yapılarda mevcuttur. Peristaltik pompada akışkanın yolu geri dönüşe kapatıldığı için pozitif deplasmanlı pompa gibi çalışarak piezoelektrik materyale uygulanan voltaj sonuncunda ortaya çıkan hareketin hacimdeki değişimi kadar bir akışkan her seferinde pompa çıkışına iletilebilmektedir. Peristaltik pompa yapısında pompa odası ve kanal tasarımlarında piezoelektrik materyalin kanal çıkışını kapatmasıyla ekstra bir valf yapısına gerek kalmadan pompa sistemi tasarlanabilir (Chia vd., 2011; Q. Lin vd., 2007; H. Yang vd., 2008; Yeming & Junyao, 2019). Peristaltik pompa yapısına ve piezoların sinyalizasyon yapısı birer örnek Şekil 2.22'de verilmiştir.



Şekil 2.22. Piezoelektrik diski aynı zamanda valf olarak kullanabilen peristaltik pompa (D. H. Wang vd., 2019)

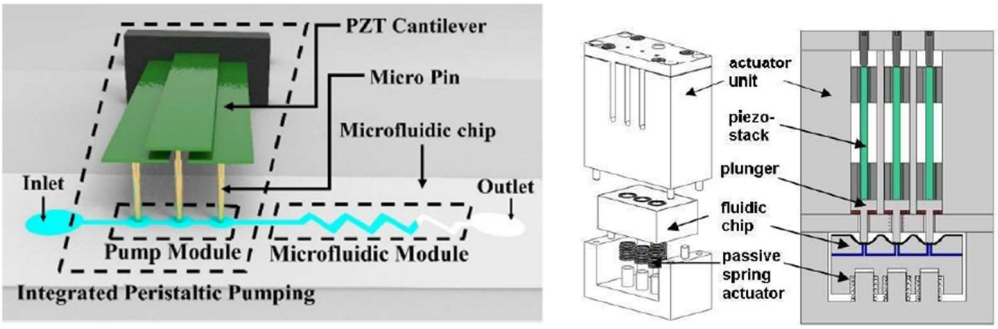
Peristaltik pompalarda piezo hareketleri derecelere bağlı olarak farklı adım sayılarında gerçekleşebilir. 120° derecelik bir hareket tekrarında hareket mesafesine bağlı sıvı hacminin pompalanması için 6 adıma ihtiyaç duyulurken 90°'lik bir hareket sekansında ise 4 adımda pompa içerisinden sıvının tahliyesini gerçekleştirebilir (Şekil 2.23) (Graf & Bowser, 2008). Burada Şekil 2.8'de gösterildiği gibi sinüzoidal dalga ile sürülebilen piezolu peristaltik pompaları aynı zamanda kare dalga ile de sürmek mümkündür. Normalde kapalı durumda olan pompalarda – den + ya geçen voltaj değişimine gerek

olmayabilir. Sadece sıfırdan +V veya sadece sıfırdan belirlenen negatif Voltaj değeri aralığında çalışabilir.



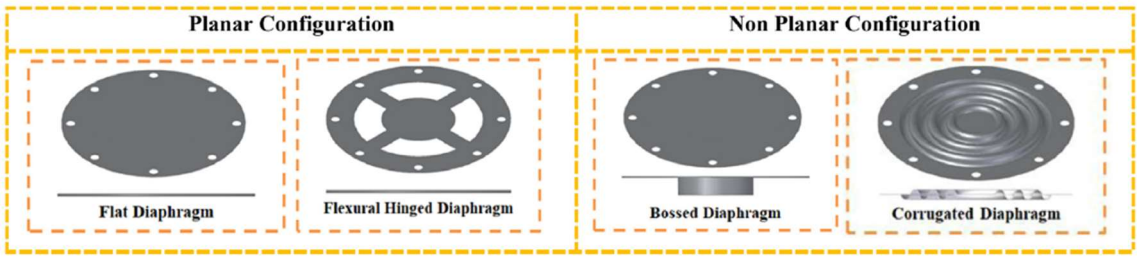
Şekil 2.23. Üç adet piezoelektrik malzeme ile tahriklenen peristaltik pompada sinyal gönderim sırası (Graf & Bowser, 2008)

Piezoelektrik materyalin mikro pompalarda farklı şekillerde kullanılabilir. Bu sistemlerde piezoelektrik malzeme akışkan sisteminin dışında bir ortamda çalışırken belirli aparat ve aktarım organlarıyla pompa odasını tahrikleyerek kullanılabilir (T. Ma vd., 2019). Bu yapılarda piezoelektrik malzemenin hareket miktarı artırılıp azaltılabilir. Yine bu sistemin faydası olarak elektriksel alandan uzak ve ayrıca daha ufak mikro kanal sistemleri tasarlanabilir. Şekil 2.24'te pompa odasında bulunmayan piezoelektrikle tahriklenebilen mikro pompa yapılarına örnekler verilmiştir.



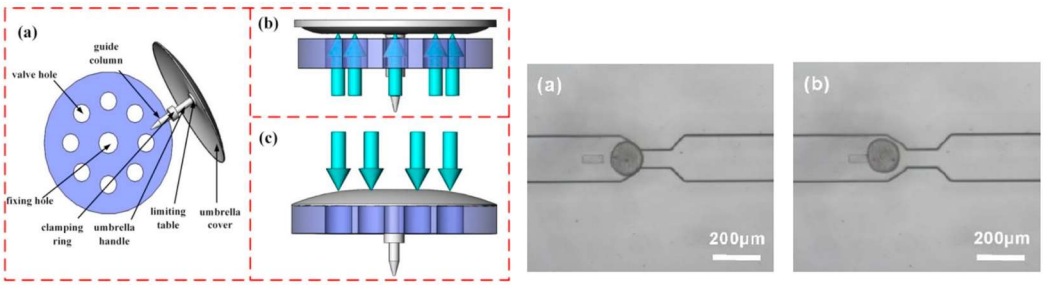
Şekil 2.24. Dış bir ortamda çalışarak mikro pinleri tahrikleyen piezolu mikro pompa yapısı (T. Ma vd., 2019); sağında yaylarla desteklenmiş normal durumda kapalı bir peristaltik mikro pompa yapısı (Trenkle vd., 2011)

Mikro pompalarda pompa odasın membranı yapısında konfigürasyon yapmakta mümkündür. Esnekliği sağlamak için ara yollar kullanılabilir veya yine dalgalı bir membran yapısı ile akış hızı ve deplasman kontrol edilmeye çalışılabilir. Bu tip yapılarda membran yapısı da optimize edilmeye açık yapılar arasındadır (Mohith vd., 2019). Şekil 2.25'te farklı membran yapılarına örnekler verilmiştir.



Şekil 2.25. Farklı membran tasarımları (Mohith vd., 2019)

Mikro pompa düzeneklerinde farklı yaklaşımlar olduğu kadar geleneksel yaklaşımlarda mevcuttur. Örneğin çek valf yapısında sıklıkla karşılaştığımız bilyeli çek valfler mikro pompa yapılarında da kullanılmaktadır (Mohith vd., 2019; Y. Wang, Uesugi, vd., 2019; Yamahata vd., 2005). Bunun yanında şemsiye valf yapısı da sıklıkla kullanılan çek valf yapılarındandır (S. Chen vd., 2021; T. Peng vd., 2019; X. Wu vd., 2021). Şekil 2.26'da geleneksel çek valf yapıları gösterilmektedir.



Şekil 2.26. Mikro akışkan sistemlerde pasif çek valf yaklaşımları solda şemsiye tipi valf (X. Wu vd., 2021); sağda bilyeli çek valf (Y. Wang, Uesugi, vd., 2019)

Piezoelektrik materyalin yüksek hız, yüksek hassasiyet, küçük boyutlar, elektro-mekanik dönüşüm kolaylığı, güvenilirliği ve dayanıklığı gibi avantajları sebebiyle mikro pompalarda tahrik mekanizması olarak piezoelektrik materyaller kullanılabilmektedir. Çizelge 2.3'de piezo ile tahriklenen mikro pompa parçalarının ölçüleri verilmiştir.

Piezoelektrik malzemeler piezo seramiğinin boyutları ve kalınlığı aynı zamanda üzerine yapıştırılan malzemenin boyutları, kalınlığı ve malzeme özellikleriyle ilişkili olarak hareket edebilmektedir. Piezo seramiğine voltajın pozitif ve negatif olmasına göre piezoelektrik materyal genişleme veya daralma yapabilmektedir. Piezo malzemeler malzeme çifti olarak çalışırlar ve piezo seramiğinin genleşmesi veya daralması ile bağlı olduğu malzeme eğilmeye zorlanmaktadır. Bu sebeple piezonun boyutları pompalamak istenilen hacim ile ilişkili olarak değişim gösterebilir.

Çizelge 2.3. Literatürde piezoelektrik ile yapılmış mikro pompa çalışmalarındaki pompa odası boyutları

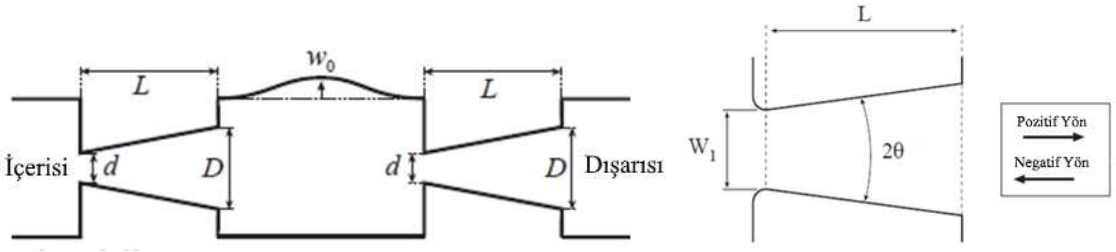
Referans	Seramik çapı (mm)	Piezo disk çapı (mm)	Pompa odası çapı (mm)	Pompa odası yüksekliği (mm)	Seramik kalınlığı (mm)	Piezo kalınlığı (mm)	Membran kalınlığı (mm)
(Olsson, 1998)	-	16 13 12	19	0,1	0,2	-	0,15
(W. Huang vd., 2021)	-	37		1	-	-	-
(J. Dong, Cao, vd., 2020)	-	-	40	0,8	-	-	-
(Bodén vd., 2006)	-	-	-	0,1	-	-	-
(Zhao vd., 2020)	-	20	16	0,05-0,3	-	-	0,4-1
(Y. Cheng & Lin, 2007)	6	9	-	-	0,2	0,2	-
(J. H. Zhang vd., 2017)	-	3	3	-	-	0,15	0,1
(X. Chen vd., 2021)	23	35	-	-	0,3	0,18	-
(H. Li vd., 2021)	-	18	15	-	-	-	-
(L. He vd., 2020)	23	35	-	-	-	-	-
(X. He vd., 2019)	-	10-18		0,2			
(H. K. Ma vd., 2015)	-	-	10	0,5-1-1,5	-	-	0,2-0,3-0,4
(Izzo vd., 2007)	-	4	-	-	-	0,2	0,3
(Chia vd., 2011)	-	-	3	0,18	-	-	0,05
(H. Yang vd., 2008)	-	10	-	-	-	-	-
(Kang & Auner, 2011)	-	4x4	-	-	-	0,127	-
(Tahmasebipour & Paknahad, 2019)	-	-	-	1	-	-	-
(J. Wang vd., 2018)	-	-	12	0,05	-	-	-
(Liu vd., 2022)	14	20	-	0,02-0,25	0,2	0,2	-

Mikro pompaların ufak yapıları sebebiyle çeşitli imalat zorlukları ile karşılaşılmaktadır. Bu sebeple ek ekipmana gerek olmadan pompalama işlemini gerçekleştirilmeye çalışılır.

Bu durumda akışkanın kontrolü önemli bir hal alır. Akışkan bazı noktalarda hızlandırılması ile akışkan basıncının düşürülmesi hedeflenirken bazı durumlarda ise akışkan hızı yavaşlatılmaya çalışılabilir. Akış şeklinin ve yönünün optimize edilmesi için kanal iç yapısındaki boyutlar, açılar ve şekiller en önemli mikro kanal parametreleri olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.2'de piezolu mikro pompalardaki kanal boyutlarına değinilmiştir. Çizelge 2.4'de kullanılan bazı parametrelerin şekilsel gösterimi Şekil 2.27'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Piezoelektrik materyalle tahriklenen mikro pompa yapılarında mikro kanal ölçüleri

Referans	Difüzör Açısı (θ)	L/w	L/D	L (mm)	Difüzör dar kenarı (mm)	Mikro kanal açıklığı	Ana kanal açıklığı (mm)	Giriş açıklığı (mm)	Çıkış Açıklığı (mm)
(Olsson, 1998)	54,74 3-5	10-20	10-30	-	-	1 0,1	2,3	-	-
(W. Huang vd., 2021)	-	-	-	-	-	-	1,9	-	-
(J. Dong, Cao, vd., 2020)	-	-	-	-	-	-	-	5	5
(Bodén vd., 2006)	-	-	-	-	-	0,25	-	-	-
(Zhao vd., 2020)	-	-	-	-	-	-	-	1,5	1,5
(Y. Cheng & Lin, 2007)	-	-	-	-	-	-	-	80x240	-
(J. H. Zhang vd., 2017)	5	-	1,093/0,27	1,093	-	-	-	-	0,08
(H. Li vd., 2021)	7	-	-	2,2	0,16	-	-	-	-
(X. He vd., 2019)	-	-	3-9	-	-	0,2	-	-	-
(Izzo vd., 2007)	3,5	-	-	1100	80	-	-	-	-
(Chia vd., 2011)	-	-	-	-	-	100x50	-	-	-
(H. Yang vd., 2008)	5-20	-	-	3,4	0,3	-	-	0,3	-
(Tahmasebipour & Paknahad, 2019)	10	17	-	1,7-3,4-5,1	100-200-300	-	-	-	400-900-1200
(J. Wang vd., 2018)	-	-	-	-	-	-	-	1,2	1,2
(Liu vd., 2022)	-	-	-	-	-	-	-	2,4	2,4



Şekil 2.27. Mikro pompa sistemindeki difüzör boyutlarının harflendirilmesi (Olsson, 1998)

Pasif çek valflerin sıklıkla kullanıldığı mikro pompalarda üretim kolaylığı gibi sebeplerden dairesel çek valfler sıklıkla tercih edilebilmektedirler. Tercih edilmesi sebebiyle de birçok optimizasyon çalışmasının konusu olmuştur. Çizelge 2.5'te dairesel çek valfler ile yapılan çalışmalarda kullanılan çek valf boyutları verilmiştir.

Çizelge 2.5. Piezo malzeme ile tahriklenen mikro pompalarda dairesel çek valf boyutları

Referans	Çek valf çapı (mm)	Çek valf deliği veya iç çapı (mm)	Çek valf kalınlığı (mm)	Pompa boyutu (mm)
(J. Dong, Cao, vd., 2020)	-	4	0,188	-
(Zhao vd., 2020)	7	1,4	0,03-0,05	-
(L. He vd., 2020)	-	-	0,6-1	16x16x4|50x50x20
(H. K. Ma vd., 2015)	5,8	2	0,3	-
(Liu vd., 2022)	-	0,3-0,7	0,05	-

Piezoelektrik malzemeler genel olarak malzeme çifti olarak tercih edilmektedir. Diyaframa montajlanan piezoelektrik seramiğin bağlandığı diyafram malzemesinin mukavemet özellikleri ve kararlılıkları çalışacağı ortama göre uygun olarak seçilmelidir. Çizelge 2.6'da diyafram malzemesi olarak tercih edilen bazı malzemelerin özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.6. Mikro pompalarda kullanılan diyafram özellikleri (Mohith vd., 2019)

Malzeme	Tahrik Sistemi	Kalınlık (mm)	Young Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Yoğunluk (Kg/m³)
Cam	Piezoelektrik	0,2	62,75	0,2	2540
PDMS	Piezoelektrik	0,011–0,4	0,00075–0,0015	0,45–0,5	965–1030
PDMS	Elektrostatik	-	-	-	-
PDMS	Elektromayetik	-	-	-	-
PDMS	Termopnömatik	-	-	-	-
PDMS	Faz Değişimi	-	-	-	-
Si	Piezoelektrik	0,1	160–169	0,27–0,3	2300
Elektropolimer	Piezoelektrik	0,1–0,2	0,5	-	-
SS (Paslanmaz Çelik)	Piezoelektrik	0,01–0,1	NR	0,3	7900
SS (Paslanmaz Çelik)	Faz Değişimi	-	-	-	-
Pirinç	Piezoelektrik	0,15–0,25	10,3	0,33	8,4–8,73
Poliamid	Elektrostatik	0,00015–0,003	1130	-	-
Poliamid	Termopnömatik	-	-	-	-
Poliamid	Faz Değişimi	-	-	-	-
Kauçuk	Piezoelektrik	0,3–0,5	-	0,47	1200
Kauçuk	Elektromanyetik	-	-	-	-
Nafion	ICPF	0,18–0,6	0,35–0,61	-	2500
Akrilik Elastomer	DEA	0,56	-	-	-

2.2. Nanoparçacık Katkılı İletken Mürekkep

Ibrahim vd. (2023), yaptığı çalışmada su bazlı gümüş parçacıklı mürekkepler irdelenmiştir. Aşağıda Çizelge 2.7'de su bazlı mürekkeplerde kullanılan ajanlar, çözücüler ve gümüş parçacıklar verilmiştir. Kendi yapmış oldukları çalışmada Gümüş Nitrat ($AgNO_3$), ana metal kaynağı; Trisodyum Sitrat (TSA), Stabilize edici ve indirgeme ajanı; askorbik Asit (AA), indirgeme ajanı; Polyvinylpyrrolidone (PVP), AgNP'leri stabilize etmek için kullanılan yüzey aktif madde; Deiyonize Su (DI Su): çözücü olarak kullanmışlardır. PVP ile AgNP homojen dağıtım sonucunda 45 gün boyunca stabil kalmıştır. Gümüş nitrat çözeltisi TSA-askorbik asit karışımı ayrı ayrı hazırlanmış ve 60°C kadar ısıtılmıştır. $AgNO_3$ çözeltisi diğer karışıma hızla eklenerek 800 rpm'de karıştırılmıştır. Bu işlemden sonra 3 kez yıkanmıştır. Karışım daha sonra 7500 rpm 45 dk santrifüj edilmiştir. Elde edilen AgNP'ler Daha sonra 60°C'de 180 dakika PVP ile 700 rpm hızda karıştırılmıştır. Ag0.15PVP3 1:1,15 AgNO3: PVP oranına sahip mürekkep 45

gün boyunca zeta potansiyelini koruyarak iletkenliği $2{,}24\times10^{0}$ S/m 'ten $1{,}85\text{x}10^{0}$ S/m'ye düşmüştür. PVP içermeyen sadece 7g AA içeren ve 20,6 g TSA içeren numune 1 hafta'dan sonra ciddi oranlarda zeta potansiyelinde düşme görülmüştür. İletkenlik değerleri $2{,}5\times10^{0}$ S/m olarak daha yüksek elde edilmiştir.

Çizelge 2.7. Su bazlı iletken mürekkepler (Ibrahim vd., 2023)

Katkı Maddesi İçeriği	Su/Çözücü İçeriği	Sentez Sıcaklığı (°C)	AgNP Boyutu (nm)	Kararlılık (gün)
PVP (0,25 – 0,5 g), NaOH (0,23 g)	Su/etanol/gliserol/etilen glikol Oran: 23:8:30,5:38,5	Oda Sıcaklığı	15,5 ± 1,0	90
Dispersan-5040 (2,5 g), CMC (0,2–0,5 wt%), Sülfonil 465 (0,3 wt%), BYK 028 (2,0 wt%), Spredox D260 (0,5–2,0 wt%)	Su (70,7-85,7 wt% /glikol (2–5 wt%)	50	8–13	-
Belirtilmemiş katkı maddeleri, yaklaşık 4–18 wt% katkı maddesi	Su (64–94 wt%) / çözücü (2–18 wt%)	-	< 20	-
2-amino-2-metil-1-propanol, dias eton alkol, n-heptanol, n-butanol, 1-pentanol, sikloheksanol, Zonyl FSO-100	Su (92–97 wt%)	150	-	-
PVP (3,58 wt%) / NaOH (5 wt%)	Su (75 ml)	6–10	50–100	-
PAA (5,25 ml)/Etanolamin (2,02 g)	Etilen glikol ve su	-	3–22	90
PVP (0,5 g)	Su/Etanol	-	13 ± 3	-
PVP/Etilen glikol	Deiyonize su/Sodyum Klorür (50 mM)	160	56–569	-
PVP (1 g)/trietilamin/ Bayhydrol UV 2317 (1–3 oranında)	Su/Glikoz	25–100	30–50	-

Kosmala vd. (2011), yaptıkları çalışmada sulu nanoparçacıklı mürekkep üretimi için gümüş nitrat, potasyum oksalat, 1,2-Diaminopropane, Hydrazin Hydrat, ve 2-propanol kimyasallarını kullanmışlardır. Ag öncüsü olarak kullanılan gümüş nitrat (2 g) ve kaplama maddesi olarak yüzey aktif madde dioktil sodyum sülfosüksinat (AOT, 4 g) ayrı ayrı suda çözülerek sırasıyla 0,03 M ve 0,02 M çözeltiler oluşturmuştur ve daha sonra iki çözelti yüzey aktif madde çözeltisi metal tuzu çözeltisine eklenerek karıştırılmıştır. Karışım bir köpük oluşana kadar karıştırılmaya devam edilmiştir. Daha

sonra çözeltiye 40 ml hidrazin, N_2H_4OH (1,5 mM) eklemiştir. Reaksiyonu tamamlamak için 40 ml 0,1 M NaOH sulu çözeltisi Ag nanopartiküllerini çökeltmek için konulmuştur. Elde edilen parçacıklar daha sonra su ile yıkanarak oda sıcaklığında kurutulmuştur. Sentezlenen Ag nanopartikülleri ilk olarak %0,3 ila %1,5 arasında değişen ağırlıkça Pluronic F127 içeren suda süspanse edilmiştir. HIFU ile parçacık boyları işlenecek süspansiyonlar, Nanjing Havacılık ve Uzay Bilimleri Üniversitesi tarafından geliştirilen şok dalgası jeneratörünün (JK-06) üzerine sabitlenmiş bir numune tüpü/bardak içinde tutulmuştur. Ultrason frekansı ∼75 kHz olarak ayarlanmıştır ve şok dalgasının tepe yoğunluğu 0 ile 80 MPa arasında değişmektedir. İşlenen süre 10 ile 90 dakika arasında değiştirilmiştir.

Chien Dang vd. (2015), yaptıkları çalışmada su bazlı gümüş nanoparçacıklı mürekkep elde etmeye çalışmışlardır. Ag nanoparçacık, ethanol, ethylene glycol, 2-isopropoxyethanol, glycerin, distile su, polyvinyl pyrrolidone (PVP), sodium dodecyl Sulfate (SDS), ethyl formate mürekkebin oluşturulması için kullanılmıştır. Karışıma %31 su, %15 eranol, %1,5 etil glikol, %15 gliserin, %1,5 2-isopropoxyethanol, %15,6 etil acetat, %0,3 SDS, %0,05 Etil glycolate, %0,05 Etil formate ve %20 ağırlıkça Gümüş nanoparçacık konmuştur. Tipik bir prosedürde uygun miktarda PVP, 20 ml etilen glikol (EG) içerisinde çözülmüştür. $AgN0_3$ daha sonra yukarıdaki çözelti içerisinde çözülmüştür. Daha sonra karışım çözeltisine üç dakika süreyle ultrasonik bir prob daldırılmıştır. Reaksiyonun başlamasıyla birlikte soluk sarı çözeltinin koyu kahverengiye dönüşmesi gümüş parçacıklarının oluştuğunu gösterir. 200°C de sinterlemede partiküller boyun oluşturmuştur. 100°C'de boyun oluşumu olmamıştır. Çizelge 2.8'de iletken nanparçacık katkılı mürekkepler için kullanılan alttaş ve kimyasallar verilmiştir.

Çizelge 2.8. İletken nanoparçacık katkılı mürekkeplerde kullanılan malzemeler

Mürekkep içeriği	Karıştırma tipi süresi	Karışım oranı	İletken miktarı	Malzeme	Toz boyu çapı (nm)	Alttaş	Sinter Sıcaklığı (°C)	Kat	Yayın
İzopropil alkol / Absolute Ethanol/ silcona 137	-	0:15mL:20µL	1,74+0,74 mg/mL	AgNW	20	PET	-	17	(S. Wang vd., 2022)
Etilen Glikol/ IPA / ethanol /silcona 137	-	15ml:10ml:00:10 µL | 15:10:0:0,005	AgNWs 1 mg/mL	AgNW	20	PET	60°C	14	(Y. Wang vd., 2021)
7 farklı karışım oranı	-	-	-	-	-	(PDMS) ile kaplanmış cam	-	-	(J. Yang vd., 2021)
Ethanol	-	-	%8 AgNp	AgNP	70	glass-pet-fotoğraf kağıdı	150-200-300	-	(Fernandes vd., 2020)
Aseton / Propanol	-	-	%30-35 AgNP	AgNP		borosilicate glass / kapton	130-165-186,6	-	(Vaithilingam vd., 2018)
AgNW/ AMP / Zonyl FSO-100 / DAA / dioxane / IPA	-	%0,4:0,2:0,01:1, 5:5:92,89		AgNW	41-76	PET	110-150	-	(S. Chen vd., 2017)
PEDOT/PSS/Deionize su / isopropanol	-	10:10:10	-	AgNP	10-50	-	-	-	(Shahrim vd., 2022)
polysaccharides) (yayıcı)/ sodium alginate solution 0,2g/ di water 19,8/ 10g ethylene glycol metal %20/ Tetrachloroauric(III) acid (23 wt, % Au/	sonicated 60dk	-	-	Ag ve Au	Ag:80 / Au: 20	Cam	Ag:125-150/ Au: 175-200		(Balantrapu vd., 2010)
IBA/octyl acetate	-	%98:%2	-	-	-	-	-	-	(Mikkonen vd., 2020)
AgNO3 / PAA / TEA/ Ethanol / propanol / ethylene glycol / DI	1h-3h-30m	10,3ml TEA / 48 ml DI water/ +10mlDI+10gAgNo3	10g AgNO3 PAAcapped AgNP	-	-	Parlak Kağıt	-	-	(Mavuri vd., 2019)
DI water/ leveling ajanı MY-3000/ silicone defoamer NXZ / ıslatma ajanı TRITONX-405) nemlendirici glycerol	-	%6,91Ag+%0,1 MY-3000+%0,05NXZ+%0,16TRITONX-405+%0,5glycerol+DI water	-	-	-	-	-	-	(Y. H. Wang vd., 2021)
DI:EG:G / DMF:E:G / IA:E:G	ultrasonik 30dk + 2000rpm 15 dk	50:45:05	%0,5-0,8-1	Ag ve Graphen	23nm / 35-55nm	PVA	80	-	(Htwe vd., 2019)
AgNo3 / PVP / Stabiler: Ethylene glycol - methanol	-	-	-	-	20-100nm	-	-	-	(Ummartyotin vd., 2012)
PVP: EG:PEG:IPA	200rpm/min / 20min 8000rpm Ultrasonik	PEG:EG=1:2	Ag ink %3 OP-10+%20EG +%1,5 Ethanol +%1 IPA +%59,5DI	AgNP	40nm	Kağıt	100	-	(Cao vd., 2017)

2.3. Nanaparçacıklı Mürekkep için Islak Bilyalı Öğütme

Bilyalı öğütme yöntemi ile 5-10 mikron boyutlarına sahip tozlarda nano boyutlarda metal tozu elde edilebilir (Verma vd., 2018). Nano metal tozun havaya karışması sağlık sorunlarına yol açabileceği için tehlikelidir. Bu sebeple mürekkebi taşıyacak sıvılarla birlikte öğütme işlemi yapmak hem karışımın önceden hazırlanmasını sağlayarak proses adımını azaltacak hem de nano tozların ortama yayılmasını engelleyecektir. Bilyalı öğütme gaz atomizasyonu ve sentez gibi diğer öğütme ve nano toz oluşturma yöntemlerinde basit ve çevreci bir yöntemdir. Öğütme işlemi belirli bir sıvı katı ve bilya oranlarına göre yapılmaktadır. (Çuvalcı vd., 2023; Dhiman vd., 2021; Jargalsaikhan vd., 2024). A. Ozkan vd., (2009) distile su'yu hacimce %60 sıvı olacak şekilde kullanmışlardır. Yao vd., (2014) hacimce sıvı oranını %64 olarak ayarlamışlardır. Başka bir çalışmada Polyethylene glycol (PEG) ve su sıvı olarak belirli oranlarda seçilmiş ve hacimce %25 katı içeriği %75 sıvı içeriği olarak ayarlanmıştır (Rodriguez vd., 2023). Y. xing Peng vd., (2017) farklı bir teknikte su toz oranı 1:1 olarak seçmişlerdir. Farklı bir çalışmada 500-100 nm 5 gramlık metal tozunu 125 ml kavanozda 30 ml su ve 75 ml 500 mikron bilya ile farklı dönüş hızlarıyla öğütülme işlemi yapılmıştır. Metal tozları 100 nm altına düşürülebilmiştir (Saepurahman & Hashaikeh, 2018).

Toz öğütme parametlerinin etkisini inceleyen bir çalışmada bilya toz oranı için ağırlıkça bilya/toz oranı 5:1, 10:1, 15:1 ve 20:1 seçilmiştir ve 100-150-200-250 rpm hızında bilyalı öğütme yapılmıştır. Etanol, aseton ve distile su olarak farklı ortamlar denenmiştir. 1-6 mikronluk tozları 50-60 nm ye düşürmeyi başarmışlardır. En iyi sonuçları 200-250 rpm hız, 15:1 ve 20:1 bilya:toz oranı ve etanol veya etanol-su karışımı vermiştir (F. L. Zhang vd., 2008). Benzer şekilde bir genel bir derleme çalışmasında Lyu vd., (2019) 20:1 oranında bilya/toz oranının kullanılmasının iyi sonuç verdiği sonucuna varmışlardır. 3-5mm bilyalar ile 360ml bir bilyalı öğütme kavanozu ile 1 mikronun altında toz öğütebilmişlerdir. Bu çalışmada 4,2 mikron ortalam toz boyutundaki alümina tozları %10 hacim olarak kullanılmış ve %23 distile su ve %33 bilya 400 rpm de döndürülmüştür (De Camargo vd., 2019). Benzer şekilde 250ml kavanoz hacmi seçilen başka bir çalışmada 20:1 bilya/toz oranı kullanılmış. Ayrıca tozun hacimce 20 katı distile su konmuştur (Park & Öztürk, 2014). Yu vd., (2021) öğütme işlemi için 3-5-10 mm çapında bilyalar ve ortam

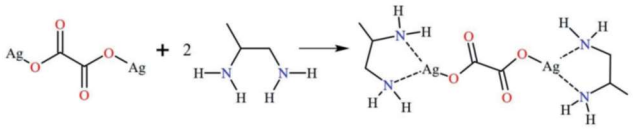
sıvısı olarak distile su seçmişlerdir. 4-8-12 ve 24 saat süre ile öğütme işlemi uygulamışlardır. Pohshna & Mailapalli (2023), nanoparçacık sentezi üzerine yaptıkları çalışmada en etkili parametrelerin öğütme hızı, ardından şişe hacmi, öğütme süresi ve bilye-toz oranı olduğunu bildirmiştir.

2.4. Parçacıksız Mürekkepler

Nano parçacık içeren mürekkeplerde homojenizasyonun sağlanması, topaklanmanın önlenmesi, zeta potansiyelinin sağlanması, basım sırasında nozulun tıkanmasının önlenmesi gibi birçok dikkat edilmesi gereken problemlere ortaya çıkabilmektedir. Bu sebeple parçacıksız mürekkepler umut vadeder. Metal iletken içerik bir organik yapıya bağlanır ve bu metal organik bileşik bir dağıtıcı içerisinde çözündürülerek mürekkep oluşturulur. Oranlar ve bazı ajanlar ayarlanarak istenilen viskozite yüzey gerilimi oluşturularak damlatılabilir aralıkta bir mürekkep elde edilir. Mürekkebin damlatılmasından sonra bileşik sıcaklıkla veya farklı yöntemlerle metalden ayrışması, buharlaştırılarak uzaklaşması sağlanarak metal bileşim yalnız bırakılır. Daha sonra alttaş üzerindeki desen sinterlenerek bütünlük oluşturulur ve elektrik ileten yolun yekpare hale gelmesi sağlanır.

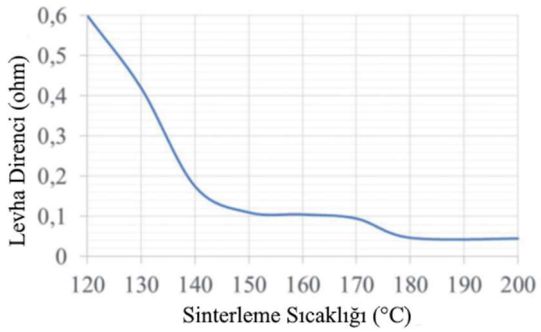
Rustamova vd. (2022), yaptıkları çalışmada gümüş oksalat, laboratuvar koşullarında, stokiyometrik oranlarda alınan sulu gümüş nitrat ve potasyum oksalat çözeltilerinin karıştırılmasıyla iyon değiştirme reaksiyonuyla elde edilmiştir. Ortaya çıkan beyaz çökelti santrifüjlenmiştir, birkaç kez deiyonize suyla yıkanmış ve 40°C'de kurutulmuştur. Mürekkep hazırlanırken manyetik bir karıştırıcı üzerinde 2 g gümüş oksalatın soğutma ve karıştırma ile 1,5 ml deiyonize su ve 2,5 ml 1,2 diaminopropan içinde berrak bir çözelti oluşana kadar çözülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Ortaya çıkan bileşim ağırlıkça %36 gümüş içermektedir ve 120 mPas'ın üzerinde bir viskozite ve 2.96 g/cm^3'lük bir yoğunluk ile karakterize edilmiştir. Bu parametreler, mürekkep püskürtmeli baskı için en uygun fiziksel kriterleri önemli ölçüde aşmıştır. Bu bağlamda gerekli reolojik özellikleri elde etmek için orijinal mürekkep, deiyonize su ve izopropil alkol karışımıyla seyreltilmiştir. Böylece bu çalışmada, solvent oranları seçilerek, inkjet baskıya uygun reolojik parametrelerle (viskozite – 10 mPas, yüzey gerilimi 33-35 mN/m, yoğunluk 1,01 g/cm3)

şeffaf gümüş mürekkebin sentezlenmesi mümkün olmuştur. Nihai mürekkep, daha ileri testler ve araştırmalar için 0,22 µm şırınga filtresi kullanılarak filtrelenmiştir. Gümüş mürekkebin absorpsiyon spektrumları, 200 ila 1100 nm dalga boyu aralığında bir Leki SS2107UV spektrofotometre ile kaydedilmiştir. Numune hacmi 3 ml, optik yol uzunluğu 1 cm olarak seçilmiştir. Mürekkebin termal davranışı, termogravimetrik analiz cihazında (TGA) incelenmiştir. 20 µl mürekkep (m = 20 mg) banyoya yerleştirilmiştir, 90°C sıcaklıkta bir film oluşana kadar kurutulmuş ve daha sonra analizörde ısıtmalı hava atmosferinde 300°C'ye ısıtılmıştır. 10°C/dk TGA eğrisi ağırlık kaybının iki ana aşamasını göstermektedir, 40°C ile 120°C arasındaki ilk aşama, filmdeki su, asetik asit ve eser miktarda alkol olan uçucu bileşenlerin buharlaşmasına karşılık gelir. İkinci aşama (120-165°C), gümüş oksalat-1,2-diaminopropan kompleksi'nin ayrışmasından kaynaklanmıştır. Bu bileşik 120-165°C arasında azotlu ve karbonlu bileşikler oluşturarak uçucu özellik göstermiştir. Polimer alttaşın yüksek sıcaklıklara dayanamayacağı için tavlama için sıcaklık 150°C ve sinterleme süresi 30 dk seçilmiştir. Bu çalışmada gümüş organik bileşiği oluşturmak için gümüş nitrat, potasyum oksalat, 1,2-diaminpropan, hidrazin hidrat, PVP (polivinilpirolidon), oksalik asit ve pıluronic F127 kimyasalları kullanılmıştır. 8,5 µΩ.cm özdirenç elde edilmiştir. Şekil 2.28'de gümüş-1,2 okasalat-daiaminpropan metal organik bileşiğin formu verilmiştir.



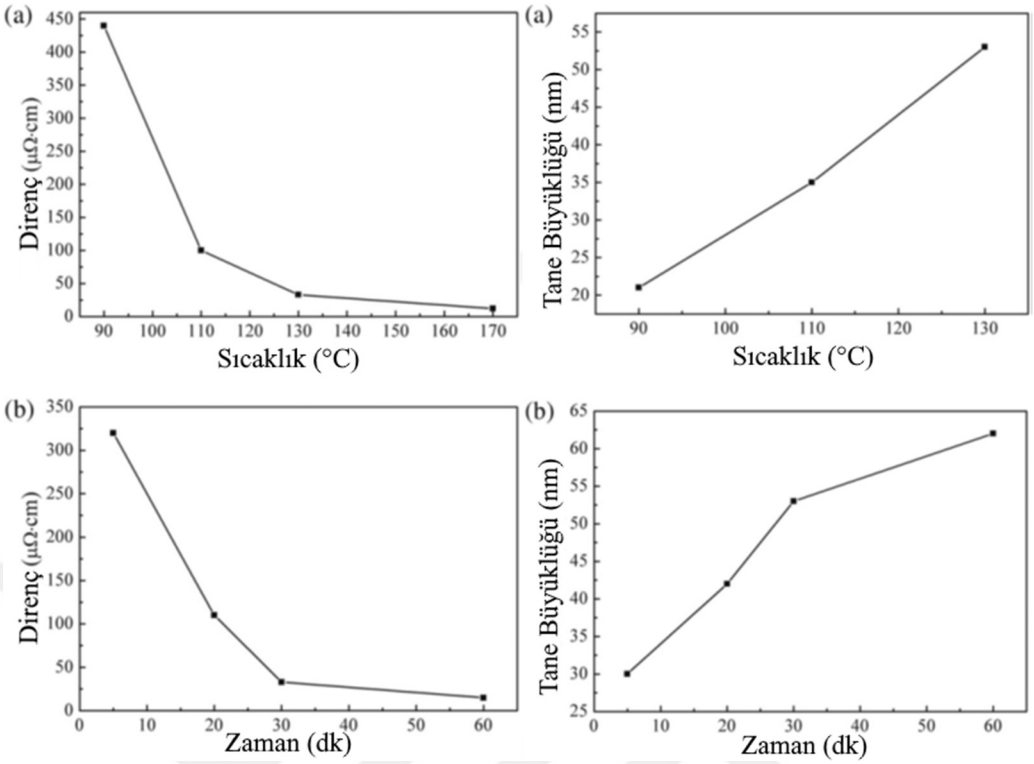
Şekil 2.28. Gümüş-1,2 oxalate-diaminopropane metal organik bileşiğinin formu (Rustamova vd., 2022)

Şekil 2.29'da Sinterleme sıcaklığı ile direnç arasındaki ilişki verilmiştir.



Şekil 2.29. Sinterleme ve elektrotun direnci arasındaki ilişki (Rustamova vd., 2022)

Y. Dong vd. (2015), yaptıkları çalışmada gümüş oksalat tozuna etilamin, etil alkol ve etilen glikol karışımı eklenmiş, ardından 0 °C'de 30 dakika boyunca sürekli karıştırılarak renksiz ve şeffaf bir mürekkep elde edilmiştir. Kahve halkalarının oluşumunu önlemek için gümüş mürekkeplerinde EG ve EA solüsyonu karışımı kullanılmıştır. 30 dk süre ile 170°C de kürlemişlerdir ve 8,4 μΩ.cm özdirenç elde etmişlerdir. Kimyasal olarak gümüş nitrat, oksalat, etilamin, etil alkol ve etilen glikol kullanmışlardır. Alttaş olarak poliamid seçilmiştir. Parçacıksız mürekkep sentezi için gümüş nitrat (AgNO3), oksalat (H2C2O4) etilamin (C2NH6) etil alkol (EA, C2H6O) etilen glikol (EG, C2O2H6) malzemelerini kullanmıştır. Çalışmada 100 ml 0,02 M $AgNO_3$ 50 ml 0,01 M oksalat karıştırılmıştır. Karışım sonucu beyaz çökelti santrüfüj edilmiştir. Birkaç kez deiyonize su ile yıkanmış ve kurutma fırınında 40 °C'de kurutulmuştur sonuç olarak gümüş oksalat tozu 2,9832g gelmiştir. Bu miktar %98,13'lük bir verimi ifade eder. Gümüş oksalat tozuna etilamin, etil alkol ve etilen glikol karışımı eklenmiş, ardından 0 °C'de 30 dakika boyunca sürekli karıştırılarak renksiz ve şeffaf bir mürekkep elde edilmiştir. Kahve halkalarının oluşumunu önlemek için gümüş mürekkeplerinde EG ve EA solüsyonu karışımı kullanılmıştır. Isıl işlem görmüş filmler, gümüş nanopartiküllerinin birbirine bağlı alanlarından ve birkaç boşluktan oluşan homojen bir hücresel mikro yapı göstermektedir. PI alt tabakasına basılan görüntüler 150 °C'de 30 dakika kürlendikten sonra düşük özdirençli (8,6 μΩ·cm), yüksek yansımalı ve iyi yapışmalı metalize gümüş desenler elde edildi. Filmler 3 mm eğrilik yarıçapında bükülmesine rağmen basılı gümüş hatlarda herhangi bir çatlama meydana gelmemiştir. Şekil 2.30'da direnç sinterleme sıcaklığı ilişkisi, direnç sinterleme süresi ve bu değişimlere bağlı parçaların bütünleşmesini gösteren grafikler verilmiştir.



Şekil 2.30. Sıcaklığa ve süreye bağlı olarak direncin değişimi ve sıcaklığa ve süreye bağlı olarak sinterlenen parçacıkların birleşmesi, b maddeleri 130°C gerçekleştirilmiştir (Y. Dong vd., 2015)

W. Yang vd. (2020), yaptıkları çalışmada basit bir gümüş oksalat öncü yoluyla alkol bazlı bir sentez kullanılarak yüksek kimyasal stabilite, düşük maliyet ve iyi baskı kabiliyeti gösteren bir mürekkep geliştirilmiştir. Çalışmada kullanılan kimyasallar arasında gümüş nitrat ($AgNO_3$), oksalik asit ($H_2C_2O_4$), sodyum hidroksit (NaOH), 1,2-diaminopropan ($C_3H_{10}N_2$), ethanol (C_2H_6O), 2-metoksietanol ($C_3H_8O_2$), butanol ($C_4H_{10}O$), heksanol ($C_6H_{14}O$), metanol (CH_4O), 2-propanol (C_3H_8O) ve etilen glikol ($C_2O_2H_6$) bulunmaktadır. Diğer parçacıksız iletken gümüş katkılı mürekkeplerde olduğu gibi gümüş nitrat ve oksalik asit çözeltisi karıştırılarak beyaz bir çökelek olan gümüş oksalat elde edilmiştir. Bu çökelek, deiyonize su ile yıkanmış ve kurutulmuştur. Gümüş oksalat, 1,2-diaminopropan (1,2-DAP) ve alkol karıştırılarak mürekkep hazırlanmıştır. 1,2-DAP, gümüş oksalatla kompleks yaparak mürekkebin çözünebilen bir form kazanmasını sağlar. 0,152 g gümüş oksalat, 0,75 ml alkolle karıştırılarak 5 dakika karıştırılır. Ardından 0,172 ml 1,2-diaminopropan eklenir ve 60 dakika boyunca karıştırılmaya devam edilir. Sonuç olarak karışım şeffaf bir görünüm halini alır. Mürekkebin %10 gümüş içeriğine sahiptir.

Viskozite ve basılabilirlikleri ayarlamak için alkol çözücüler eklenerek stabilizasyon sağlanmıştır. Farklı alkoller denenmiştir. Bu alkoller metanol, etanol, 2-propanol (IPA), 2-metoksietanol (2-MEA), etilen glikol (EG) ethanol (C_2H_6O, EA), butanol, hexanol'dür. En iyi sonuçlar bu çalışma için metanol ve etlen glikol (MA/EG=3/2) karışımında olmuştur. Yüzey gerilimi 31 mN/m viskozite 8-9 mPa.s gelmiştir. 15,46 μΩ.cm elektriksel direnç mevcuttur. 180°C'de 30 dakika sinterlenmiştir. Bu parametrelerde gümüş-amin komplesi tamamen gümüşe dönüşmesini sağlar. Daha düşük sıcaklık ve sürelerde organik kalıntılara rastlanabilir. Çalışmada 150-180-200°C sıcaklıklar ve farklı süreler denenmiştir. Gümüş oksalat çökeleği, deiyonize su ile yıkanmıştır. Bu işlem, reaksiyon yan ürünlerini ve çözeltide kalan safsızlıkları temizlemek için yapılmıştır. Temizlenen çökelek, düşük bir sıcaklıkta kurutularak nem ve çözücü artıklarından arındırılmıştır. Çalışmada kullanılan alkoller, mürekkebin sıvı özelliklerini iyileştirmek ve gümüş oksalatın çözünürlüğünü artırmak amacıyla kullanılmıştır. Metanol (MA) ve etilen glikol (EG) karışımı en iyi sonuçları vermiştir. Bu karışım, mürekkebin sıvı özelliklerini ve baskı kalitesini optimize etmiştir. Özellikle MA/EG 3:2 oranı, mürekkebin viskozite, yüzey gerilimi ve temas açısı gibi sıvı özelliklerini dengeli bir şekilde sağlarken, yüksek iletkenlik ve iyi baskı kalitesi sunmuştur. Baskı sonrası sinterleme sıcaklığı 180 °C olan gümüş özellikleri, külçe gümüşün 10 katı olan 15,46 μΩ.cm'lik bir direnç göstermiştir.

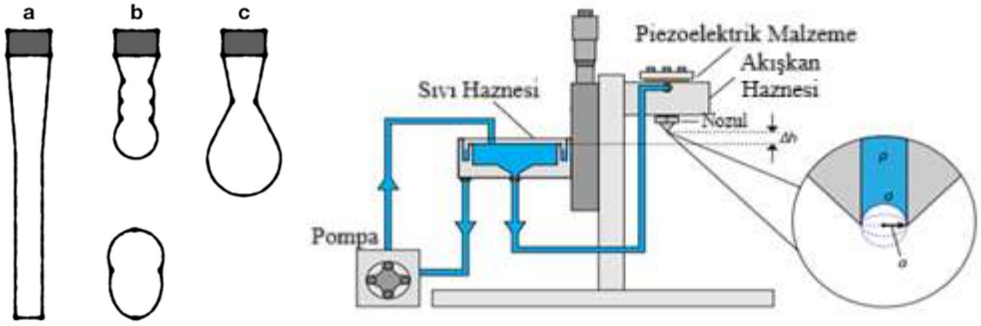
W. Yang vd. (2019), yapmış oldukları parçacıksız mürekkeplerle ilgili derleme çalışmasında Çizelge 2.9'da paylaşmışlardır. Bu çizelgede mürekkeplere basım sonrası yapılan proseslerin özelliklerini içeren bir parametre ve kimyasalları içerir. Genel olarak oluşturulan gümüş bazlı mürekkepler 20 μΩ.cm altında bir direnç ve 30-60 dk boyunca 130-150°C sıcaklıkta sinterleme yapıldığı görülebilir.

Çizelge 2.9. Gümüş bazlı parçacıksız mürekkepler (W. Yang vd., 2019)

Gümüş Bileşimi	Kompleks Oluşturucu Ajan	Çözücü	Desenleme Yöntemi	Metalleşme	Direnç (μΩ cm)
Gümüş neodekanoat	Yok	Ksilen	İnkjet	150 °C	3-4,8
Gümüş(I) 2-[2-(2-metoksietoksi)etoksi]-asetat	-	DI su	İnkjet	130 °C UV ışınlaması ile, 30 dk	9,10
Gümüş nitrat	1-Dimetilamino-2-propanol	Etanol ve etilen glikol	İnkjet	100 °C, 60 dk	13,7
Gümüş asetat	Amonyum hidroksit	Formik asit içeren sulu çözelti	İnkjet, doğrudan yazma ve hava püskürtmeli baskı	90 °C, 15 dk	1,6
Gümüş asetat	Etilamin, etanolamin ve formik asit (indirgeyici ajan)	Metanol içeren distile su	İnkjet	150 °C, 30 dk	4,71 (PEN substrat)
Gümüş asetat	Kompleks ajan olarak Etilamin ve amonyak, indirgen olarak formik asit	HEC viskozite düzenleyici ve stabilizatör, katkı etanolamin antiaglomeran	Döndürerek kaplama veya mürekkep püskürtmeli baskı	90 °C 24 saat (döndürerek kaplama, cam); 75 °C 60 dk (inkjet, PET alttaş)	19,8; 36,5
Gümüş karbonat	İzopropil amin	Glikol ve DI su	El yazımı	150 °C, 60 dk	18
Gümüş sitrat	1,2-Diaminopropan	Metanol ve izopropanol	İnkjet	150 °C, 50 dk	17
β-Diketonat gümüş	-	Heksilamin ve etil selüloz çözeltisi	İnkjet	250 °C, 180 dk	4,62-9,37
Gümüş oksalat	Etilamin	Etil alkol ve etilen glikol	İnkjet	170 °C, 30 dk	8,4
Gümüş oksalat	Etilendiamin	DI su	İnkjet	Mürekkep-termal fotonik kürleme 120 °C 5 dk, 3,32 J cm^{-2}	4,28
Gümüş tartrat	1,2-Diaminopropan	Etanol	İnkjet	160 °C, 10 dk	4,3
Gümüş oksit	Amonyum karbamat	Metanol	Lazer doğrudan yazım	0,5 W lazer gücü	6,5
Gümüş oksit	Amonyum hidroksit, Dietanolamin	DI su	İnkjet	75 °C, 20 dk	6
Gümüş heksafluoroasetilasetonat siklooktadien	-	Toluen ve propan-2-ol	İnkjet	120 °C (substrat)	4,1

2.5. Damla Oluşumunda Dalga Formunun Etkisi

Piezoelektrik damla püskürtme sistemlerinde dalga formu, piezo aktüatöre uygulanan zamanla değişen elektriksel sinyalin biçimini ifade eder. Bu sinyal, piezoelektrik elemanın deformasyonunu tetikleyerek, mikro düzeyde hacim değişimlerine ve bu sayede mürekkep odasında basınç dalgalarının oluşmasına neden olur. Dalga formu, püskürtülen damlanın hızını, boyutunu, uydu damlacık oluşumunu ve hedefe ulaşma doğruluğunu doğrudan etkiler. İdeal bir dalga formu, istenilen hacimde ve tekil bir damlacığın, kararlı bir şekilde oluşmasını sağlar. Aksi hâlde, uydu damlacıklar, püskürtmeme veya damlacık yön sapmaları gibi kalite problemleri ortaya çıkabilir. Dalga formu genellikle çok aşamalı (örneğin, sür, tut, geri çek, yaylan gibi temel işlevleri olan) bir yapıya sahiptir ve bu aşamaların süreleri, genlikleri ve geçiş süreleri damla davranışı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Damlanın nozul ucundaki sınır çizgisine ait duruşuna menisküs yapısı denir. Genel olarak adeziv, kohezif ve kılcallık etkisiyle içe ve dışa bombe yaparak hilal şeklini aldığı için bu isimlendirmeyi almıştır (Şekil 2.31). Optimizasyon sürecinde menisküs hareketi, görüntüleme ve analiz, parametrelerin ayarlanması ile yapılır. Piezo kontrolü menisküsün ayarlanmasında etkilidir. Damlanın çapı istenilen boyutta ve uydu damlacığın olmaması istenir. Şekil 2.31'de menisküs yapısı ve bazı kusurlu damlacık tipleri verilmiştir. Sıvının nozul ağzındaki hareketini ayarlamak için çeşitli dalga formlarında piezoya darbe verilir. Darbe etkisine bağlı olarak negatif veya pozitif menisküs oluşumu gözlemlenebilir. Dalga şekli nozul içindeki akışkanın da konumunu belirlemektedir.



Şekil 2.31. Damlacık şekilleri: **A)** Sürekli akış; **B)** Uydu damlacığına sahip damla; **C)** Atılamayan damla ve kuyruğu; sağda damlanın menisküs (hilal) görünümü (Harris vd., 2015; Seipel vd., 2020)

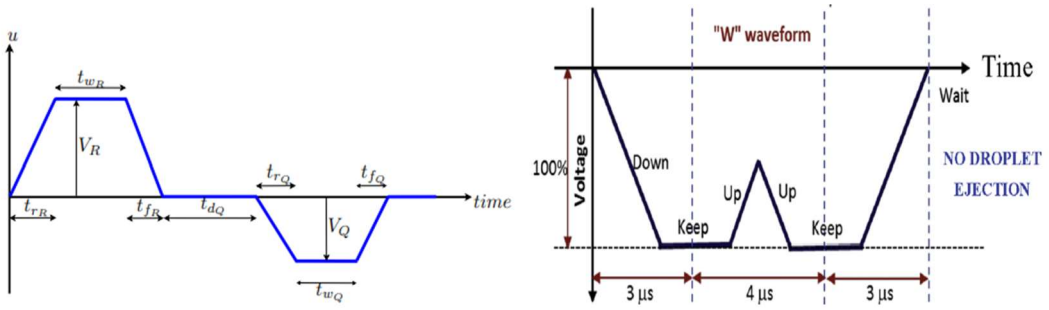
Menisküs hareketi, damla oluşumu, menisküsün rezonans frekansı ile uyumlu bir şekilde tetiklenmelidir. Optimum dalga formu, menisküsün ileri-geri hareketini eşzamanlı olarak kontrol eder ve geri tepme etkilerini minimize eder. Görüntüleme ve analiz, yüksek hızlı kamera sistemleri ile damla oluşumu gözlemlenerek, uydu damlacıkların varlığı, damla hızı ve çapı değerlendirilir. Parametreler, farklı frekans, voltaj, süre gibi parametre kombinasyonları denenerek optimum performans aranır. Yeni parametreler tekrar görüntülenerek analiz edilir. Sonuç Dalga formunun tasarımı ve optimizasyonu, piezoelektrik inkjet sistemlerin başarımını belirleyen temel unsurlardandır. Özellikle hassas dozajlama, mikro boyutta üretim ve elektronik devre baskısı gibi uygulamalarda, damla kontrolündeki her küçük hata büyük ürün hatalarına yol açabileceğinden, dalga formu optime edilmesi yüksek öneme sahiptir. Dalga formları kare, sinizodial, trapezodial, testere dişi, üçgen, yarım dalgalar, dalgalanan, sönümlenen, liner veya nonlineer tipler vb. yapıların farklı genlik ve dalga boyların kombinasyonu şeklinde olabilir (Hamad, Archacki, vd., 2020; Jianjun vd., 2023; K. S. Kwon, 2009b; Shah vd., 2020; Shen vd., 2025).

Oktavianty vd. (2019), çalışmasında, standart dalga formlarının düşük viskoziteli sıvılarla optimal damlacık kalitesi sağlayamadığı belirlenmiştir. Bu durum, uydu damlacıklar, sünme oluşumu (ligament) ve parçalanma (weeping) gibi istenmeyen etkilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sorunları aşmak için, araştırmacılar, "W" dalga formu olarak adlandırılan yeni bir ön titreşim dalga formu tasarlamışlardır (Şekil 2.32). Bu dalga formu, iki ana darbenin birleşiminden oluşmakta ve menisküs hareketini daha etkin bir şekilde kontrol etmeyi hedeflemektedir. Ancak, "W" dalga formunun da düşük viskoziteli sıvılarla sınırlı etkinliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, araştırmacılar, "W" dalga formunun arka rampasında %40'lık bir voltaj azaltımı yaparak "modifiye W" dalga formunu geliştirmişlerdir. Bu modifikasyon, artık titreşimleri azaltarak uydu damlacık ve ligament oluşumunu minimize etmiş ve beş ana darbe ile çoklu damlacık püskürtme yönteminde daha geniş bir damlacık boyutu aralığı elde edilmesini sağlamıştır.

Shah vd. (2021b), yaptıkları sınıflandırma çalışmasında damlayı kontrol etmek için yedi farklı tipte temel dalga yapısından bahsetmiştir. Tekli Trapezoidal Dalga Formu, bu dalga formu, hızlı yükselme ve düşme sürelerine sahip tek bir darbeyi içerir. Damlacık oluşumu

için genellikle t1 ve t3 sürelerinin 3 µs'den kısa olması önerilir. Optimal t2 süresi ise deneysel veya teorik yöntemlerle belirlenir. Unipolar M-Şekilli Dalga Formu, iki ardışık pozitif darbeyi içerir. İlk darbe damlacığın püskürtülmesini sağlarken, ikinci darbe istenmeyen basınç salınımlarını bastırmak için kullanılır. Bu dalga formu, uydu damlacıkların oluşumunu engellemede etkilidir. Bipolar M-Şekilli Dalga Formu, pozitif ve negatif darbeleri içerir. İkinci darbe, birinci darbenin oluşturduğu salınımları sönümlemek amacıyla zıt polaritede uygulanır. Bu yapı, damlacık hacmini azaltmada ve baskı kalitesini artırmada etkilidir. Unipolar W-Şekilli Dalga Formu, üç ardışık pozitif darbeyi içerir. Bu dalga formu, damlacık hacmini azaltmak ve uydu damlacık oluşumunu engellemek için kullanılır. Zamanlama parametrelerinin hassas ayarlanması, istenmeyen etkilerin önlenmesinde kritiktir. Bipolar W-Şekilli Dalga Formu, pozitif ve negatif darbeleri içeren üç darbeli bir yapıya sahiptir. Bu dalga formu, yüksek viskoziteli mürekkeplerin püskürtülmesinde ve damlacık hacminin kontrolünde etkilidir. Bipolar N-Şekilli Dalga Formu (Bipolar-1 ve Bipolar-2), iki farklı yapılandırmaya sahip olan bu dalga formu, damlacık oluşumunu optimize etmek ve istenmeyen salınımları bastırmak amacıyla tasarlanmıştır. İkinci darbe, birinci darbenin oluşturduğu salınımları sönümlemek için kullanılır.

Dalga formu optimizasyonu sürecinde, yüksek hızlı kamera sistemleri ve menisküs hareketinin ölçümlerine dayalı geri besleme mekanizmaları kullanılarak parametre taraması yapılmakta ve ideal püskürtme koşulları belirlenmektedir. Bu nedenle, dalga formunun uygun şekilde tasarlanması ve kontrol edilmesi, inkjet tabanlı hassas üretim sistemlerinin güvenilirliği ve kalitesi açısından hayati bir rol oynamaktadır.



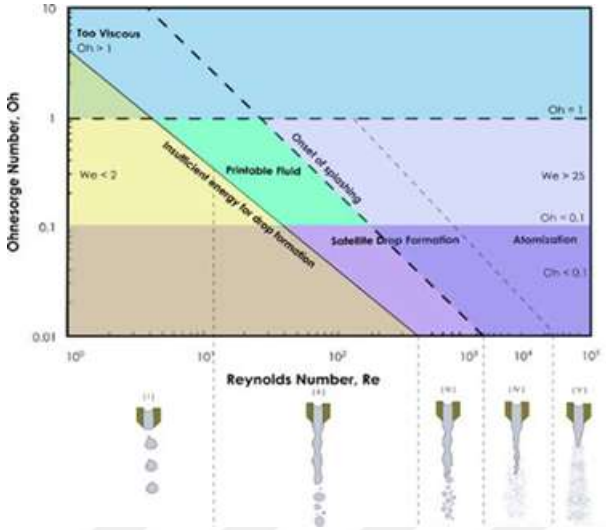
Şekil 2.32. Solda voltaj genliği ve bekleme süreleri; sağda örnek bir w dalga yapısı (Khalate vd., 2012; Oktavianty vd., 2019)

Piezoya verilen dalga şekli ve kuvveti damlacığı kontrol eden parametrelerdir. Bunun üzerine literatürde birçok yayın yapılmıştır. W, U negatif titreşimli, pozitif titreşimli, klasik kare dalga, sinüzoidal dalga, testere dişi veya üçgen vb. birçok yöntem mevcuttur. Bekleme süreleri ve dalga uzunlukları önem arz etmektedir. Şekil 2.20'de örnek piezo için dalga yapısı verilmiştir. Kullanılacak akışkana ve nozul tipine göre dalga yapısı değişeceği için dalga yapısı seçimi ve boyutları deneyler sonucunda belirlenecektir (Kwon, 2009b, 2009a; Oktavianty vd., 2019, 2021).

2.6. Üretim ile İlgili Problemler

Mürekkep püskürtmeli baskı süreçlerinde viskozite ve yüzey gerilimi, damlacık oluşumu ve nozul çıkışındaki akış davranışını belirleyen temel parametrelerdir. Kanal akışı sırasında viskozite, sıvının iç sürtünmesini etkilerken, yüzey gerilimi ise damlacığın şekillenmesini ve ayrılmasını kontrol eder. Bu iki parametre, Ohnesorge sayısı (Oh) üzerinden değerlendirilir ve damlacıkların uydu damlacık üretmeden düzgün şekilde ayrılabilmesi için belirli bir aralıkta olması gerekir. Düşük Oh sayıları sıçrama ve uydu damlacık oluşumuna yol açabilirken, yüksek Oh sayıları baskıyı engelleyebilir. Parçacık boyutu ve mürekkep içindeki dispersiyon stabilitesi baskı kalitesini doğrudan etkiler. PH ve zeta potansiyeli, kolloidal stabilitenin korunmasında kritik rol oynar. Yüksek zeta potansiyeli parçacıkların birbirini iterek agregasyonunu engeller (Ceron vd., 2024; K. Yan vd., 2020; Zhu vd., 2021). Ancak bu değerler mürekkebin polarity (kutupluluk) seviyesine ve solvent yapısına bağlı olarak değişebilir. Polarlık, mürekkebin alttaş ile olan etkileşimini, ıslanma, yayılma davranışını ve eklenebilecek ajanlarla (çökelme yapabilir) olan uyumunu etkiler. Bazı durumlarda ise nozuldan kontrolsüz damlacık sızması oluşabilir. Piezo sinyali uygulanmadığı halde mürekkep akmaya devam eder. Bu durum mürekkebin düşük viskozite, iç basınç dalgalanmaları veya yüzey enerjisi etkisiyle tetiklenebilir (Lee, 2003; Tao vd., 2018). Şekil 2.33'de basılabilir alandaki mürekkep verilmiştir ve basılabilir alanda bulunmayan mürekkebin nozul ağzından çıkışı sırasında ortaya çıkan bazı sorunlar şematize edilmiştir. İlk şema damlatılabilir aralıkta damlaların görüntüsünü, ikinci Rayleigh ayrışmasına sahip şemada sürekli injet metodunda tercih edilebilir yapıdır. Diğer yapılarda ve mürekkep karakteristiğinde damlacık parçalanır ve

damla atımı için kontrol kaybedilir ve atomizasyon evresine girer. Bu tarz sıvıların kontrolü aerosol jet gibi yöntemlerle sağlanabilir.

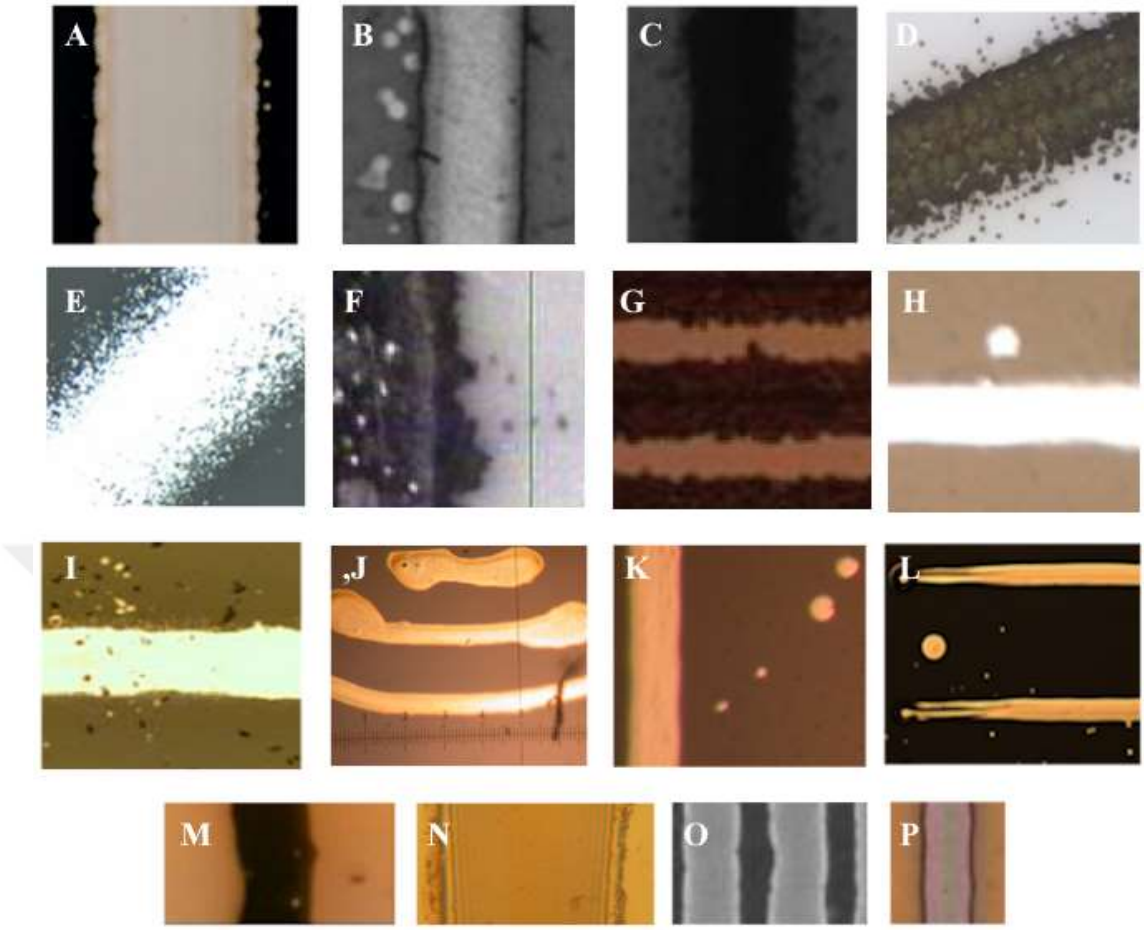


Şekil 2.33. Mürekkebin özelliklerine göre yazdırma sırasında ortaya çıkan sıvının yapıları ve Ohnesorge diyagramı (Buga & C. Viana, 2022)

Kuruma süreci ve bu sürecin kontrolü, mürekkebin damla formu ve çizgi kalitesi üzerinde belirleyicidir. Yüzeyde hızlı kuruma, Marangoni etkisi ve coffee ring (kahve halkası) etkisi gibi olumsuzluklara neden olabilir; bu iki olgu dengeli bir şekilde gerçekleştirilmelidir. Marangoni yüzey gerilimi veya konsantrasyon farklılıklarına bağlı olarak damlanın içinde akış oluşmasına ve kenarların düzensiz oluşu veya iletken parçanın merkezde birikmesine yol açabilir. Çözeltinin kenarlardan daha hızlı buharlaşması iletken parçacıkların kenarlara taşınmasına yol açar, bu sebeple ortası iletken olmayan bir yol oluşur. Damlacık içindeki solventin hızlı buharlaşması sonucu parçacıkların kenara taşınmasıyla oluşur. Damlacıklar yüzeyle temasında sıçrama yapabilir. Bu durum çizgi homojenliğini hem de baskı çözünürlüğünü düşürebilir. Yüzey enerjisi, damla hızı ve viskozite önemlidir (Bastola vd., 2023; Karaş vd., 2021). Çok sıcak bir alttaş belirgin marangoni ve kahve lekesi etkisine yol açabileceği gibi damla yayılımını sınırlandırarak buhar tabakası etkisi (Leidenfrost etkisi) de oluşturarak yapışmayı engelleyebilir (Lim vd., 2022; Paul vd., 2020). Damlacığın alttaş ile temas ettiği anda yüzey pürüzlülüğü, damlacığın düzgün yayılmasını engelleyebilir. Bu durum çizgi oluşumunda kesintilere ve boşluklara yol açabilir. Ayrıca damlacıklar birleştirildiğinde ilerleme hızı, çizgi kalınlığı ve genişliği, hem mürekkep formülasyonu

hem de uygulanan dalga formu ve nozul çapı ile belirlenir. Dalga formu, piezoelektrik aktüatörlerin mürekkebi ne şekilde iteceğini kontrol eder; uygun frekans ve genlik seçilmezse uydu damlacıklar veya yetersiz damla hacmi oluşabilir. Bazı durumlarda uzayan, sünen damlalar, veya uydu damlacıktan farklı olarak püskürtülürken parçalanan fışkıran damlalar ortaya çıkabilir (Jianjun vd., 2023; Oktavianty, Ishii, vd., 2021). Nozul kirlenmesi, baskı kalitesinde dalgalanmalara ve zamanla tıkanmalara yol açar. Bu durumda mürekkep düzgün şekilde püskürtülemez ve çizgi kopuklukları, sıçramalar damlanın püskürtülememesi veya damlanın yön değiştirmesine dolayısıyla desenin bozulması gibi sorunlar görülür. Islanma, yayılma ve yüzeyle olan adeziv kuvvetler, damlacığın alttaş üzerinde ne şekilde davranacağını belirler. Yetersiz ıslanma, mürekkebin yüzeyde dağılmasını engellerken, aşırı yayılma ise çözünürlüğü düşürebilir. Baskı sonrası uygulanan sinterleme işlemi, mürekkep içinde bulunan iletken parçacıkların elektriksel bağlantı kurmasını sağlar. Sinterleme sıcaklığı ve süresi, bu bağlantıların oluşum kalitesini, yüzey pürüzsüzlüğünü ve nihai iletkenliği doğrudan etkiler. Aşırı sıcaklık, alttaş hasarına; yetersiz sıcaklık ise düşük iletkenliğe yol açar. Bu nedenle, seçilen sinterleme yöntemi (termal, fotonik, lazer vb.) baskı malzemesi ve alttaşa uygun olmalıdır (Kamyshny vd., 2011; Liang vd., 2019).

İnjet ve farklı yöntemlerde dahil elektrot üretilmeye çalışıldığı birçok yayında paylaşılan görseller incelendiği bazı temel kusurlar gözlemlenmektedir. Bunlar genel itibarıyla elektrotların kenarlarında dalgalanmalar ve sinterleme veya damlatma esnasında ufak damalaların etrafa sıçraması olarak söylenebilir.Bazı durumlarda ise başlama ve bitiş noktalarında sıvı birikmesiyle kaşık görünümün oluşması olabilir. Bu durumlar parametre optimizasyonu mürekkep değerlerinin optimizasyonu ve alttaşın yüzeysel karakterizasyonunda değişiklikleri ile çözüme kavuşturulabilir (Abhinav K vd., 2015; Chien Dang vd., 2015; Cho vd., 2017; Cruz, 2015; Htwe & Mariatti, 2022; Ivanišević vd., 2019; Mahajan vd., 2015; Mohassieb vd., 2017; Perelaer vd., 2010; Rehmani & Arif, 2021; Reinhold vd., 2013; Schoner vd., 2011; Vida vd., 2025; Vyas vd., 2011; Zheng vd., 2014). Şekil 2.34’de bu kusurların bazılarının görselleri verilmiştir.



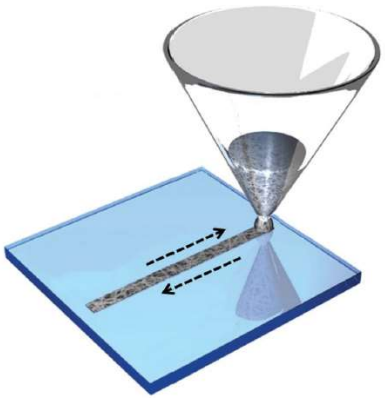
Şekil 2.34. Kenar dalgalanmaları ve sıçratmaları içeren literatürdeki bazı örnek görseller **A)** (Vida vd., 2025) **B)** (Reinhold vd., 2013) **C)** (Htwe & Mariatti, 2022) **D)** (Ivanišević vd., 2019) **E)** (Zheng vd., 2014) **F)** (Vyas vd., 2011) **G)** (Mahajan vd., 2015) **H)** (Cho vd., 2017) **I)** (Rehmani & Arif, 2021) **J)** (Rohit, 2017) **K)** (Rohit, 2017) **L)** (Ge, 2017) **M)** (Hamad, Mian, vd., 2020) **N)** (Chien Dang vd., 2015) **O)** (Cruz, 2015) **P)** (Abhinav K vd., 2015)

2.7. Mikro Serici Sistemi

Mikro serici aerosol jel sistemine benzer bir bütüncül yapı ile mürekkebi yayarak elektrotları oluşturur. Fakat aerosol jet'teki gibi basınçlı bir püskürtme yapılmaz. Mikro serici sistemi bir nozulun ucundan çıkan sıvının alttaşa istenilen desen şeklinde sürülmesi ile bir kalem veya fırça mantığıyla çalışır. Mikro sericilerin (mikroplotter) alt kategorilerinden biri olan ve inkjet metoduna çok benzeyen piezoelektrik teknolojisini kullanan ultrasonik destekli sistemlerde mevcuttur. Mikro sericiler, temelde bir uca monte edilmiş ince bir kılcal boru (Şekil 2.35) veya iğne aracılığıyla mürekkebi veya işlevsel

materyali doğrudan bir alttaş üzerine hassas bir şekilde biriktiren bir doğrudan mürekkep yazma (direct ink write) teknolojisidir (Balani vd., 2021; Kartal & Daş, 2023; Plog vd., 2021; Rafiee vd., 2020). Bu sistemler, baskı kafasının hareketini ve malzeme akışını kontrol ederek karmaşık desenler ve yapılar oluşturabilir. Adeziv ve kohezif kuvvetler hidrofilik ve hidrofobik yüzey durumları önem arz eder. Serme işlemi sırasında alttaş ile tam ıslatma veya düşük temas açıları mevcut ise serme elektrot yolarında temas sürekliliği oluşturacaktır.

Mikro sericiler, mikrometre düzeyinde hassasiyetle mürekkep damlacıklarını veya sürekli hatları biriktirebilir. Bu, ince çizgiler ve küçük alanlar üzerinde karmaşık devreler oluşturma yeteneği sağlar (Brilian vd., 2021; Rohit, 2017). Geniş bir malzeme yelpazesini (iletken, yarı iletken, dielektrik mürekkepler ve hatta biyolojik materyaller) farklı alttaşlar (esnek polimerler, cam, seramik vb.) üzerine basma yeteneğine sahiptirler. Düşük sıcaklıklarda çalışabilir, bu da ısıya duyarlı alt tabakaların ve malzemelerin kullanımına olanak tanır. Doğrudan yazma teknolojisi olmaları sayesinde kalıp veya maske gerektirmezler. Bu, hızlı prototipleme ve düşük hacimli üretimler için maliyet etkin bir çözüm sunar. Malzemeyi katman katman biriktirme prensibine dayanır, bu da 3 boyutlu yapılar ve çok katmanlı elektronik cihazlar oluşturma potansiyeli sunar (K.S. Kwon vd., 2020; Rohit, 2017).



Şekil. 2.35. Mikro serici sisteminin çalışma prensibi: iletken mürekkebin sürülmesi (Cai vd. 2018'den değiştirilerek alınmıştır)

Mikro sericilerin optimizasyonun da genel olarak birkaç özellik ön plana çıkar. Bunlar mürekkep karakteristiği, alttaş yüzeyi karakteristiği, alttaş yüzeye baskı kafasının mesafesi, baskı kafası özellikleri ve baskı kafasının ilerleme hızı olarak sayılabilir.

Viskozite, mürekkebin akışkanlığı, nozuldan çıkışını ve damlacık oluşumunu doğrudan etkiler. Uygun viskozite, tıkanmayı önler ve kararlı damlacık oluşumu sağlar. Damlacıkların alt tabaka üzerine yayılmasını ve desenin çözünürlüğünü belirler. Düşük yüzey gerilimi genellikle daha iyi yayılma ve daha geniş hatlar sağlarken, yüksek yüzey gerilimi daha dar hatlar oluşturabilir (Kralj vd., 2022; Rohit, 2017). Mürekkep içindeki işlevsel materyalin (nano parçacıklar, polimerler vb.) konsantrasyonu, basılı katmanın nihai iletkenliği veya diğer işlevsel özelliklerini etkiler (X. Wang vd., 2018). Solventin buharlaşma hızı, damlacıkların alt tabaka üzerine kurumasını ve kahve halkası etkisinin oluşumunu etkileyebilir (Kralj vd., 2022).

Nozul boyutu ve kılcal boru çapı, çizgi genişliğini ve damlacık boyutunu doğrudan etkiler. Daha küçük çaplar daha ince çözünürlük sağlar. Baskı hızı, mürekkep akış hızı ve alttaş hareketi arasındaki denge, basılı hattın sürekliliğini ve kalınlığını belirler. Yüksek hızlar daha ince, düşük hızlar daha kalın hatlar oluşturabilir. Bu aynı zamanda iletkenliği de etkileyecektir. Nozul ile alttaş mesafesi, damlacıkların alttaş üzerine doğru bir şekilde yerleşmesini ve yayılmasını etkiler. Çok yakın mesafe alttaşa zarar verebilir veya akışı engelleyebilir; çok uzak mesafe ise damlacıkların yörüngesini bozabilir, deseni değiştirebilir ve süreksizliği kesintiye uğratabilir. Uygulanan basınç ve hacim kontrolü sağlanmalıdır. Kılcal sericilerde mürekkebin nozuldan dışarı itilmesini kontrol eden basınç veya hassas biriktirme sistemlerinde aktarılan mürekkep miktarının iyi ayarlanması gerekir. İyi ayarlanmayan basınç veya mürekkep debisi farklı sorunlara yol açabilir. Alttaşın yüzey enerjisi, damlacıkların ıslanabilirliğini ve yayılmasını etkiler. Hidrofilik yüzeyler genellikle damlacıkların daha fazla yayılmasına neden olurken, hidrofobik yüzeyler daha kontrol edilebilir damlacık boyutları sağlayabilir. Alttaş sıcaklığı, mürekkebin kuruma hızını ve biriktirme sonrası film oluşumunu etkiler. Isıtılmış alttaşlar, solventin daha hızlı buharlaşmasına ve daha yoğun bir film oluşumuna yardımcı olabilir (Cai vd., 2018; Rohit, 2017).

Literatürde sık kullanılan bir mikro sericilerden biri ultrasonik itkinin bir mikro sericiye entegre edilmesine dayanır. Sistem, bir mikro serici türüdür ve hassas mürekkep damlacığı kontrolü için akustik enerjiyi kullanan bir teknoloji olan ultrasonik destekli doğrudan yazma veya başka bir değişle ultrasonik destekli sıvı yayma (dağıtma) olarak

bilinir. Bu sistemlerde, piezoelektrik transdüserler, bir mürekkep rezervuarı veya baskı ucu ile birleşerek ses dalgaları (ultrasonik titreşimler) üretirler. Bu ses dalgaları, mürekkep üzerinde kontrollü bir basınç veya titreme oluşturarak damlacıkların nozuldan ayrılmasını ve alt tabakaya hassas bir şekilde biriktirilmesini sağlar (K.S. Kwon vd., 2020). Bu piezo ile çalışan mikro serici sistemi isteğe bağlı damla inkjet sistemiyle yakınlık gösterir.

En yaygın uygulamalardan biri, iletken nano parçacık (örneğin gümüş nano tel veya bakır nano parçacıklar) bazlı mürekkepler kullanarak esnek alttaşlar üzerinde iletken yollar ve devreler basmaktır (Cai vd., 2018; X. Wang vd., 2018; Y. Wang, Hong, vd., 2019). Örneğin, esnek elektronikler için gerilebilir iletkenler ve entegre devreler oluşturulmuştur. Gaz sensörleri, sıcaklık sensörleri ve biyosensörler gibi çeşitli sensörlerin üretimi için mikro serici teknolojisi kullanılmaktadır. Yarı iletken mürekkepler kullanılarak esnek veya sert alt tabakalar üzerine ince film transistörler basılmıştır (Cai vd., 2016; Simonenko vd., 2022). LED'ler, fotodedektörler gibi optoelektronik cihazların belirli katmanlarının basılmasında veya pasif bileşenlerin entegrasyonunda mikro serici kullanılmıştır (Fosso vd., 2017). Giyilebilir ve implant edilebilir biyo-elektronik cihazlar için yumuşak, gerilebilir ve biyo-uyumlu malzemelerle kompleks yapıların basılmasına yönelik çalışmalar mevcuttur. Özellikle, kan damarlarının harekinin kablosuz sürekli izlenmesi için yumuşak implant edilebilir baskılı biyo-elektronik sistemler geliştirilmiştir (Rigo vd., 2023).

Kontrollü damlacık biriktirme yeteneği, 3 boyutlu mikro yapılar veya çok katmanlı elektronik devrelerin katman katman oluşturulması için önemli bir araçtır. Hem mikro serici hem de inkjet isteğe bağlı damla (DoD) teknolojileri, dijital baskı yöntemleri olup, işlevsel mürekkeplerin hassas bir şekilde alt tabakalar üzerine biriktirilmesinde kullanılır. Inkjet DoD, tipik olarak termal veya piezoelektrik bir aktüatör kullanarak, baskı kafasındaki nozullardan çok küçük hacimli (piko-litre) mürekkep damlacıklarını fırlatarak çalışır. Bu damlacıklar, bilgisayar kontrollü bir şekilde alt tabaka üzerine düşürülerek istenen desenler oluşturulur (Kralj vd., 2022; K.-S. Kwon vd., 2020). Çok ince damlacıklar (birkaç piko-litre) fırlatabildiği için yüksek çözünürlüklü desenler oluşturabilir ve nispeten hızlı baskı yapabilir. Baskı kafası alt tabakaya temas etmediği

için alt tabakaya zarar verme riski düşüktür ve pürüzlü yüzeylere de baskı yapabilir. Farklı mürekkeplerin aynı anda basılmasına olanak tanıyan çoklu nozullu baskı kafaları mevcuttur (K.-S. Kwon vd., 2020). Yüksek hacimli üretim için iyi bir potansiyele sahiptir. Mürekkeplerin belirli viskozite ve yüzey gerilimi aralıklarında olması gerekir; aksi takdirde nozul tıkanmaları veya damlacık formasyonunda sorunlar yaşanabilir. Özellikle yüksek katı madde içeren mürekkeplerde nozul tıkanmaları sıkça görülen bir sorundur, bu da baskı kalitesini düşürebilir ve üretim kesintilerine neden olabilir. Baskı kafalarının düzenli temizlik ve bakımı gereklidir. Damlaların fırlatma sonrası yörüngesi, hava akımı veya alt tabaka topografyası gibi faktörlerden etkilenebilir, bu da baskı hassasiyetini etkileyebilir (Kralj vd., 2022; Rohit, 2017).

Mikro serici sistemleri, kılcal bir iğne veya pipet aracılığıyla mürekkebin doğrudan alt tabaka ile teması veya kontrollü bir temas bırakma mekanizmasıyla biriktirilmesine dayanır. Mürekkep akışı genellikle basınç farkı veya kılcallık etkisiyle kontrol edilir (Friedrich & Begley, 2020; Rohit, 2017; Sun vd., 2022) Akustik (piezoelektrik) tabanlı mikro sericiler ise damlacık fırlatma için ultrasonik titreşimler kullanır. Özellikle Akustik sistemler, inkjet'e kıyasla daha geniş bir viskozite aralığına sahip mürekkepleri işleyebilir, bu da daha kalın veya daha yüksek katı madde içeren mürekkeplerin kullanımına olanak tanır. Genellikle daha büyük nozullara veya akustik titreşimler sayesinde tıkanmayı önleme mekanizmalarına sahip olduğu için inkjet'e göre tıkanma riski daha düşüktür. Doğrudan yazma yeteneği ve daha kontrollü malzeme biriktirme, katmanlı üretimle 3 boyutlu yapılar oluşturmada avantaj sağlayabilir (Hon vd., 2008; K.-S. Kwon vd., 2020; Rohit, 2017). Çok hassas hacimlerde mürekkep biriktirme yeteneği sunar. Genellikle inkjet'e göre daha yavaş bir baskı hızı sunar, bu da yüksek hacimli üretimler için dezavantaj olabilir. Bazı konfigürasyonlarda alt tabaka ile doğrudan temas, hassas alt tabakalara zarar verme riski taşıyabilir. Ancak temassız akustik sistemler bu dezavantajı ortadan kaldırır. Inkjet'in piko-litre düzeyindeki damlacık boyutlarına kıyasla, bazı mikro serici tipleri ile elde edilen minimum çizgi genişlikleri daha büyük olabilir (Hon vd., 2008; N. Hussain, 2022; K.-S. Kwon vd., 2020).

2.8. Soğuk Plazma

Soğuk plazma, iyonlaşmış bir gaz olup serbest elektronlar, iyonlar, radikaller ve metastabil türler içerir. Doğası gereği işlenen yüzeyin sıcaklığı çok artmadan yüzeyde kimyasal veya fiziksel değişim sağlayabilir. Nötr bir gaza güç verildiğinde, gaz parçacıklarının bir kısmı yüklü parçacıklara dönüştürülebilir ve plazma oluşturabilir. Bu durumda gaz iyonize hale gelmiş olur. Elektrik veya elektromanyetik işlemler tarafından üretilen plazma elektrik deşarjı olarak üretilir. Gaz deşarj plazması, nötr parçacıkların yanı sıra eşdeğer sayıda negatif elektron ve pozitif iyon içeren kısmen iyonize bir gaz olarak tanımlanabilir. Plazmaların özellikleri, yüklü parçacıkların yoğunluğu ve sahip oldukları enerjiler genellikle güce, güç türüne (AC, DC, darbeli gibi) ve gaz türüne göre değişebilir. (Bárdos & Baránková, 2010; Merche vd., 2012). Maxwell-Boltzmann termodinamik dengesine göre, plazmalar termal veya termal olmayan olarak kategorize edilir. Termal olmayan, başka bir değişle termodinamik dengede olmayan, plazmalarda yarı dengede olmayan (100-150°C arasındaki) ve dengede olmayan (60°C'den daha düşük sıcaklıkta olanlar) olarak ikiye ayrılır. Termal olmayan plazmada elektron sıcaklığı, iyonlardan ve nötronlardan çok daha yüksektir. Elektronların ise ısıl iletimi çok düşük olması sebebiyle nüfuz ettiği ortam ısınamaz ve isim olarak soğuk plazma olarak adlandırılır (Z. Chen vd., 2022; Misra vd., 2016). Plazma ortamı olarak direkt ortam havası kullanılabileceği gibi helyum (He) ve argon (Ar) gibi inert gazların yanı sıra oksijen (O_2), hidrojen (H_2), metan (CH_4), Azot (N_2) ve diğerleri gibi reaktif gazları kullanabilir. Plazma deşarjında mevcut olan enerji çeşitli uygulamalar için fayda sağlamaktadır. Yüzey özelliklerini değiştirmek, mikro kaplamalar yapmak ve organik yapıları deforme etmek gibi farklı konularda plazma enerjisi, serbest elektron ve iyonları fayda sağlayabilir. Soğuk plazma teknolojisi malzeme bilimi, gıda, ziraat, elektronik, tıp ve birçok alanda farklı amaçlar için kullanılmaktadır (Z. Chen vd., 2022; Laroque vd., 2022; Misra vd., 2016).

Yazdırılabilir elektroniklerde mürekkebin yüzeye düzgün yayılması ve tutunması kritik önemdedir. Bu nedenle alttaş (örneğin PET, Poliamid, cam) yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi gerekir. Yüzey enerjisinin artırılması (hidrofobik-hidrofilik dönüşüm), organik kirleticilerin ve tozların temizlenmesi ve adezyon kuvvetinin artırılması için

soğuk plazma uygulamaları kullanılabilir (Dawood, 2021; Hosseinpour vd., 2021; D. Kim vd., 2022; Poletti vd., 2003; Stempien vd., 2015).

Plazmadaki iyon ve radikaller yüzeye çarparak polar gruplar (–OH, –COOH) ekler veya yüzeyde mikro pürüzlülük oluşturur. Bu da ıslanabilirliği ve yapışmayı artırır. İyonlaşacak ortam olarak Ar, N_2, He veya ortam havası kullanılır. Ortam atmosferinin iyonlaşma için ihtiyaç duyduğu enerji içerisindeki atomların varlığına göre değişiklik gösterir. İyonlaşmak için yüksek enerjiye ihtiyaç duyan atomların varlığı güç ihtiyacını artıracaktır ve aynı zamanda iyon halde kalacağı süreyi de kısaltacaktır. Örnek olarak Helyumun iyonlaşma enerjisi Arganonun iyonlaşma enerjisinden yüksektir (Bárdos & Baránková, 2010; Biloiu & Scime, 2010; Found, 1920; Misra vd., 2016; Nastuta & Gerling, 2022). Çizelge 2.10'a göre literatürde soğuk plazma oluşturmak ve uygulamak için 10-100 watt arası bir güce, 10-20kV voltaj yüksekliğine, güce bağlı olarak 1-600 saniye arası maruziyet süresine, dakikada 2-5 litrelik bir gaz debisine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Gaz tipi daha çok kimyasal reaksiyonları etkilemektedir. Güç plazma yoğunluğunu ve nüfuziyeti etkilemektedir. Voltaj plazmanın başlatılmasında etkilidir.

Çizelge 2.10. Soğuk plazma uygulamaları parametre değerleri

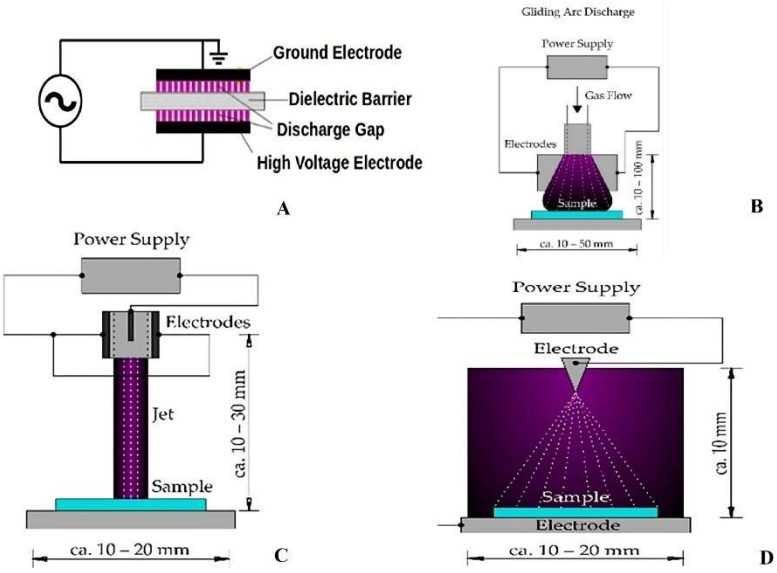
Referans	Güç (W)	kV	Akım (A)	kHz	Süre (sn)	Basınç (mbar)	Debi	Ortam	Alttaş
(Jalajamony vd., 2024)		11-14-17-20-23		30					
(Santos vd., 2020)		0,6-0,8	0,4-0,55		1-100				
(Fatyeyeva vd., 2014)	80				30-120-180	0,8-1,4 10-4		N_2, H_2, O_2	
(Durán vd., 2020)		13,5		3	5-20-40		5l/dk	N_2/N_2O	
(Martínez Montejano vd., 2019)	300w	2	0,6-0,7	65					
(Poletti vd., 2003)	105				120-180-300-600	0,2-0,4-0,05-0,1		Hava, He, Ar, SF_6 ve CF_4	PET
(Shi vd., 2011)	70-150				30-120	20Pa			
(Dawood, 2021)	80-100-120				120-300-480	0,95 torr			
(Shih vd., 2019)		20		2	0-30-300	1atm	2,5l/dk	He	PLA
(Jones vd., 2022)	15W				30-1800				PET

Düşük sıcaklıkta çalışan soğuk plazma, özellikle metal nanoparçacık içeren mürekkeplerin sinterlenmesinde geleneksel ısıtma yöntemlerine alternatif olarak öne çıkar. Düşük sıcaklıkta metal-metal bağ oluşumu, polimer yüzeylerde deformasyon olmadan sinterleme, noktasal/yerel ısıl işlem avantajlarını oluşturur.

Plazmadaki enerjik türler, nanoparçacıkların yüzeyinde atomik difüzyon başlatır. Bu, partiküller arası boyun oluşumuna ve elektriksel iletkenliğin artmasına neden olur

Aerosol jet yazıcılarla kombinlenen soğuk plazma, eşzamanlı yazım ve yüzey işlemesi için kullanılır. Yazım sırasında uygulanan plazma mürekkebin daha iyi yapışmasını sağlar, plazma ile yazılan yolun çevresinde yüzey modifikasyonu yaparak ıslanabilirliğe etki eder, solvent içerisinde taşıyıcı bileşiklerin ayrışarak metalin ortamda kalmasına yardımcı olur (Jones vd., 2022; Kehrer vd., 2020; Rezaei vd., 2024).

İşlem süresi, voltaj seviyesi, frekans değeri ve elektrotların yapısı da CP işlemini etkileyen diğer önemli unsurlar arasında yer alır. Genellikle bir soğuk plazma ünitesi; güç kaynağı, elektrot düzeni ve işlemde kullanılan gaz sisteminden oluşur. Şekil 2.36'da, düşük sıcaklıkta atmosferik basınçta çalışan plazma kaynaklarının genel konfigürasyonları şematik olarak gösterilmiştir. Soğuk plazma sistemlerinde uygulanan voltajlar çoğunlukla kilovolt (kV) seviyesinde olup, frekanslar genellikle kilohertz (kHz) aralığında yer alır. Son dönemde, atmosferik basınca yakın koşullarda sabit ve homojen plazma üretimini mümkün kılan yeni nesil plazma kaynakları geliştirilmiştir. Soğuk plazma kaynakları arasında dielektrik bariyer deşarjı, atmosferik plazma jetleri, korona deşarjı, radyo frekanslı plazma, mikrodalga deşarjı ve atmosferik basınç kızdırma deşarj plazması bulunmaktadır (Abolore vd., 2024; Bárdos & Baránková, 2010; Domonkos vd., 2021).



Şekil. 2.36. Soğuk plazma oluşturma şekilleri **A)** Dielektrik bariyer deşarjı **B)** Kaymalı ark deşarjı **C)** Plasma jet **D)** Korona desarj plazma (Abolore vd., 2024; Domonkos vd., 2021)

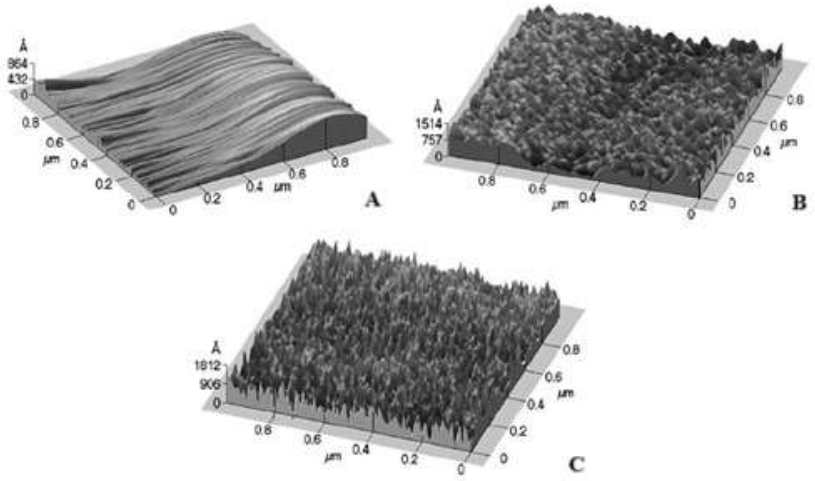
Dielektrik bariyer deşarjı (DBD), iki elektrot arasında yer alan yalıtkan bir bariyer aracılığıyla oluşturulan bir plazma türüdür. Bu sistemde, elektrotlar arasındaki boşluk birkaç mikrondan birkaç santimetreye kadar değişebilir ve bu aralığa yüksek frekansta (~kHz) ve yüksek gerilimde (~kV) AC ya da DC elektrik gerilimi uygulanır. Genellikle düzlemsel veya silindirik düzenlemelere sahip olan DBD sistemleri, en az bir elektrotun kuvars, cam, seramik, teflon, silikon kauçuk veya benzeri dielektrik malzemelerle kaplanmasıyla tasarlanır. Bu iletken olmayan katman, ark oluşumunu engelleyerek kontrollü bir deşarj süreci sağlar (Abolore vd., 2024; von Woedtke vd., 2013).

Atmosferik basınçlı plazma jeti, düşük ışık yoğunluğu ile birlikte yüksek hızda reaktif türler yayan bir soğuk plazma deşarj mekanizmasıdır. Bu sistemler genellikle biri içte, diğeri dışta yer alan iki eş eksenli silindirik elektrottan oluşur; içteki elektrot bir RF veya MW kaynağına bağlanır. Çoğunlukla helyum ya da argon gibi asal gazların iyonlaşmasıyla plazma oluşur ve bu gaz, sistemin ucundaki nozuldan "jet" şeklinde dışarı salınır. APPJ'ler, kullanılan elektrot yapısına göre tek elektrotlu sistemler, dielektriksiz düzenlemeler veya DBD tabanlı jet sistemleri gibi türlere ayrılabilir (C. Cheng vd., 2006; Domonkos vd., 2021; L. Lin & Keidar, 2021; Lu vd., 2021; Winter vd., 2015).

Korona deşarjı ise genellikle keskin uçlu elektrotlar arasında yüksek gerilim uygulanması yoluyla elde edilir. Bu türde aktif elektrot bir iğne ya da ince bir tel olabilir ve çevresinde iyonizasyonla birlikte taç benzeri bir yapının oluşmasına neden olur. Korona deşarjları, oldukça düşük elektron ve iyon yoğunluklarına sahip zayıf plazma biçimlerindendir (Birania vd., 2022; Zainal vd., 2015).

Kayan ark deşarj reaktörleri genellikle sıcak plazma kaynağı olarak sınıflandırılır, fakat uygun parametreler sağlandığında soğuk plazma üretimi de mümkün hale gelir. Bu sistemler, termal ve termal olmayan plazmaların avantajlarını bir araya getirebilir; özellikle yüksek güçlü ortamlarda termal olmayan plazma özellikleri öne çıkar. Deşarj, birbirine yakın konumlandırılmış elektrotlar arasındaki en kısa mesafede (~mm düzeyinde) yüksek gerilim uygulanarak başlatılır. Elektrotlar güçlü bir gaz akışı içine yerleştirilir ve plazma, bu akış yönünde uzayarak hacmini artırır. Plazma uygulamaları hedef yüzeye doğrudan veya dolaylı şet.ekilde yönlendirilebilir. Doğrudan uygulamada işlem görecek yüzey aktif plazma bölgesiyle temas halindedir. Dolaylı uygulamalarda ise plazmanın son aşamasında ortaya çıkan reaktif türler ya da plazmayla aktive edilmiş ortam kullanılır(Birania vd., 2022; W. Chen vd., 2020; Fridman vd., 1999).

Atmosferik soğuk plazma sonucunda yüzey profili değişimine ait örneklerden bir tanesi Şekil 2.37’de verilmiştir. Yüzey profilinin pürüzlülüğü ve görünümü konusunda SEM analizinin yetersiz geldiği birkaç çalışmada dile getirilmiştir. Bu sebeple plazma uygulamalarında AFM veya SPM (taramalı prob mikroskobu) kullanılmıştır (Poletti vd., 2003; Shi vd., 2011)



Şekil 2.37. PET yüzeye uygulanmış atmosferik soğuk plazma sonucu yüzey profili örneklerinin AFM analizi sonuçları **A)** referans plazma uygulanmamış durum; **B)** 60 s plazma uygulanmış; **C)** 120 sn plazma uygulanmış (Poletti vd., 2003)

Soğuk plazma, baskı sonrası işleme veya alt tabaka ön işlemi olarak kullanılarak, basılı malzemelerin elektriksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini değiştirebilir ve optimize edebilir. Temel amaçlar şunlardır: Plazma işlemi, alt tabaka yüzey enerjisini değiştirerek mürekkebin alt tabakaya daha iyi yayılmasını (ıslanabilirliğini artırarak) veya belirli bir desende kalmasını (ıslanabilirliği azaltarak) sağlayabilir. Bu, basılı hatların çözünürlüğünü ve homojenliğini artırır (Fosso vd., 2017; Ge, 2017; C. Ma vd., 2023). Plazma, alt tabaka yüzeyindeki organik kirleticileri veya kalıntıları temizleyerek daha temiz ve homojen bir baskı yüzeyi sağlayabilir (Katsigiannis vd., 2022; Otto vd., 2011). Alt tabaka, mürekkep biriktirilmeden önce plazma ile işlenerek yüzey özellikleri (hidrofilik/hidrofobik özellikler, yüzey pürüzlülüğü) optimize edebilir. Bu, mürekkebin alt tabaka üzerinde daha kontrollü yayılmasını veya daha iyi damlacık oluşumunu sağlayabilir (S. Dong vd., 2018; K. N. Kim vd., 2016). Mürekkep biriktirildikten sonra, plazma, basılı materyalin kürlenmesi, polimerizasyonu veya nano parçacıkların sinterlenmesi için bir enerji kaynağı olarak kullanılabilir. Bu, özellikle ısıya duyarlı alt tabakalar üzerinde yüksek sıcaklık kürleme gerektiren malzemeler için düşük sıcaklıkta işleme imkanı sunar. Örneğin, grafen mürekkepleri için plazma indirgeme, yüksek sıcaklıkta tavlama ihtiyacını ortadan kaldırabilir. Soğuk plazma, mikro sericiler ve diğer dijital baskı teknolojileriyle birleştiğinde, basılı elektroniklerin performansını artırmak ve yeni uygulama alanları açmak için güçlü bir araç haline gelmektedir. Özellikle esnek

elektronikler, giyilebilir cihazlar ve sensörler gibi alanlarda, plazmanın sağladığı düşük sıcaklıkta işleme yeteneği ve malzeme özelliklerini iyileştirme potansiyeli büyük önem taşımaktadır (J. Dong, Wang, vd., 2020; Roshanghias vd., 2017; Wünscher vd., 2014).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

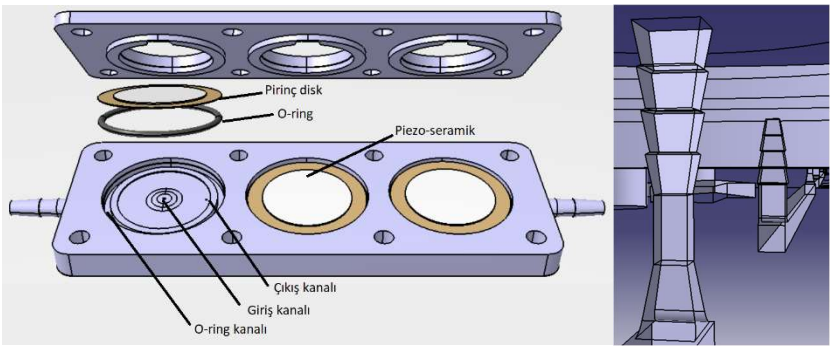
3.1. Kendinden Çek Valfli Mikro Pompa Düzeneği

Literatürdeki veriler incelendiğinde peristaltik mikro pompa, tesla valfli tek piezolu bir sistem, çek valfli tek piezolu sistem, tek piezo bulunan ve hazne arkasında basınç sensörüyle beraber peristaltik bir pompayla basıncın sabit tutulduğu bir sistem yapılabilir tasarımlar olarak ön görülmüştür. Bunun haricinde şırınga ucunun titretildiği ve haznenin basınç kontrolü ile basıncının sabit tutulduğu farklı sistemlerde uygulanabilir. Seçenekler arasında en az karmaşık ekipmana ihtiyaç duyulabilecek yapı peristaltik mikro pompa yapısı olarak karşımıza çıkmaktadır. Peristaltik mikro pompa yapısı gereği pozitif deplasmanlı bir yapıda olmasından dolayı sadece gerekli sıvı basıncı olması sistemin her seferinde aynı miktarda sıvının pompalanmasına ve inkjet damla sistemindeki damla boyutlarının sabit kalmasını sağlayacaktır. Sıvı seviyesi yüksekliği ve sıvı tankı üzerindeki basıncın ciddi öneme sahip olmadığı pozitif deplasmanlı olarak çalışabilen sistemlerin daha pratik oldukları daha az karmaşık ekipmana ihtiyaç duyulacağı görülmektedir.

Peristaltik bir pompa birkaç şekilde yapılabilir görünmektedir. Birinci fikir piezoların çek valf olarak kullanıldığı ve aynı zamanda pompalama işlemi yaptığı sistemdir. Sıvının sıkıştırılamaz ve bulunduğu kabın şeklini alır fikri ile piezonun yaptığı baskı ile membran mikro kanalın şeklini alarak yolu kapatır. Bu hareketi üçlü birbirlerini izleyecek biçimde tekrarlı olarak yapıldığında ise peristaltik bir hareket elde edilmiş olunacaktır. İkinci bir fikir mikro kanallara yerleştirilmiş pompa odaları ve bu pompa odalarına baskı yapacak üç adet pin olduğu yapıdır. Bu yapı piezolarla kontrol edilebileceği gibi dönen bir yatay veya dikey yerleştirilmiş mıknatıslı çark tarafından da kontrol edilebilir. Çarkın dönüş hızına bağlı olarak pinler sıralı hareketi o hız miktarında yaparak akışkan debisi kontrolü yapabilecektir. Çark aynı zamanda plakalı piston pompa gibi eğimli bir şekilde durarak da kullanılabilir. Bu alternatif senaryolar piezonun kontrol edilemediği veya ön görülemez sorunların olduğu durumlarda kullanılabilecek seçenekler arasındadır.

İlk üretim çalışmaları ve denemeler akışın kontrollü bir şekilde yapılabileceği normal durumda kapalı şekilde duran mikro pompa denemeleri ile yapılması uygun görülmüştür. Kullanılacak ekipmanlar literatürde ağırlıklı olarak kullanılan boyutlar ve piyasada da bulunurluğuna dikkat edilerek seçilmiştir.

Piezo malzemesi PZT ve pirinç çifti olarak seçilmiştir. Boyut olarak seramik çapı 15 mm olan pirinç disk çapı 20 mm olan bir piezo diski seçilmiştir. Piezo diskin seramiğinin kalınlığı 0,22 mm iken pirinç diskin kalınlığı 0,13 mm'dir. Oda yüksekliği ilk etapta 0,2 olarak belirlenmiştir. Membran olarak 0,2 mm kalınlığında naylon film kullanılacaktır. Peristaltik mikro pompanın ilk etapta difüzörlerinin dar tarafları 0,1 mm açıklıkta geniş tarafı 0,24 mm olan kare mikro kanallar olarak tasarlanmıştır. Difüzör boyunca verimi artırmak için testere dişi duvarlar kullanılmıştır. Duvarlar 4 kademe şeklinde daralmaktadır. Daralmalar 10 derece olarak ayarlanmıştır. Difüzör açısı 4 derecedir. 10 derecelik kademe eğimi olan duvarlar kademe sonunda 60 derecelik pahlarla 4 derecelik difüzör açısı konumuna geri dönüş yapar. Kenar uzunlukları 0,24 - 0,205 - 0,170 - 0,135 ve son kademede 0,1 mm olarak 1 mm uzunlukta pompa odasına bağlanır. Şekil 3.1'de kademe yapısı ve pompanın genel görünümü verilmiştir.

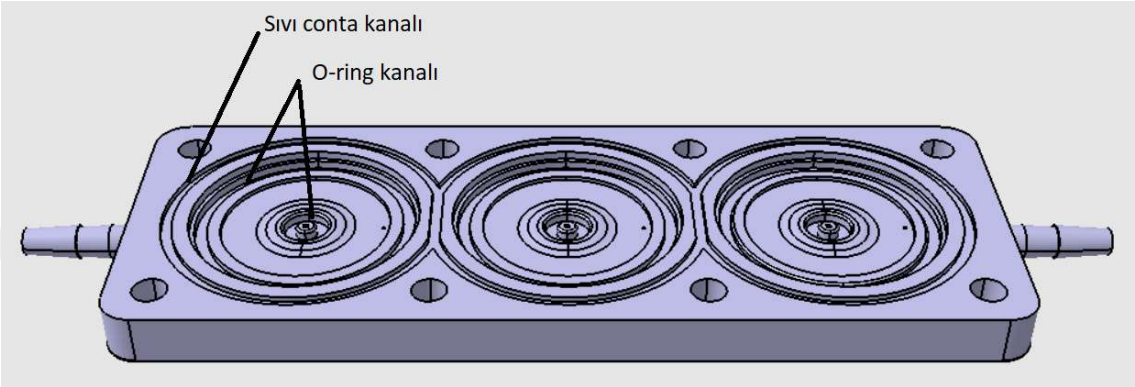


Şekil 3.1. Tasarlanan mikro pompa görünümü ve sağdaki resimde pompa odasına giriş ve çıkışların görseli

Tasarım reçineli yazıcılarda yeni teknoloji olan LCD'li Creality'nin LD-006 modeli reçineli 3d yazıcıda üretilmiştir.

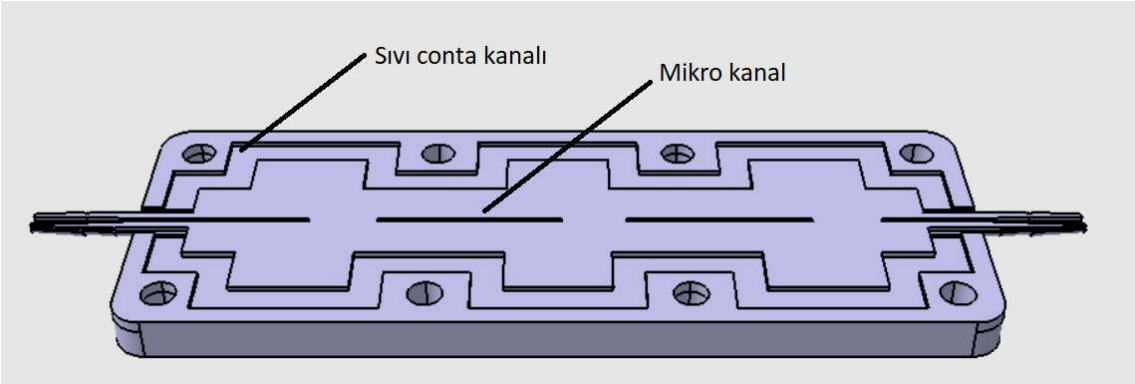
Daha sonra farklı parçalarında üretimiyle ve karşılaşılan sonuçlar sebebiyle 3 piezolu peristaltik pompa yapısında değişikliklere gidilmiştir. Normal kapalı konum olan pompa

yapısı için orta kısma o-ring kanalı açılmıştır. Ayrıca FDM ile üretilen parçalarda sızma yaptığı görüldüğü için tasarımlara sıvı conta kanalı eklenmiştir (Şekil 3.2). Bu geliştirilen yapıda dar kanal 0,2 mm'ye çıkarılmış ve geniş kanal 0,4 mm'ye çıkarılmıştır. Yine pompa haznesine giriş ve çıkışlarda 4 derece eğim ve kanallarda testere dişi deseni 10 derece eğimi 4 kademede uygulanmıştır.



Şekil 3.2. Geliştirilmiş 3 odalı peristaltik mikro pompa

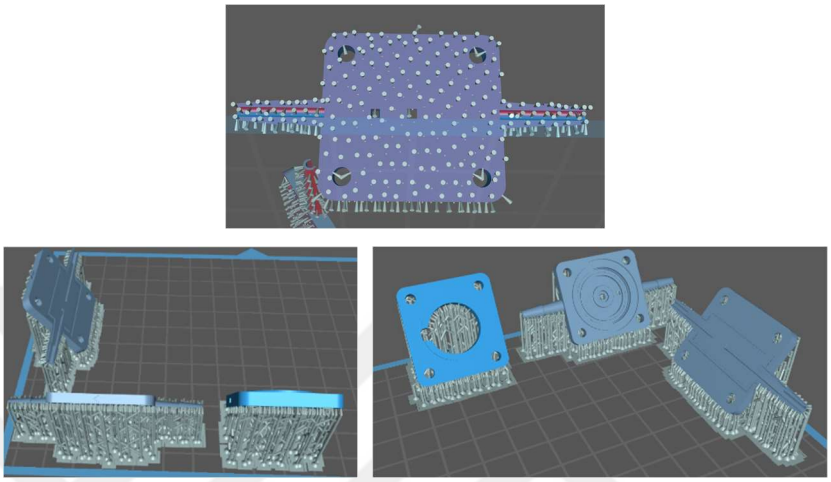
Reçineli LCD 3 boyutlu yazacının üretim prosesine uygun olacak şekilde modellerin ikiye ayrılması gerekliliği doğmuştur. Şekil 3.3'te ikiye ayrılmış üçlü mikro pompa yapısının alt yarısı tasarımı verilmiştir.



Şekil 3.3. Üçlü mikro pompanın reçineli 3 boyutlu yazıcıda üretilebilir şekilde yarıya bölünmüş parçanın alt yarısı

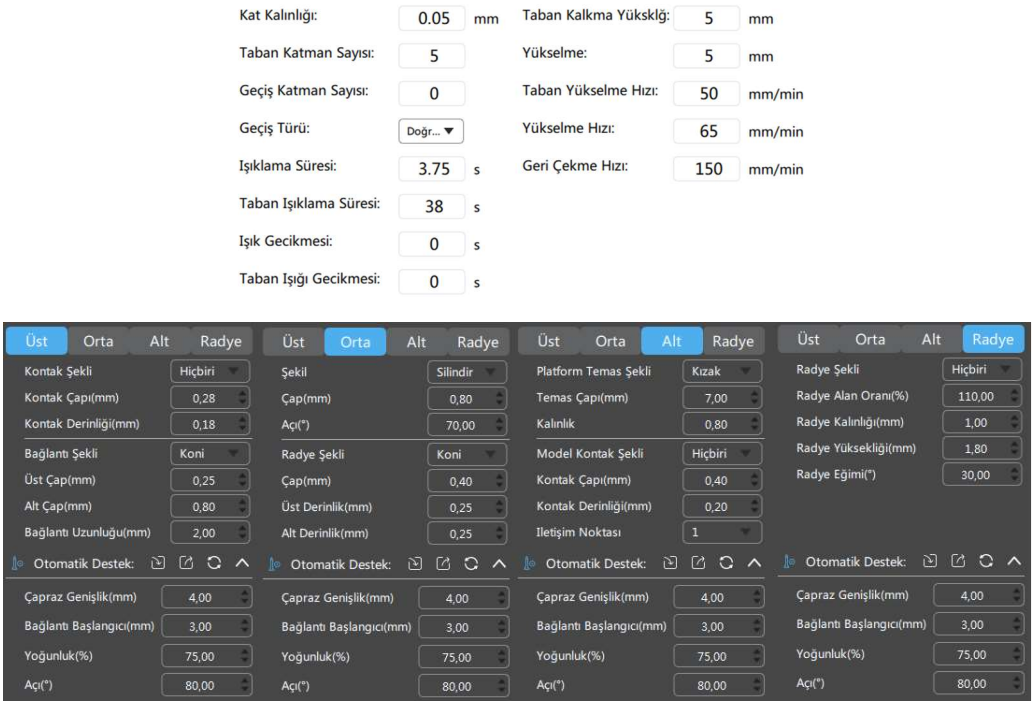
Malzeme tasarrufu, kolay ve hızlı değişikliğe izin vermesi ve kontrol edilebilirlik açısından çalışmalar tekli piezo yapısında tekrardan tasarlanmıştır.

Reçineli LCD 3B yazıcıda dilimleme programı olarak Chitubox programı kullanılmıştır. Önceki üretimlerde çıkan problemlerin neticesinde parçaların eğimli basılması gerektiği ve desteklerle yoğun bir şekilde desteklenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Destek yapısı ve modellerin konumlandırılması Şekil 3.4'te verilmiştir.



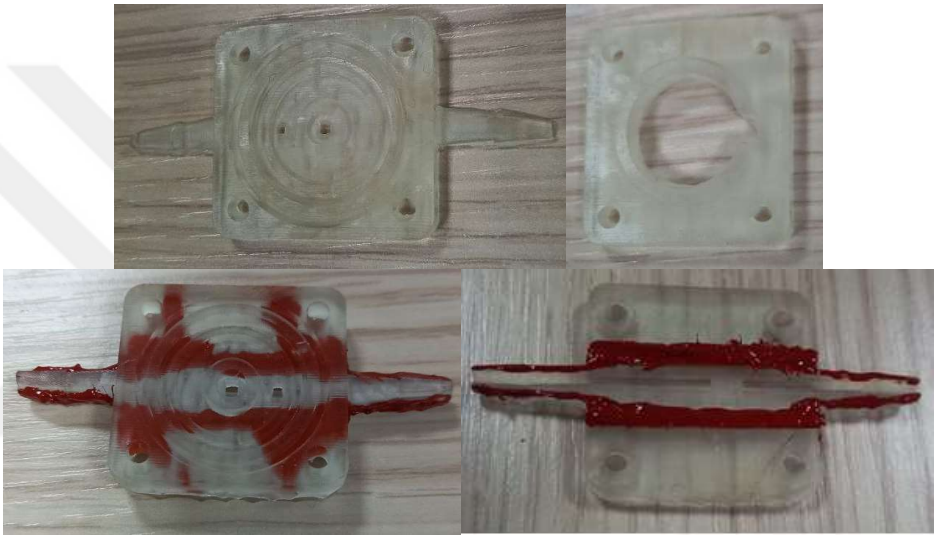
Şekil 3.4. Chitubox programında modellerin konumlandırılması ve destek elemanlarının atılması

Programın baskı ve destek ayarları Şekil 3.5'te verilmiştir.



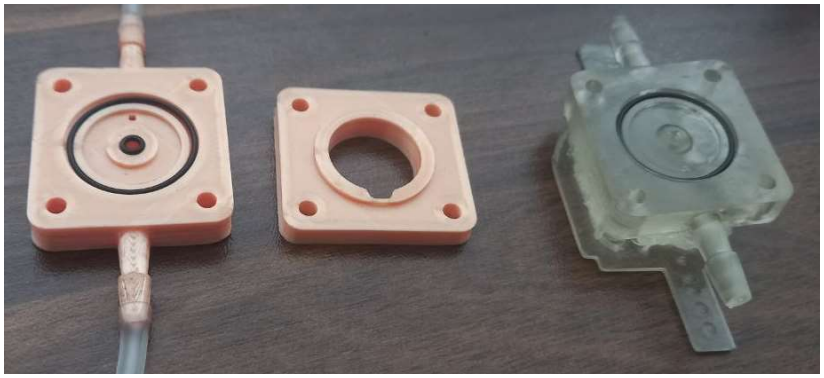
Şekil 3.5. Chitubox programında kullanılan baskı ve destek ayarları.

Son tek piezolu tasarımda pompa odasına giriş kanalının ölçüsü 2 mm'ye ve çıkış kanalı ölçüsü 1,2 mm'ye çıkarılmıştır. Reçine yazıcısı için Şekil 3.4'te görüldüğü üzere parça kanalların bulunduğu ve pompa odasının bulunduğu parça olmak üzere ikiye bölünmüştür. Sıvı conta kanallarına sıvı conta silikonu sıkılmıştır. Sıvı contanın kuruması ve sağlıklı bir yapışma için birleştirilen parçalar mengene ile sıkıştırılarak kurumaya bırakılmıştır. LCD'li 3B yazıcıdan çıkan parçanın görseli Şekil 3.6'te verilmiştir. Üç adet tekli pompanın birleştirilmesi ile peristaltik pompa elde edilecektir.



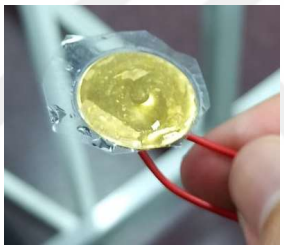
Şekil 3.6. Reçineli 3 boyutlu yazıcıdan çıkan tek piezolu mikro pompa

Delik ve kanal çaplarının büyütülmesi sonucunda FDM yazıcılar ile de yapı üretilebilir hale gelmiştir. Hızlı ve pratik olan FDM yazıcılar ile üretim denemesi gerçekleştirilmiştir. FDM'nin köprü atma yeteneği sebebiyle kanal ve pompa odası iki parçaya ayrılmamıştır. Ultimaker cura programının üst yüzeylere ütü atma özelliği olduğu için dilimleme programı olarak Ultimaker cura programı seçilmiştir. Ütü özelliğinde üst katmanların hassas bir şekilde işleyerek pürüzsüz bir yüzey oluşturur. Sızdırmazlık için o-ring olsada iyi bir sızdırmazlık için piezonun yüzeye düzgün olarak oturarak herhangi bir kenardan kalkma yapmaması gerekir. Şekil 3.7'de transparan reçineden reçineli yazıcı çıktısı ve FDM yazıcıdan çıkan numuneler verilmiştir.



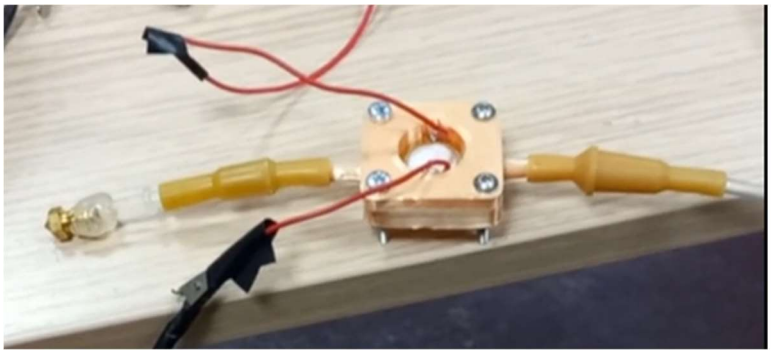
Şekil 3.7. FDM 3 boyutlu yazıcıdan çıkan parça ve sağda reçineli 3 boyutlu yazıcıdan çıkan tek piezolu mikro pompa

FDM 3 boyutlu yazıcıdan çıkan parçanın kullanılabilir yapıda olması sebebiyle denemeye geçilmiştir. Naylon bir membran ile akışkanın geçeceği bölge ve piezo disk birbirinden ayrılmıştır (Şekil 3.8).



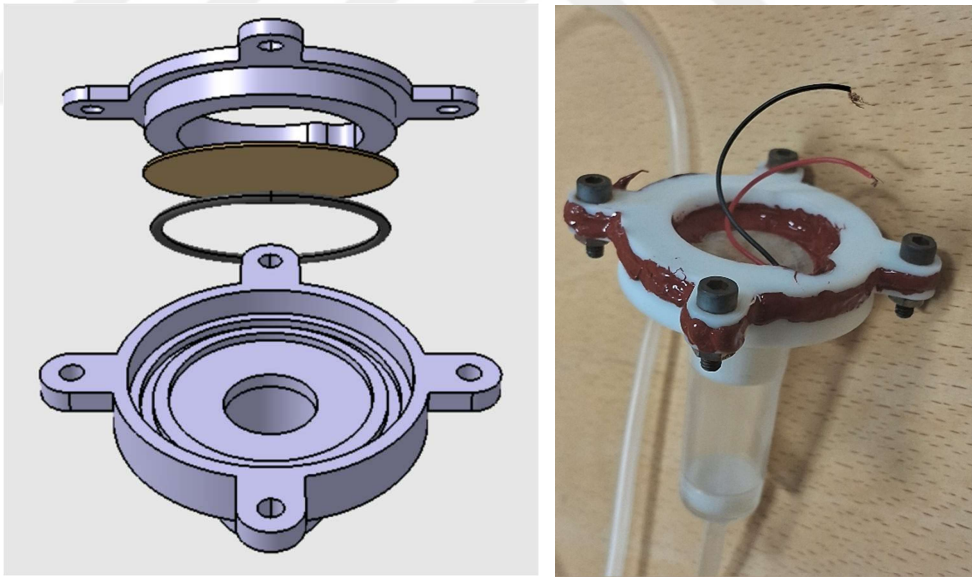
Şekil 3.8. Piezo ve naylon membran

Pompanın üst kapağı, alt sıvı haznesi, contalar ve piezo mikro pompayı oluşturmak üzere montajlanarak devreye bağlanmıştır. Pompa çıkışına bir adet 0,1 mm nozul ucu takılmıştır. Montajlanmış pompa devresi şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Montajlanmış mikro pompa sistemin görüntüsü

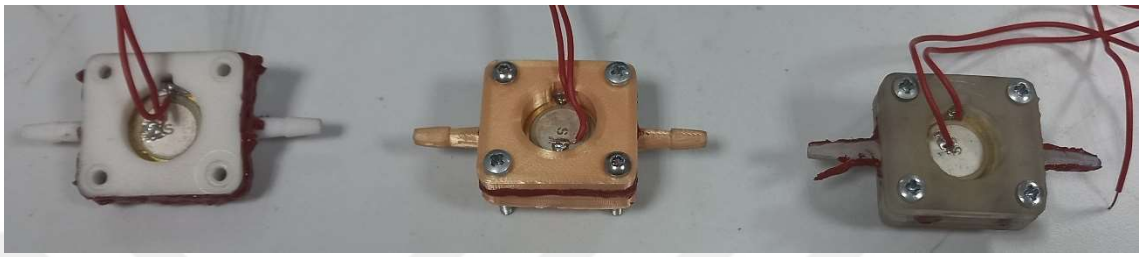
Basınç kontrolüne ihtiyaç duyulması durumunda piezoelektrik materyalin kullanıldığı bir basınç sensörü yapısı oluşturulabilir. Mürekkep haznesinin üzerine takılacak bu ekipman basınç düşüşü ve basıncın yükselmesi durumlarında piezonun basınç yükselmesine veya basınç düşüşüne bağlı olarak pozitif voltaj veya negatif voltaj vermesi halinde esneyerek bir voltaj bilgisi verecektir. Bu bilgiyi depolayabilmek ve algılayabilmek için enerji, bir kondansatörde depolanabilir. Kondansatörün belirli bir voltaja gelmesi halinde sisteme bağlanacak başka bir pompa ile sistemin üzerine hava veya sıvı pompalanarak basınç dengelenebilir. Pompa içeriye gerekli sıvı veya havayı nakledip basınç dengesini sabitledikten sonra kondansatör içerisinde barındığı enerjiyi mosfet veya rölenin konum değiştirmesi vasıtasıyla toprağa boşaltarak kendisini sıfır konumuna geri çeker. Eğer sisteme hava veya sıvı basan pompa ayarı hassas değilse basıncın arttığı durumda pompayı terse çalıştıracak ikinci bir kontrol hattı bulunmalıdır. Buradaki pompa seçimi peristaltik pompa gibi pozitif deplasmanlı olması kontrol bakımından önemlidir. Şekil 3.10'da basınç sensörünün tasarım hali verilmiştir.



Şekil 3.10. Basınç sensörü tasarımı ve üretilmiş montajlanmış hali

20 mm pirinç çapı, 12 mm seramik çapı, Seramik kalınlığı 0,30 mm pirinç kalınlığı 0,20 mm olan piezo disklerden bir inkjet baskı kafası üretilmiştir. UV- kürlenebilir reçine ile üretilen pompa tasarımında LCD ekran kürlenme şeklinden kaynaklı iç kanalların oluşmasında problemlemler oluşmuştur. Açılı yerleştirme 3 parçaya bölme baskı

optimizasyonu gibi çalışmalar yapılmış olsa da istenilen hassasiyet yakalanamamıştır. Normal FDM 3d yazıcı ile bazı parçalar üretilmiştir. Bunların basımında normal PLA ve tough PLA kullanılmıştır. Fakat damla atılamamıştır. Bazı sızdırma problemleriyle de karşılaşılmıştır. Şekil 3.11'de farklı malzemeden üretilen mikro pompa düzenekleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Farklı malzemelerle basılmış mikro pompalar (sırasıyla: FDM yazıcı ile Tough PLA, PLA; SLA yazıcı ile Reçine)

Güç kaynağının 30 volta kadar desteklemesi sebebiyle 20 mm çaplı piezo damla üretmek için yeterli esneme yaptıramadığı kanaatına varılarak 35 mm'lik pieoz disklere geçilmiş ve tasarım bu boyutlar genelinde yenilenmiştir. Ayrıca belirli noktalarda sızdırma problemleriyle de karşılaşılmıştır. Büyük piezodiskinin deplasman büyüklüğü ve deplasman mesafesi daha yüksek olacağı için ufak piezoya göre prototip geliştirme sürecinde bir çok avanataja sahiptir. Büyüğen sistemlerde hassas tolerans ihtiacıda daha düşük olacağı için üretim konusunda oluşacak problemlerinde bir miktar önüne geçileceği düşünülmüştür.

35 mm pirinç çapı, 20 mm seramik çapı seramik kalınlığı 0,30 mm pirinç kalınlığı 0,20 mm piezo disk kullanılmıştır. Piezo disk aynı zamanda çek valf görecek şekilde ayarlanmaya çalışılmıştır. Bu optimizasyonlar sırasında 50'den fazla farklı ölçülerdeki parça farklı cihazlarla farklı malzemelerle ve farklı basım parametreleriyle denenmiştir. Şekil 3.12'de farklı parametre ayarlarında basılmış 3 farklı parça verilmiştir.



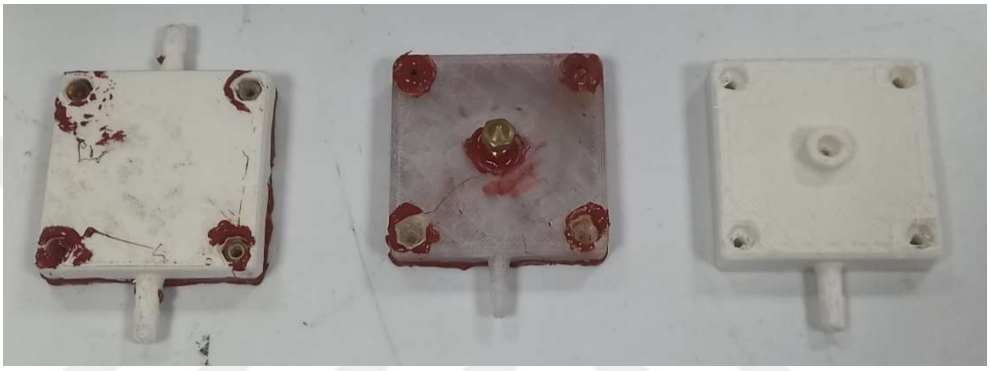
Şekil 3.12. Farklı toleranslarda basılmış mikro pompalar, ok işareti akış yönünü gösterir.

Çizelge 3.1. Peristaltik mikro pompa üretim çalışılması için deney parametreleri

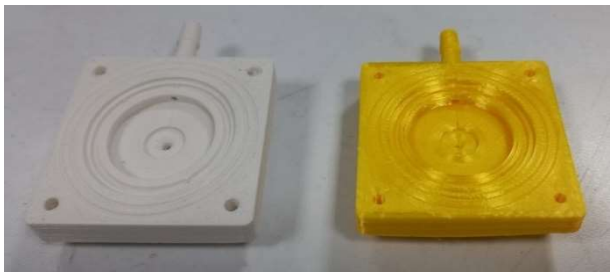
İsimlendirme	Kademe 1 ölçüsü (mm)	Kademe 2 ölçüsü (mm)
GA-04-1_2	1,2	0,4
GA-04-1_3	1,3	0,4
GA-05-1_0	1	0,5
GA-05-1_1	1,1	0,5
GA-05-1_2	1,2	0,5
GA-05-1_3	1,3	0,5
GA-06-1_0	1	0,6
GA-06-1_1	1,1	0,6
GA-065-1_1	1,1	0,65
GA-07-1_1	1,1	0,7
GAv2-05-1_05	1,05	0,5
GAv2-05-1_1	1,1	0,5
GAv2-05-1_2	1,2	0,5
GAv2-05-1_25	1,25	0,5
GAv2-06-1_1	1,1	0,6
GAv4-06-1_0	1	0,6
GAv4-06-1_05	1,05	0,6
GAv4-06-1_1	1,1	0,6
GAv4-063-1_1	1,1	0,63
GAv4y-06-1_1	1,1	0,6

3.2. Çek Valfsiz Mikro Pompa Düzeneği

Piezonun kendisinin çek valf olduğu sistem FDM ile üretilmesi başarılı olmayınca boru kayıplarını düşürülmesi için direkt tasarım direkt kafa haline getirilmiştir. Şekil 3.13'te yeni tasarımın görseli verilmiştir. Bu sistem ve normalde açık olan sistemler voltajın 70 voltlara ve üzerine getirilmesiyle damla atabilir duruma gelmiştir. Şekil 3.14'te farklı kanal tiplerine sahip inkjet kafası tipleri verilmiştir. Sarı olan dikdörtgen kanal ve zeminle eşit seviyededir ve beyaz olan da dairesel bir kanal tipi vardır.

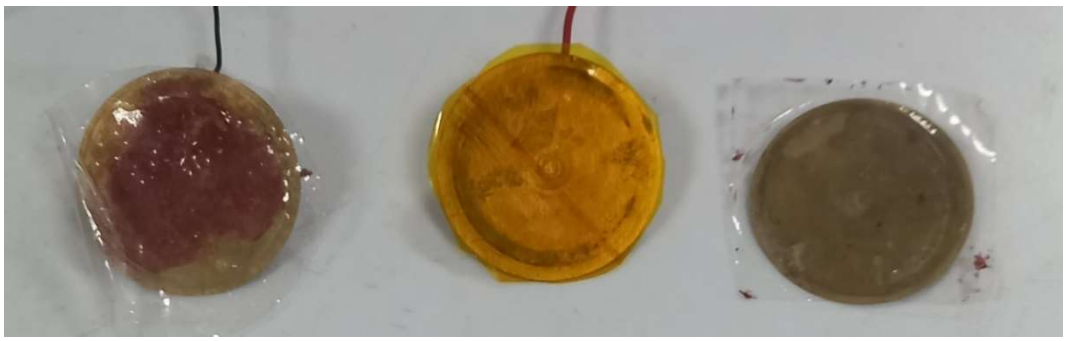


Şekil 3.13. Mikro pompa şeklindeki piezolu pompa ve direkt nozul olarak tasarlanmış piezolu inkjet kafası (ortadaki PET-G, diğer ikisi PLA)



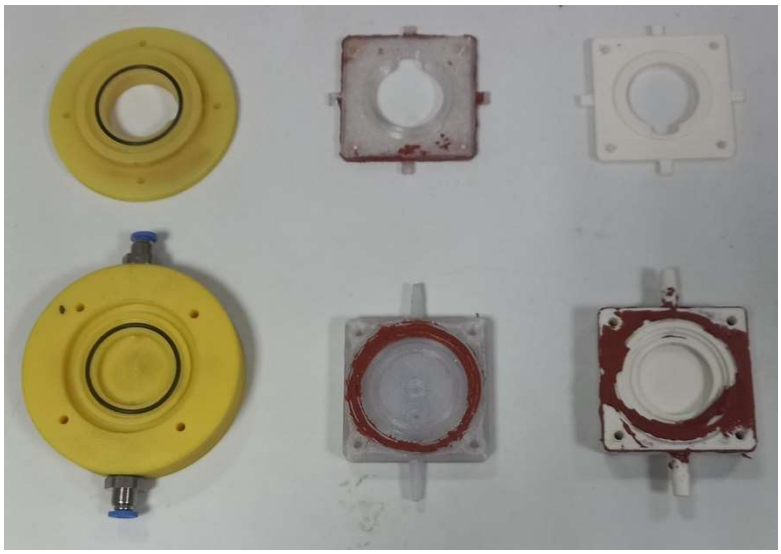
Şekil 3.14. Farklı kanal tiplerine sahip inkjet kafaları

Piezolar sızdırma ve iletken mürekkeple etkileşime girmemeleri için farklı yalıtım malzemeleri kaplanmıştır. PE film ve kapton (polyamid film) kullanılmıştır. PE film yapışkansız veya sıvı conta ile birlikte pirinç malzemeye tutturulduğu denemeler yapılmıştır. Tek tarafında yapışkana sahip kapton bant daha kullanışlı ve pratik olduğundan diğer çalışmalara kapton bant ile devam edilmiştir. Şekil 3.15'de kullanılan yalıtım malzemeleriyle beraber piezolar verilmiştir.



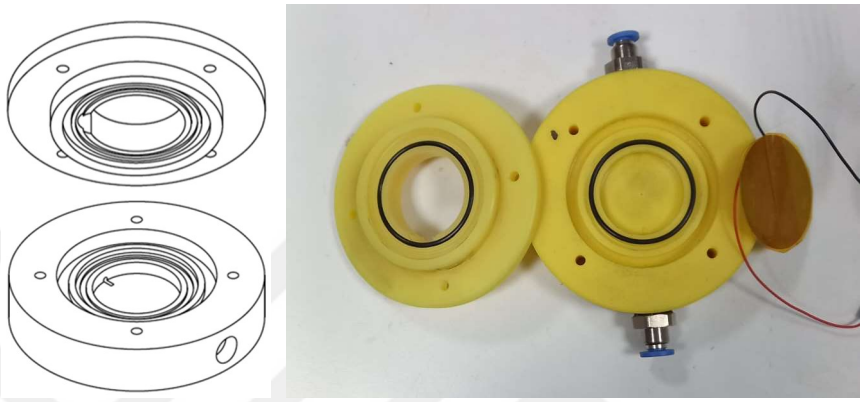
Şekil 3.15. Sıvı silikonlu PE film, ortada kendinden yapışkanlı Polyamid film ve sağda prinç üzerine direkt PE filme sahip piezo elemanlar

Printer parçalarında sızdırma problemi oluşmaktadır. Damla atımı ilk sistem kurulduğunda gerçekleşmekte fakat daha sonra printer malzemelerin bir şekilde sıvıyı sızdırmaları damla atımının kesilmesine yol açmaktadır. Sızdırma problemlerinin sıvı conta ile de çözülememesinden sonra kestamitten (polyamid) parça işlenmiştir. Farklı olarak bu sistemde piezoyu üstten ve alttan sıkıştıracak şekilde çift conta kullanılmıştır. Şekil 3.16'da farklı malzemelerden üretilmiş benzer tasarımlar verilmiştir. Kestamit parça sıvı conta sürülmesi için ek kanallara sahip olsa da herhangi bir sıvı conta ihtiyacı olmadan sızdırmazlık özelliği göstermektedir.



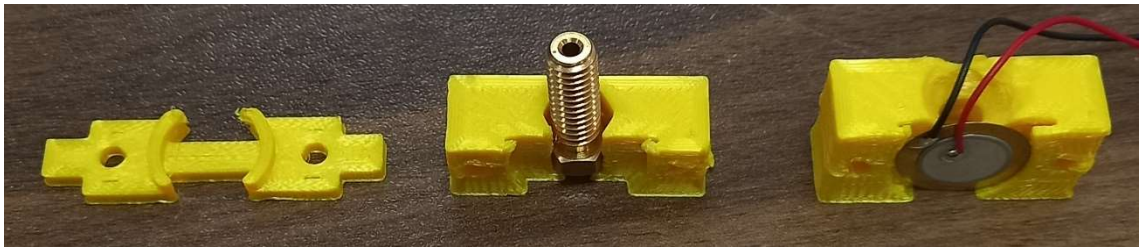
Şekil 3.16. Sırasıyla; kestamit, PET-G ve PLA malzemeden üretilmiş mikro pompalar

Tasarımlar arasında en verimli çalışan yapı kestamitten üretilen yapı olduğu için deneyler bu tasarım üzerinden yapılacaktır. Piezo diskli pompanın görseli Şekil 3.17'de verilmiştir. Sızdırmazlık için piezo disk iki adet o-ring arasına sıkıştırılmaktadır. Piezo diskin sıvı ile temas ettiği bölümü kapton (polyamid) bant ile yalıtılmıştır. Deneyler stabilizasyonu sağlayabilmesi sebebiyle çift mikro pompalı düzenek ile yapılacaktır.



Şekil 3.17. Kestamitten üretilmiş piezo diskli darbe üretici ve tasarım görseli

Pompanın sabit debiyle çalışması durumunda nozulun ucunda belirli bir süre sonunda damlacık oluşmaktadır. Bu damlacık dışarıda nozula titreşim verilerek kontrollü bir şekilde düşmesi sağlanabilmektedir. Şekil 3.18'de verilen görselde nozula piezo ile titreşim verecek düzenek verilmiştir. Gerek olduğunda kullanılmak üzere tasarlanmıştır.



Şekil 3.18. Nozulla belirli aralıklarla mekanik vuruş ile titreştiren ve nozul ucundaki damlayı düşüren sistem

3.3. Dozaj Pompasının Hazırlanması

Çek valf olmadığı için basınç dengesinin sağlanabilmesi için bu sistemlerde rezervuarın belirli bir yükseklikte tutulması gerekir. Yükseklik problemini çözmek için damla atım

hızına bağlı peristaltik bir pompa ihtiyacı duyulmuştur. Peristaltik pompa ilk olarak CATIA programında dişli sistemiyle daha da hassas hale getirilmiş bir tasarımla gerçekleştirildi. Bu sebeple hazır bir peristaltik pompanın modifikasyonuna gidilmiştir. Alınan pompa ortasında bir mil ile sıkı geçme şekilde üç silindiri çeviren bir yapıya sahiptir. Şekil 3.19'da modifikasyonu yapılmış peristaltik pompa ile sıfırdan tasarımı yapılmış peristaltik pompa gösterilmiştir.



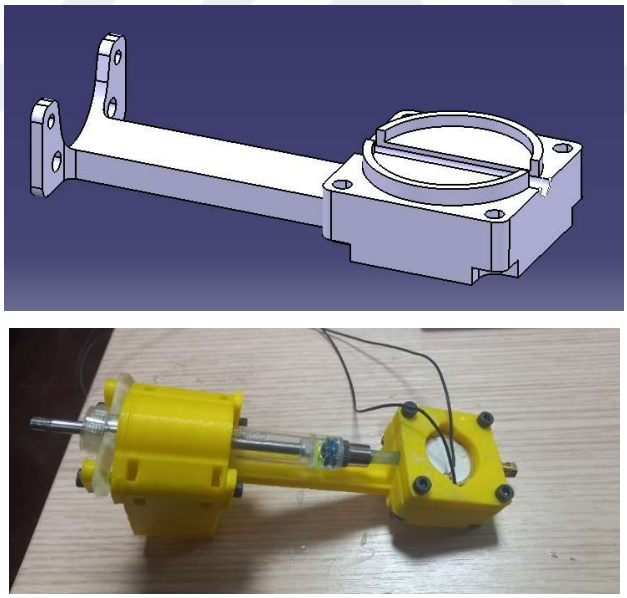
Şekil 3.19. Sırasıyla modifikasyonu yapılmış peristaltik pompa ve sıfırdan tasarımı yapılmış peristaltik pompa

Bu pompada peristaltik pompanın DC motorla çalışmasından dolayı motor değiştirilmiş ve kontrollü bir şekilde sürülebilecek step motor Nema17 takılmıştır. Sistemin sabitlenebilmesi için yeşil parçadaki çıkıntıların girebileceği şekilde tasarım yapılarak printerdan bir adet parça basılmıştır. Bu parçanın yetersizliğine karşı kalıp çeliğinden benzer bir parça daha geleneksel üretimlerle üretilmiştir. Bu yapıda pompanın dönüşü sıkı geçme bir adet mille gerçekleşmektedir. Bu sebeple printerdan parça basılarak nema 17'nin miline sabitlenmiştir. Şekil 3.20'de DC motor ve step motor kullanılan kaplinlerle birlikte verilmiştir. Bu pompaların debi kontrolü kronometre tutularak kaç saniyede bir damlanın hortum ucunda oluşup düşeceğine bağlı olarak tur mantığıyla ölçümlenerek yapılmıştır.



Şekil 3.20. Sırasıyla DC motor, Nema 17 Step motor, PLA kaplin ve kalıp çeliğinden imal edilmiş kaplin

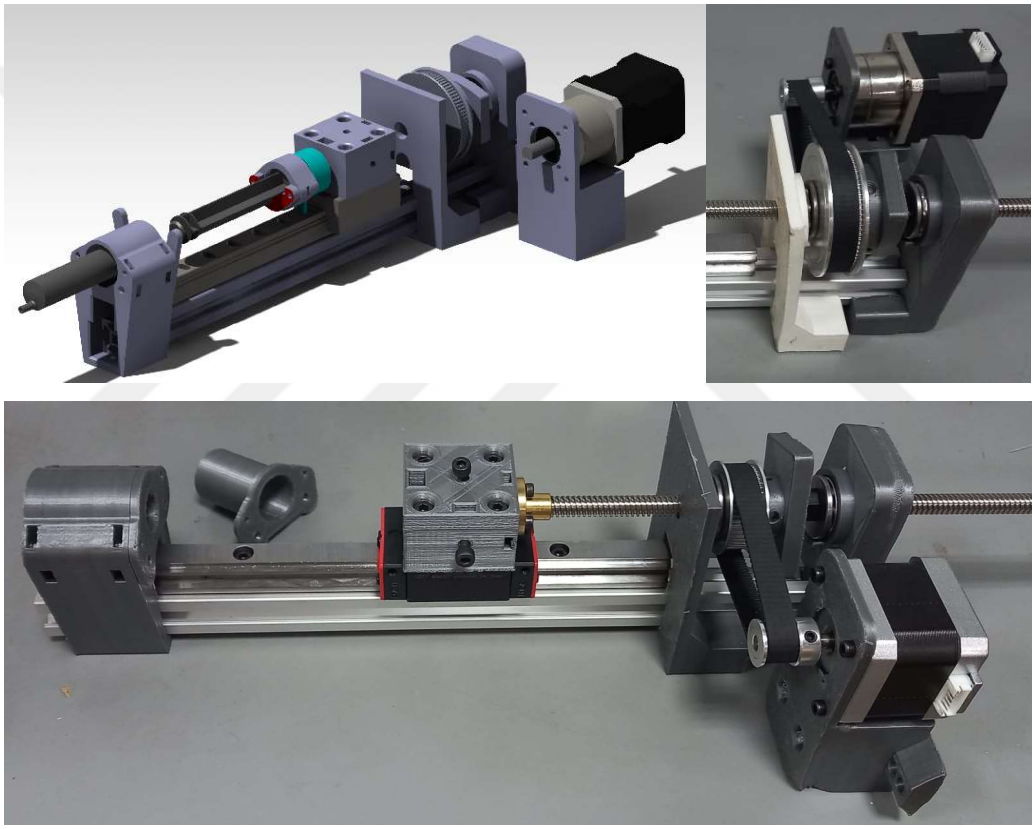
Olası sorunlara karşı alternatif bir tasarım olarak şırınga ucuna bağlanan esnek silikon bir hortumun üzerine piezo diskli pompa mekanizması tasarlanmış ve 3d printerda PLA dan üretimi yapılmış ve düzeneğe yerleştirilmiştir. Bu şekilde kayıpların minimize edilmesi, piezo disk ile akışkan temasının kesilmesi ve kompakt bir sistemin oluşturulması ön görülmüştür. Tasarım ve 3 boyutlu yazıcıdan üretilmiş görseller Şekil 3.21'da verilmiştir.



Şekil 3.21. Kompakt damla üreteci tasarımı ve prototipi

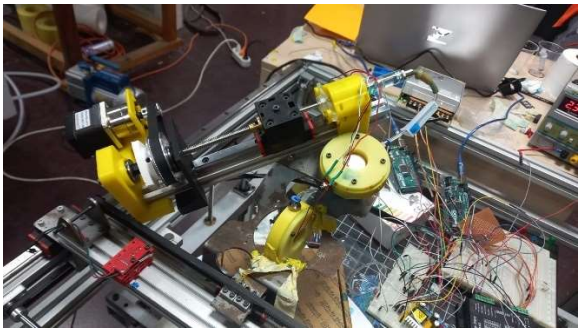
Peristaltik pompa denemelerinde düzenli akışı sağlanamaması sebebiyle şırınga tipi bir pompa kullanılmaya karar verilmiştir. Bu tasarım halka açık kullanılması üzerine yayınlanan bir makaleden alınan tasarımların modifiye edilerek oluşturulmasına dayanır (Klar vd., 2019). Ön kısımda şırınga tipi çapına göre tutucu ek bir parça vardır. Ek olarak

sistemin daha hassas çalışabilmesi için redüktör oranı 5,18 olan 200 adımlı redüktörlü bir Nema 17 step motor kullanılmıştır. Ekstra olarak motordan 20 dişli bir kasnaktan 80 dişli bir kasnağa 250 mm kapalı bir kayışla aktarım mevcuttur. Toplamda 20,72 oranında bir redüktör oranı elde edilmiştir. Bu sayede motorun dönüşü yavaşlatılmış ve şırınganın itimi hassas bir şekilde yapılabilir duruma getirilmiştir. Şekil 3.22'de modifiye edilmiş şırınga dozaj pompasının tasarımı ve prototipin görselleri verilmiştir. Daha sonraki üretimlerde kayış gerdirme kısmı kırlangıç kılavuz yapısıyla daha kullanışlı hale getirilmiştir.



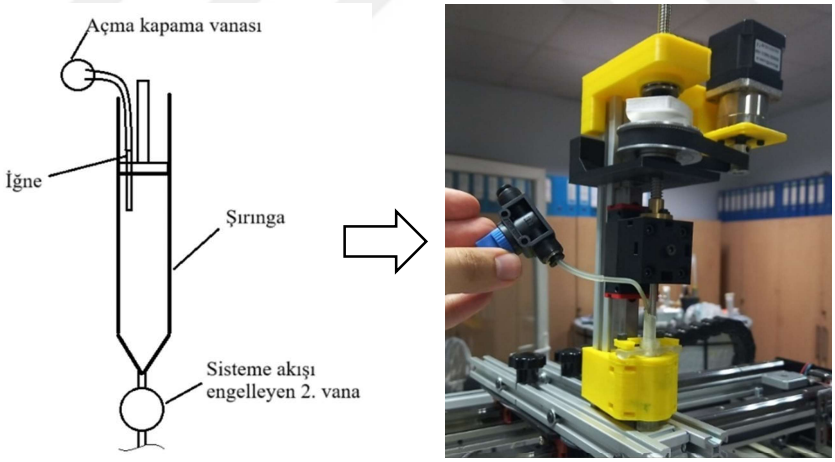
Şekil 3.22. Şırınga dozaj pompası

Şekil 3.23'te şırınga dozaj pompasına çift mikro pompanın montajlanmış hali verilmiştir. Çift piezo olmasının diğer bir avantajı çift vuruş yapılarak daha yüksek bir deplasman verilebilmesidir. Bu durum damla atılabilmesi için daha düşük voltajlarda çalışabilme esnekliği sağlar. Bu sayede sisteme binecek elektriksel yük düşürülmüş olur.



Şekil 3.23. Çift piezolu düzeneğin görseli

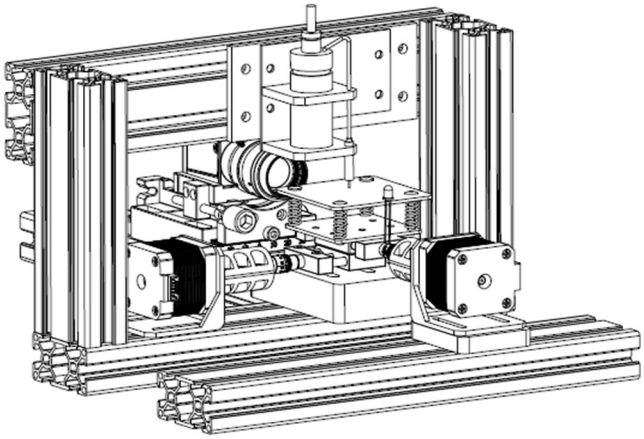
Şırınga haznesinde hava alma sistemine ihtiyacı vardır. Bu sebeple şırınga pistonunda bir bypass kanalı açılmıştır. Şırınga çıkışında bir adet vana vardır. Bu vana şırınga basılırken pompalara mürekkebin akmasını engellemektedir. Bypass kanalı sayesinde şırınganın üzerinde biriken hava vana açılıp şırınga ileri sürüldüğünde ve şırınga ucundaki ikinci vana kapatıldığında bu kanal aracılığıyla şırınga haznesi üzerinde biriken hava dışarı çıkmaktadır. Şekil 3.24'te geliştirilen sistemin taslak çizimi ve hayata geçirilen prototip versiyonu gösterilmiştir.



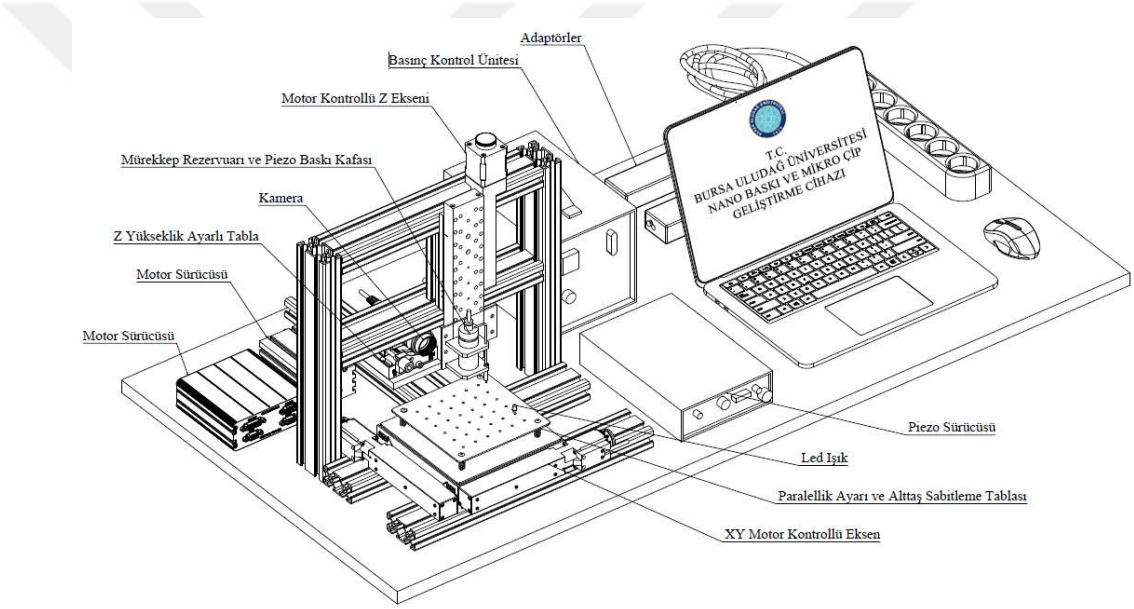
Şekil 3.24. Şırınga hava alma düzeneği taslak görseli ve uygulaması

3.4. Üç Eksen Harekete Sahip Sistemin Belirlenmesi

Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da ön tasarım çalışmaları verilmiştir. Bu iki sistemde yüksek bütçelere ihtiyaç duyulan hazır ekipmanları içerir.



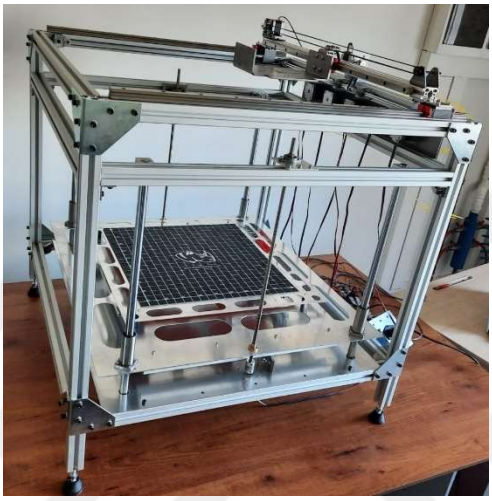
Şekil 3.25. 1. Sistem tasarımın montaj görünümü



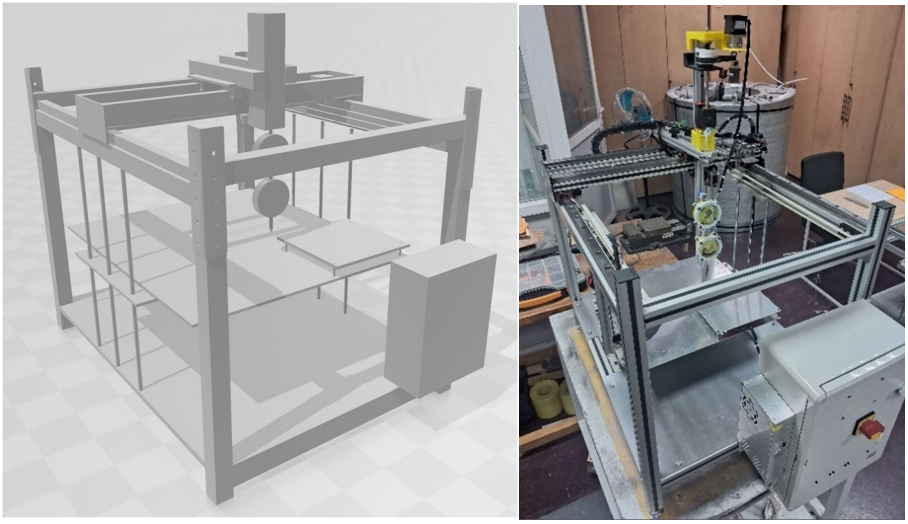
Şekil 3.26. 2. Sistem tasarımın montaj görünümü

Şekil 3.27'da geçici olarak kullanılmak üzere bir çeşit eklemeli imalat sisteminin montaj ve üretim resmi verilmiştir. Bu tasarımda tek bir noktadan ve tek bir araba üzerine konuşlandırılan şırınga dozaj pompası ve mikro pompa düzenekleri olduğu için sarsıntı ve sehimler yüksektir. Şekil 3.28'de pompa sisteminin daha uygun bir şekilde montajlanabileceği x ekseninde çift arabalı çift kızaklı bir yapı mevcuttur. Kızaklar metal bir montaj sacı ile birbirine bağlanmıştır. Bu saca iki noktadan şırınga dozaj pompası ve mikro pompalar montajlanır. Şırınga dozaj pompası ve mikro pompalar bu iki cıvatanın sökülmesiyle rahat bir şekilde sistemden ayrılacak şekilde tasarlanmış ve mikro pompalar

ile şırınga dozaj pompası bütünleştirilmiştir. Bu bütünleşik yapı sayesinde sistem rahat bir şekilde başka bir sisteme entegre edilebilir ve sökülüp bakımı yapılabilir hale gelmiştir. Y ekseni de X eksenine benzer şekilde çift araba üzerinde bulunmaktadır. Farklı olarak iki araba bir uçtadır. Rijitliğin sağlanması ve Y ekseninin eş hareket etmesi için ortak dönen birer uçta iki adet mil mevcuttur. Sistem Y ekseninde bu eş dönen millerin döndürülmesiyle hareket eder. Hareket sistemleri kayış kasnak yardımıyla gerçekleşir.



Şekil 3.27. İlk kullanılan ve üretilen sistemin görüntüsü



Şekil 3.28. Son sistemin tasarımı ve üretilmiş görüntüsü

Damla atımı sonrasında alttaş üzerinde mürekkebin kurutulması gerekmektedir. Bu sebeple mürekkebin basılacağı plakanın ısıtıcılı bir plaka olması gerekir. Aynı zamanda

bu plaka 150-200°C'lere çıkabilen özelliğe sahip olması sebebiyle sinterleme işlemi de aynı plaka üzerinde yapılmaktadır. Genel olarak literatürde hem alttaşın rahatlıkla dayanabileceği hem de sinterlenmenin gerçekleşebileceği sıcaklık olan 135°C'de yarım saat bekletilen gümüş içerikli elektrotlarda birleşme ve kaynaşma gözlemlenmektedir. Şekil 3.29'da 500 watt 220V ısıtıcılı plakanın görseli verilmiştir. Kontrol kartında termistör girişi ve ısıtıcı için çıkış bulunmaktadır. Isıtıcı çıkışına röle bağlanmıştır ve röle aracılığıyla tablaya 220V harici besleme yapılmıştır.



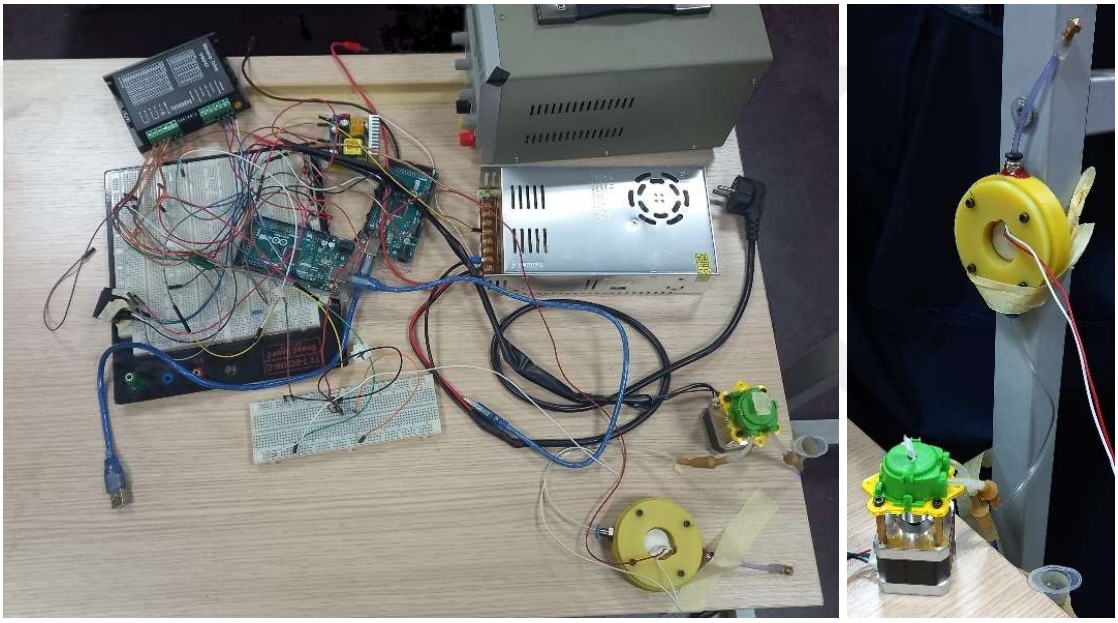
Şekil 3.29. Sinterleme ve kurutma işlemi için kullanılacak 500w 220V ısıtıcılı plaka ve sisteme montajlanmış hali

3.5. Elektronik Devrenin Kurulması ve Programlanması

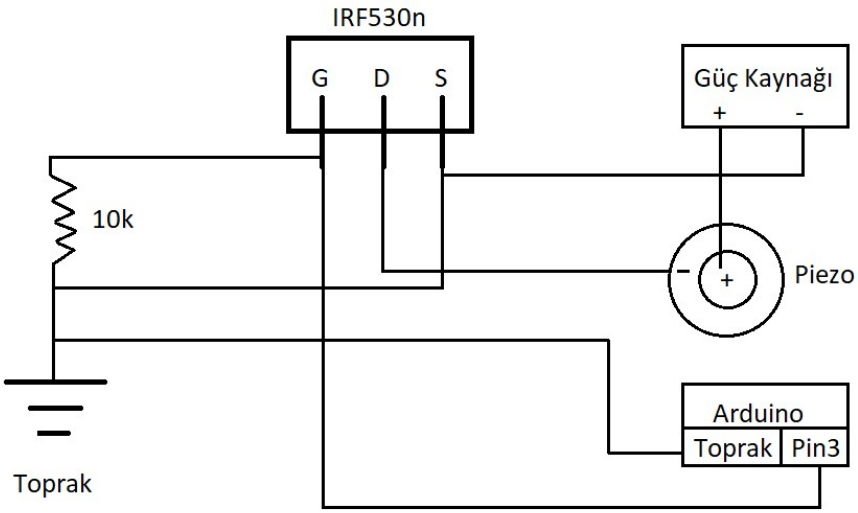
Sistem 1 adet ayarlanabilir güç kaynağı bir adet 12V güç kaynağı bir adet ayarlanabilir transformatör, biri pompayı sürmek diğeri damla kontrolü sağlamak için iki adet Arduino ve bir adet mikrostep sürücü DM542, ve bir adet irf630 mosfetle çalışmaktadır. Transformatör kullanmadan önce 30 voltu pozitif ve negatif olacak şekilde kullanarak piezoya daha fazla deplasman verebilmek için ayrı devre geliştirilmiş JW2SN Panasonic Röle ile kutuplar terslenerek (+)(-) 30 volt şeklinde kullanılmıştır. Voltaj regülatörüyle beraber mosfetler 100 volta dayanabilen irf530n den 200 volta dayanabilen irf630n ile değiştirilmiştir. Sızdırma yapmayan kestamitli mikro pompa pozitif ve negatif değişimler sırasında nozul ucundan sistem içine çok fazla hava çektiğinden dolayı 8 bacaklı röle sisteminden vaz geçilerek IRF630n mosfetli tek tarafa deplasman yapan sistem tercih

edilmiştir. Sistemin genel görüntüsü ve hava almak için mikro pompan ve nozul ağzının yukarı çevrildiği sistem Şekil 3.30'da gösterilmiştir.

Piezonun aç kapa yapacağı devre mosfetlerin rölelerden çok daha hızlı kontrolü sebebiyle mosfetlerden kurulması uygun görülmüştür. Voltaj ve akım kapasitesi uygunluğu sebebiyle IRF530n ve IRF630n tipi Mosfet kullanılmıştır. Devre Arduino ile kontrol edilmiş ve 5 ms'lik bir aç kapa hızı verilmiştir. Kurulan devre şeması Şekil 3.31'de verilmiştir.



Şekil 3.30. Sistemin genel görüntüsü ve sağ da sistemin havasının alındığı yerleşim şekli

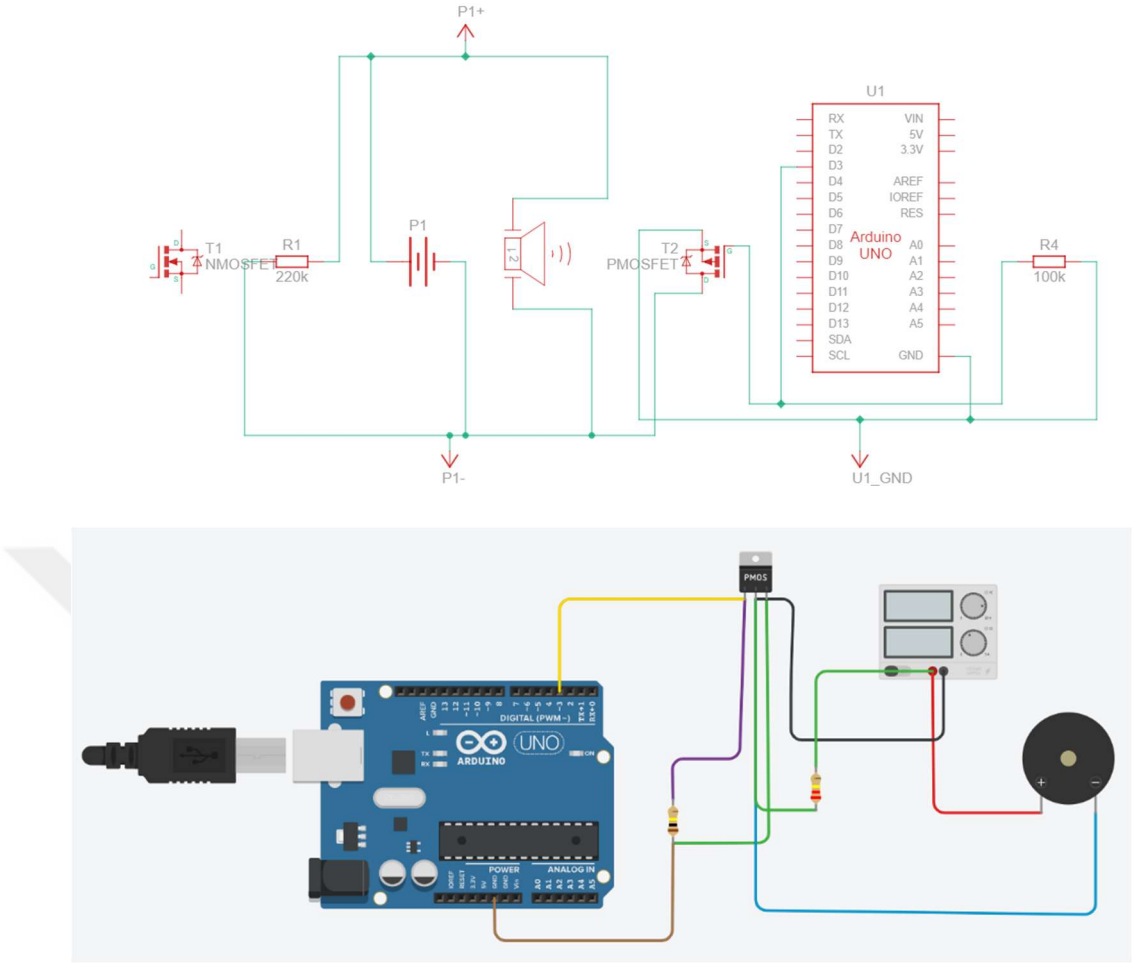


Şekil 3.31. Piezo kontrol devre şeması

Piezonun üzerinde yük tutması sebebiyle darbeler sırasında topraklamaya ihtiyacı oluşur. Mosfetli devrenin çalışıp çalışmadığı 30 Volt verilen bir devre ile denenmiştir. 30 V kullanıldığı için bu sistem bir adet irf530n mosfetle kullanılmıştır. Arduino'dan gelen sinyal ile tetiklenmektedir. Arduino kodu aşağıdaki gibidir ve aç kapa sinyali oluşturur.

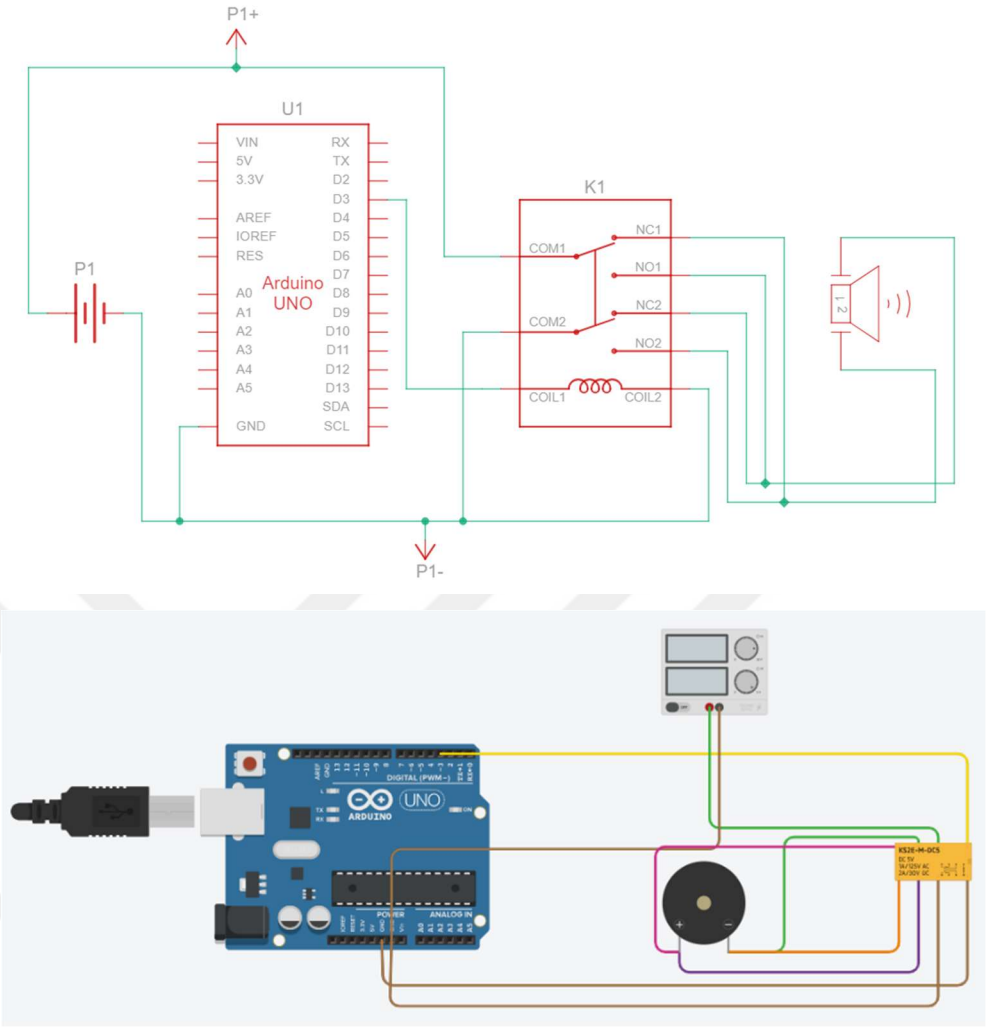
```
const int RELAY_PIN = 3;
void setup() {
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT); }
void loop() {
  digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
  delay(110);
 digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
  delay(55); }
```

Mosfetle kurulan devrenin şeması ve daha anlaşılır bir görseli Şekil 3.32'de verilmiştir. Simülasyonlar Autodesk Thinkercad kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.32. Tek yönlü hareket sağlayan mosfetli devrenin şeması ve grafiksel görseli

±30 Volt şeklinde piezoyu sürebilmek için piezonun ayaklarını tersleyen bir anahtarlanma devresi geliştirilmiştir. Bu devre ilk olarak 8 bacaklı normalde kapalı olan bir röle yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Röleye sinyal verildiğinde röle bacaklarını tersleyerek voltajı piezonun ters katodundan anoduna yönlendirmektedir. Piezonun katoduna 30 volt verilirken anodu toprağa bağlı bir şekilde durmaktadır. Rölenin açık konuma gelmesiyle röle bacakları diğer pime voltajı taşımaktadır. Bu sayede rölenin anoduna 30 volt verilmiş ve katoduda topraklanmış olur. Piezo bu voltaj değişimine bağlı olarak pozitif deplasmandan negatif deplasmana geçiş sağlar. 8 bacaklı röleli devrenin şematik görünümü ve görseli Şekil 2.33'de verilmiştir. Şemada piezo pompa buzzer olarak resmedilmiştir.

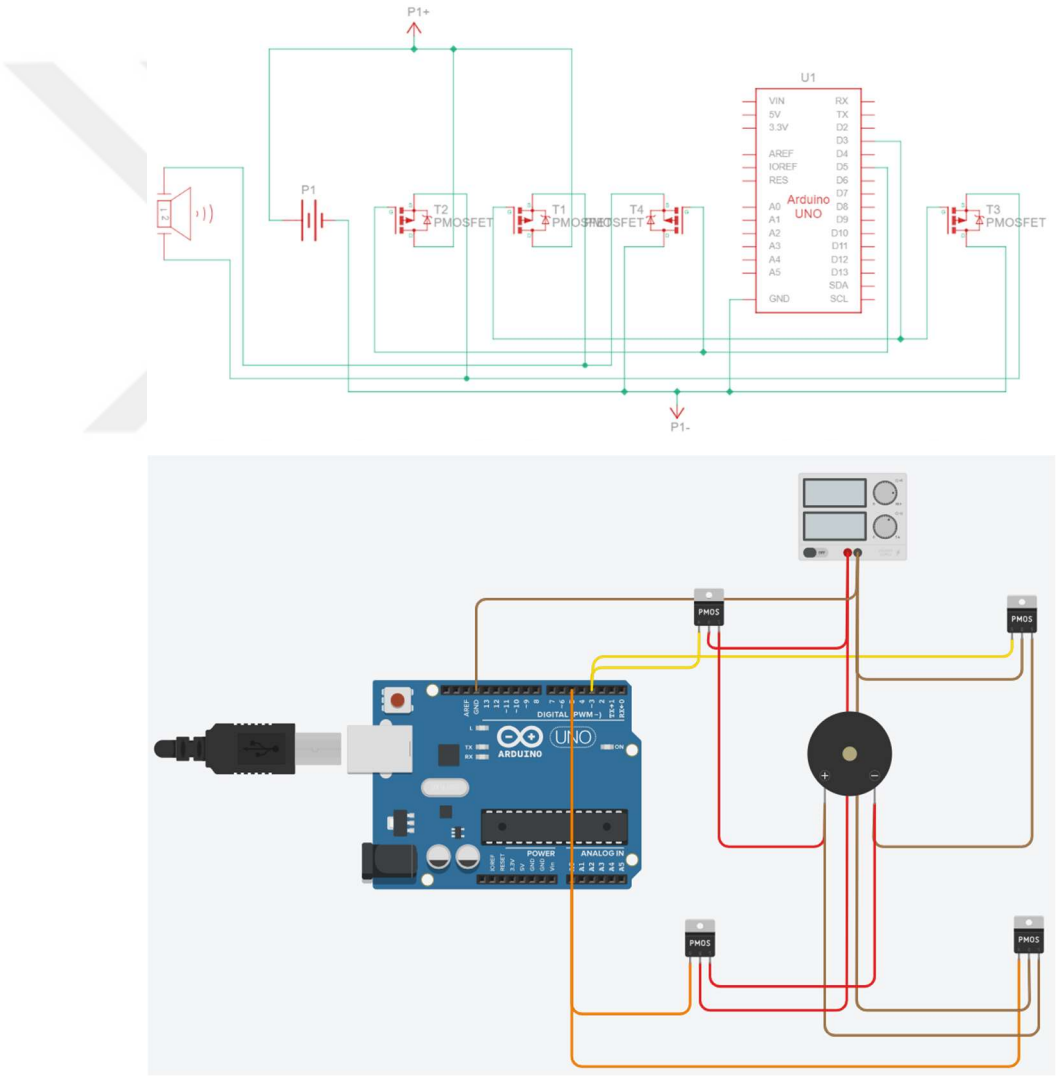


Şekil 3.33. 8 bacaklı röle ile tersleme devresinin şeması ve grafiksel görseli

Rölenin sesli çalışmasından ve rölenin tepkime sürelerinin kısıtlı olmasından dolayı sistemin bir benzeri mosfetlerle de sağlanmıştır. Benzer devre mosfetler ile kurulduğunda 4 adet mosfet kullanılması gerekmektedir. 4 adet mosfetle geliştirilen devrenin grafiksel gösterimi ve elektriksel devre şeması Şekil 2.34'de verilmiştir. 4 Mosfetli anahtarlama devresinin kod bloğu aşağıda verilmiştir:

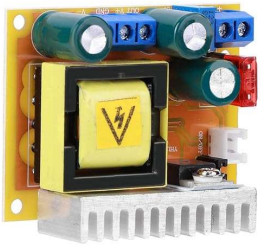
```
const int RELAY_PIN = 3;
const int RELAY2_PIN = 5;
void setup() {
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(RELAY2_PIN, OUTPUT); }
```

```
void loop() {
 digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
 delay(500);
digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
 // delay(500);
digitalWrite(RELAY2_PIN, HIGH);
 delay(500);
digitalWrite(RELAY2_PIN, LOW);
//  delay(500); }
```



Şekil 3.34. Dört adet mosfetle voltajı tersleyen sistemin devre şeması ve grafiksel gösterimi

30 Volt ile beslenen bu sistemler genel olarak damla atımını sağlamakta yetersiz kalmışlardır. Bu sebeple devreye 20 volt çıkış verilerek Şekil 3.35'te görseli verilen ayarlı voltaj yükseltici bağlanmıştır. Bu devre 8-32V DC girişi ±45V-390V DC çıkışa yükseltebilmektedir. Burada voltajın yükselmesiyle beraber yükselt voltajda damlaların jetlenerek püskürdüğü görülmüştür. Damlacık oluşturmak için belirli bir voltaj aralığında çalışılması gerekmektedir. Genel olarak 70-110 volt arasında sağlıklı damla oluşumu görülmüştür. Deneyler bu aralıkta gerçekleştirilecektir.



Şekil 3.35. 8-32V DC girişi ±45V-390V DC çıkışa yükselten Voltaj dönüştürücü

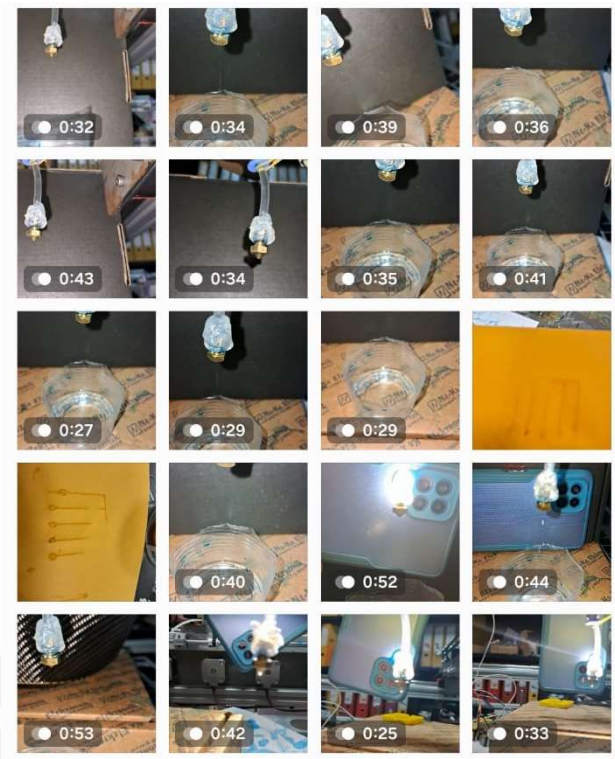
Peristaltik pompa step motoru sürücüsünde 3200 adım devir olarak mikro-adıma bölünmüştür. Burada motoru olabildiğinden daha hassas ve yavaş kullanabilmek için koddaki devir başına step sayısı kasıtlı olarak ufak girilmiştir. Bu sayede girilen farkın oranı kadar hız ayarı hassas bir şekilde yapılabilmektedir. Ek olarak peristaltik pompa piezoya yardımcı eleman olarak da kullanımı denenmiştir. Geri çekme ayarı eklenerek nozul ucunda sıvı birikmesi veya sıvının az gelmesi durumu periyodik olarak gerçekleştiğinde piezo ile peristaltik pompanın eş çalışmasıyla müdahale edilme imkanı vardır. Kullanılan Arduino kodu EK 1'te verilmiştir:

Piezoların optime edilmesinin yanında şırınga dozaj pompasınında atılan damla miktarınca nozul ağzına sıvı pompalaması gerekemektedir. Mikrostep sürücüsü DM542 kullanılmakta ve burada 3200 mikro adıma motor bölünmektedir. Bazı durumlarda ara değer aranıyorsa mikrostep 25600 adıma kadar bölünebilir ve kodtaki stepsPerRevolution değeri daha küçük seçilebilir. Bu değişim adımlar arasındaki hız değerlerini açmakta ve daha hasas motoru çevirme imkanını sunmaktadır. Örneğin 400 mikrostepe bölünmüş bir sürücüde 1'den 2 rpm'e 10 birimde ulaşabiliyorken; 3200 mikro stepe bölünmüş bir motor için 1'den 2 rpm'e ulaşırken 80 birimlik farklı parametre imkanı oluşmaktadır.

Aşağıda şırınga dozaj pompasının değerleri verilmektedir. Şırınga dozaj pompası 4 düğmeye sahiptir. İlk seçenek basım sırasında yavaş ilerleme, ikinci seçenek sıvı çekim sırasında yavaş ilerleme, üçüncü seçenek hava alma işlemi için hızlı ilerleme, dördüncü seçenek hızlı geri çekmedir. EK 2'de şırınga dozaj pompasının Arduino kodu verilmiştir.

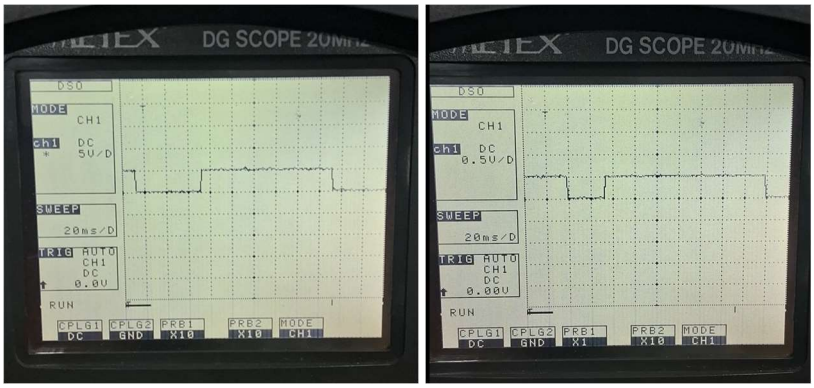
3.6. Damla Kontrol Yöntemi

Üretilen ve montajlanan sistemde ilk olarak su ile denemeler yapılacaktır. Daha sonra normal mürekkep oransal olarak karıştırılarak damla atılabilir aralık tespit edilecek bu orana göre mürekkebe alkol karıştırılacaktır. Çift piezolu sistemde piezolara farklı bekleme süreleri ve farklı voltajlar verilebilmektedir. Bu sayede damlanın uygun bir şekilde damlatabilmesi daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Su verilen sistemde ağır çekim, yüksek kare hızlı çekim, kamera ile kayıt alınmış ve nozul ucundan atılan damlalar izlenerek sistem optimize edilmektedir. Optimizasyon sırasında voltaj, piezo basım süresi ve şırınga dozaj pompası hızı ayarlanmaktadır. Eğer damla oluşuyor ve sonraki atımlarda nozul ucunda damla tanesi birikip büyüyorsa şırınga dozaj pompası çok hızlıdır. Eğer damla atılıyor ve nozul ucundaki menisküs her seferinde dahada içeri doğru kalıyorsa şırınga dozaj pompası yavaş çalışıyordur. Damla atılamıyorsa voltaj düşüktür. Damla parçalanıyorsa voltaj yüksektir. Her yapılan değişim damla boyutun da etkilediği için şırınga dozaj pompası tekrardan ayarlanması gerekir. Şekil 3.36'da yapılan optimizasyon sırasında çekilmiş videoların görseli verilmiştir. Mürekkep atımı içinde benzer yöntem uygulanacaktır.



Şekil 3.36. Damla atımının yavaş çekim optimizasyon kayıtları

Optimum dalga formu bulunurken şırınga hızı, voltaj ve iki piezoya da eş basıldığında damla üretilebilen ayarlar bulunmuştur. Daha sonra arkadan ışık verilerek ağır çekimde izlenen damlaların hataları gözlemlenerek iki piezonun ayrı ayrı dalga formu parametreleri değiştirilerek uygun damlacık görümü aranmıştır. Bu dalga formuna ulaşırken literatür taranmış ve kare dalga ile üretilen damlaların dalga formuna yakın olabilecek değerler arasında dolaşım yapılmıştır. Damlanın her atımda sorunsuz olarak gözlemlendiği damlanın arduino kodu aşağıda verilmiştir. Sonra parametrelerde 2 piezoda beraber damlaya vuruş yapmakta daha sonra 110 ms beklenmekte 1. piezo doğal konumuna çekilip 26 ms bekletilmekte ve daha sonra 2. piezo doğal konumuna döndürülerek 34 ms beklenmektedir. Dalga formu ölçümleri METEX DG Scope 20MHz cihazıyla gerçekleştirilecektir. Şekil 3.37'de mosfetlere verilen sinyalin dalga formu verilmiştir.

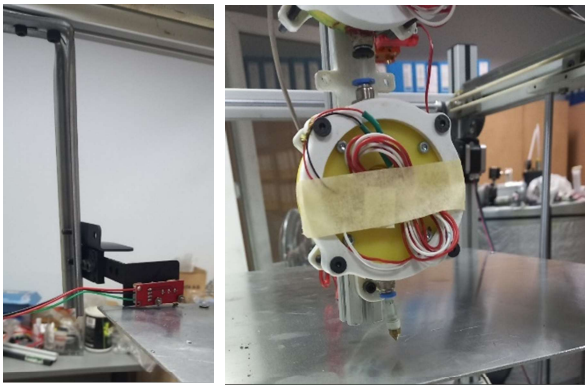


Şekil 3.37. Arduino'nun verdiği sinyalin çıktısı sırasıyla 3. pin ve 7. pin çıktısı

```
const int RELAY_PIN = 3;  //
const int RELAY_PIN2 = 7;
void setup() {
  pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(RELAY_PIN2, OUTPUT); }
void loop() {
  digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH);
  //delay(110);
  //delay(110);
  digitalWrite(RELAY_PIN2, HIGH);
  delay(110);//110 su için
 digitalWrite(RELAY_PIN, LOW);
 delay(30); //26 su için /75 volt iki piezoda
 digitalWrite(RELAY_PIN2, LOW);
  //delay(55);
delay(40); }}//34 su için
```

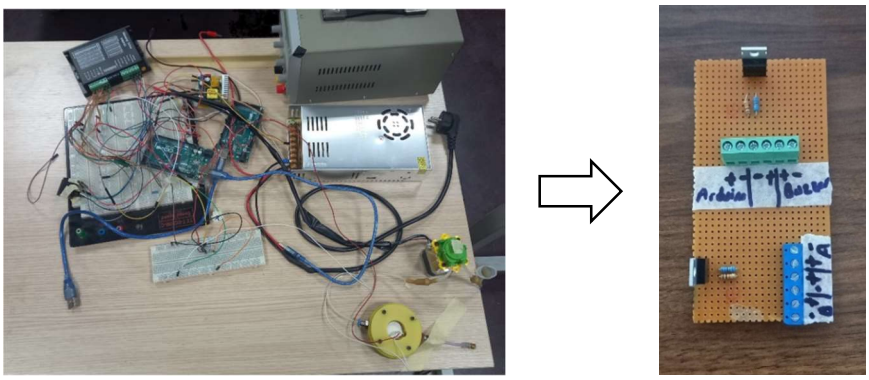
3.7. Sistem Montajı

Z ekseni için limit anahtarı nozul ucuna göre konumlandırılmıştır. Şekil 3.38'de z ekseni limit anahtarının konumu slotlar üzerinde kaydırılarak değiştirilerek zemine hizalanabilir. Bu durumda damla atış mesafesinin rastgeleliği daha düzenlenebilir bir yapı içine alınmıştır. Ve damla atış mesafesi kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilir olmuştur.



Şekil 3.38. Z ekseninin end-stop switchinin konumlandırılması

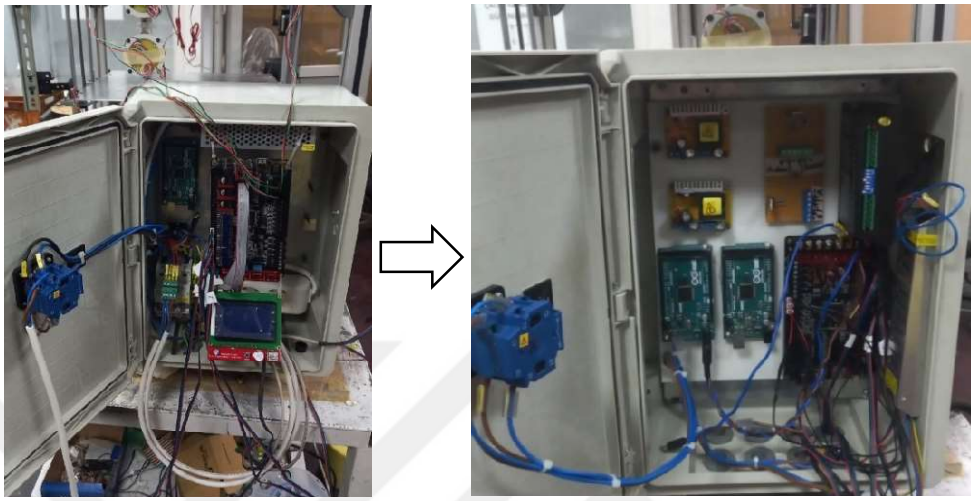
Mosfet ile piezoların kontrol edildiği yapı delikli plaket üzerine montelenerek daha profesyonel derli toplu bir görünüm kazandırılmıştır. Şekil 3.39'te damla üreteç sisteminin kontrolünün yapıldığı mosfetli sistemin devre tahtası üzerindeki düzensiz ve karmaşa içerisindeki önceki görünümü verilmiştir. Bu çalışma düzeninde herhangi bir bağlantı kablosunun çıkması durumunda arıza kaynağının tespiti ve hangi kablonun nereye takılacağı konusunda ciddi sıkıntılar yaşanmaktaydı. Yeni sistemde delikli plaket üzerine bu sistem derlenmiş bir şekilde kompakt bir yapı haline getirilmiştir.



Şekil 3.39. Mikro pompa düzeneğinin kontrolünün sağlandığı mosfetli sistemin son hali

Ön denemelerin yapılmasından sonra damla üreteci sistemindeki karışıklık ve kablo çıkma olasılıklarını gidermek gerekliliği doğmuştur. Bu karmaşanın önüne geçilebilmesi için ayrı bir karkas üzerinde sistemler toplanmıştır. Yeni sisteminde ön denemelerinde kabloların dışarıdan geçmesi olası bağlantı problemleri oluşturmakta ve çalışmayı zorlaştırmaktaydı. Cihazın stabil çalışabilmesi ve parametrelerin dış etkenlerden etkilenmemesi için kablolama ve düzen sorunu çözülmeye çalışılmıştır. Şekil 3.4'ta

panonun ve Şekil 3.41'de cihazın önceki ve yeni görünümü verilmiştir. Metal plakadan yalıtım için pano arkasına PLA'dan bir plaket basılmıştır. Bir önceki sistem de ise herhangi bir pano kullanılmamıştır ve dağınık bir görünüm mevcuttur.



Şekil 3.40. Pano içi kablolama son hal



Şekil 3.41. Damla üreteç sisteminin kablolarının dışarıdan dolaştığı ve kabloların sigma profillerin içerisinden dolaştığı son hali ve piezo ve pompa kontrol düğmeleri

3.8. Mürekkebin Oluşturulması

Literatür taramasında iletken mürekkebin oluşturulduğu kimyasallar araştırılmış ve iletken mürekkeplerde kullanılan kimyasalların ulaşılabilirliği için piyasa araştırılmıştır ve aşağıdaki kimyasalların uygun fiyatta ve bulunabilir olduğu görülmüştür (Çizelge 3.2)

Çizelge 3.2. İletken mürekkep oluşturabilmek için kullanabileceğimiz ve ulaşılabilir kimyasallar listesi (*ChemSpider*, 2025; *Pub Chem*, 2025)

Formül	İsim	Kaynama Noktası (°C)	Erime Noktası (°C)	Yoğunluk (g/cm³)	Dinamik Viskozite (mPa·s)	Yüzey Gerilimi (mN/m)	Molekül Ağırlığı (g/mol)
C_3H_8O	İzopropil alkol	82,6	-88	0,7854	2,4	20,93	60,09
$C_2H_6O_2$	Monoetilen glikol	197,6	-12,8	1,1132	20,9	47,99	62,07
C_7H_8	Toluen	110,6	-94,9	0,8623	0,56	27,73	92,14
$C_6H_{12}O_2$	Butil asetat	124	-78	0,8825	0,685	14,5	116,16
$C_4H_8O_2$	Etil asetat	77,1	-83,8	0,9003	0,45	23,75	88,11
$C_6H_{14}O_2$	Butil glikol	168,4	-74,8	0,9015	3,15	26,14	118,17
H_2O	Distile su	100	0	0,995	0,8949	71,97	18,015
C_3H_6O	Aseton	56,08	-94,9	0,7845	0,27	23,7	58,08
$C_3H_8O_3$	Gliserol	290	18,1	1,2613	17	–	92,09
$C_{18}H_{36}O_2$	Stearik asit	383	68,8	0,9408	9,87	–	284,5
BH_3O_3	Borik asit	300	171	1,5	–	–	61,84
$AgNO_3$	Gümüş nitrat	440	212	4,35	–	–	169,87
C3H10N2	1,2-Diaminopropan (%99)	119,5	-37	0,864	–	–	74,127
$C_{20}H_{37}NaO7S$	Sodyum dioctil sülfosüksinat (%98)	82,7	173–179	1,1	–	–	444,56
NaOH	Sodyum hidroksit (1N)	1388	323	2,13	–	101,05	39,99
C_2H_7N	Etilamin	16,6	-81	0,69	–	–	46,08
C_2H_6O	Biyoetanol (Şömine yakıtı)	78,37	-114,1	0,789	1,2	22,3	46,07
$K_2C_2O_4 \cdot H_2O$	Potasyum oksalat monohidrat	–	–	2,2	–	–	184,24
$(C_6H_9NO)_n$	Polivinilpirolidon (PVP K30)	90	57	1,04	2,07	–	111,14
$N_2H_4 \cdot H_2O$	Hidrazin hidrat	120,1	2	1,032	1,3	–	50,06
$H_2C_2O_4$	Oksalik asit	–	189,5	–	–	–	90,03
$Na_2C_2O_4$	Sodyum oksalat	–	250	2,34	–	–	134
$C_4H_{10}O$	N-Bütanol (%99)	117,7	-89,8	0,81	2,95	24,6	74,12
CH_3OH	Metanol (Deri kimyasalı)	64,7	-97,6	0,791	0,544	22,6	32,04
CH_3COONa	Sodyum asetat	324	58	1,528	–	–	82,03

İletken nanoparçacık katkılı mürekkebin oluşturulması için en uygun ve kontrol edilebilir yöntem bilyalı öğütme olarak görülmüştür. Nano boyutta alınacak tozların fiyatları yüksek, miktarları düşük olduğu için mikron boyutlarında iletken toz alınıp öğütme işlemi yapılması uygun görülmüştür. İlk denemeler için ortalama 5 mikron boyutundaki demir tozu bilyalı öğütme sistemiyle nanoya düşürülmek istenmiştir. Seçilen düzeneğin boyutları aşağıdaki gibidir.

Bilyalı öğütme yapılacak kavanozun boyutları: Kavanoz boyu 121 mm, göbek çapı 72,5 mm, taban çapı 55 mm, bilya yüksekliği 10 mm (boşluklu yüksekliği), bilya kavanoz hacmi 22,7 ml (boşluklu hacmi), %6,81 bilya doluluğu, kavanoz ağırlığı 186 gr, kavanoz kapağı toplam 78,5 gr, 95mm yükseklikte 300 ml, 121 mm yükseklikte 360 ml sıvı olacak şekilde ölçülmüşütr. Bilya çapı 3 mm, bilya tane ağırlığı 0,11 gr, toplam bilya ağırlığı 115,5 gr, toplam bilya sayısı 1050'dir. Kullanılan üretra kabı bilgileri: Üretra kabı ağırlığı 8,3 gr, üretra kabı kapağı 4,3 gr, üretra kabı hacim, 100 ml, üretra kabı konik çapı dibi 48,5 ortası 54 kapak bölgesi 56,8mm, üretra kabı boyu 55,5-59,5 mm, bilya yüksekliği 13 mm (boşluklu yüksekliği), bilya üretra kabı hacmi 22,7 ml (boşluklu hacmi) olarak ölçülmüştür.

Deneyin yapılması için eldeki malzemeler sonucunda seçilen parametreler: 115,5 gram bilya (22,7ml), ağırlıkça bilya/toz oranı: 15:1'dir. Bu parametreler sonucunda 7,7 gram toz eklenecek, 34,05ml - 36,32 (+toz hacmi) yani hacimce %60 sıvı olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu doğrultuda sıvı içeriği 29,75 gram DI + 5,25 gram IPA hacimce toplam 36,32 ml'dir. Ağırlıkça 35 gram sıvı elde edilmiş olur. Daha sonra ana derişimi elde edebilmek için %1,5 katı iletken nanopartiküllü karışımı ilave 399,5 gram DI + 70,5g İPA eklenecek ve karışım bilyalardan ayrılıp 1 gram PVA (1000de 2 ipa) eklenerek karıştırılacak. Toplam ağırlık, 505 gram DI-IPA + 7,7 gram Fe tozu + 1 gram İPA ile birlikte 513,7 gram olmuştur. Fakat kavanoz hacmi bu oranda sıvıyı kaldıramayacağı için IPA, DI ve PVA ağırlıkça yarısı konmuştur. Toz derişimi böylece %3'e çıkarılmıştır. Şekil 3.42'de hazırlanan miktar sonucunda kavanoz içerisindeki malzemenin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.42. Bilyalı öğütme için ayarlanan toz bilya ve sıvı hacmi sonunda kavanozun görünümü

Bilyalı öğütme için 45° eğimli bir platform oluşturulmuştur bu platform ve öğütme sistemi tasarlandıktan sonra parçaları FDM eklemeli imalat cihazıyla yazdırılmıştır. 45° eğimli platform oluşturulmanın sebebi kavanoz hacminin büyük oluşu ve deney için gerçekleştirilecek olan 3 mm'lik bilyaların sayısının az oluşu sebebiyle toz ve bilyarın yerçekimi etkisiyle kavonoz köşesinde öğütme amacına dayanır. Şekil 3.43'te düzeneğin görünümü verilmiştir. Sistem 110 rpm de döndürülmüştür. Bunun üstündeki hızlarda merkez kaç etkisiyle bilyalar kavanoz duvarına yapışmakta ve herhangi bir dönme öğütme durumu oluşmamaktadır.

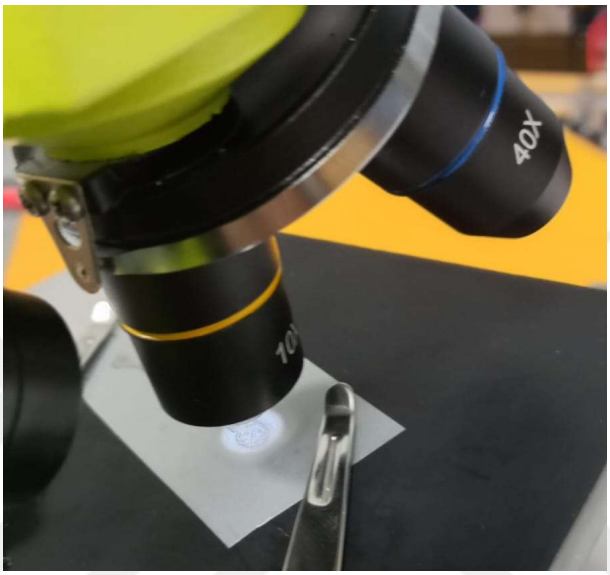


Şekil 3.43. Bilyalı öğütme düzeneği parçaları ve düzeneğin çalışan hali

Nema 17 step motorun hazır kütüphane kodlarında belirli bir rpm üzerine çıkmaması sebebiyle motor sargılara verilen elektriğin ayarlanmasıyla döndürülmüştür. "a" olarak seçilen değer "a" kadar ms beklenmesiyle sargılara sırasıyla elektrik verilmesi aşağıdaki kod ile belirlenmektedir. Bazı sinyal aralıklarında takılma yaptığı için çalışan değerler

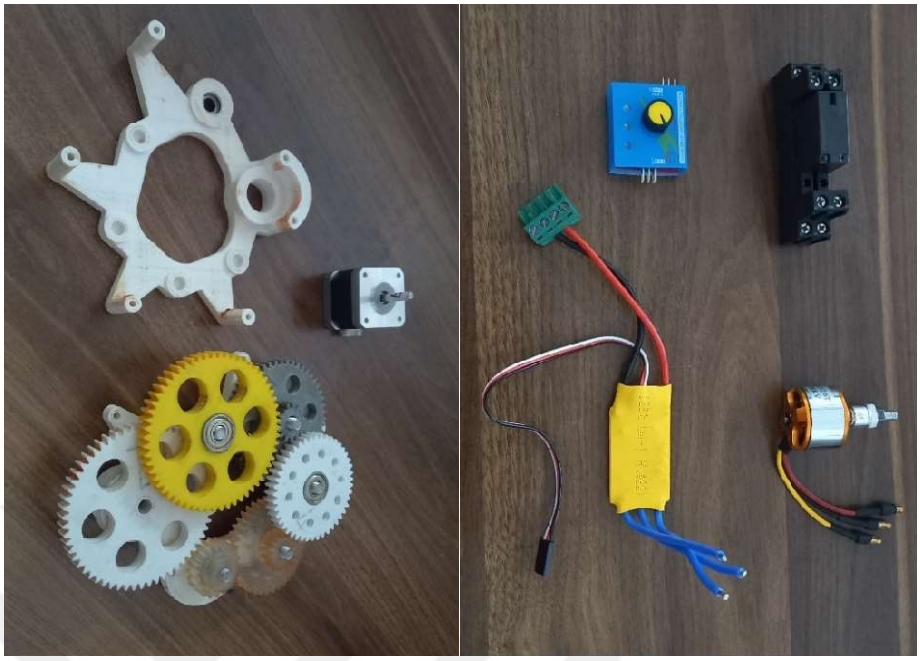
öncesinde tespit edilmiştir. EK 3'de motorun dönüşünü sağlayan sinayalin kod bloğu verilmiştir.

Şekil 3.44'te parçacık ölçümlerinde ve elektrot yolların doğrusallığı ile parçacık dağılımında kullanılan Levenhuk Rainbow 2L PLUS Işık Mikroskopu ile yapılan bir süreçten kesit verilmiştir.



Şekil 3.44. Levenhuk Rainbow 2L PLUS Işık Mikroskopu

Literatür taraması sonucunda gümüş oksalatın ayrılmasında ve gümüş parçacıklarının çökeltilmesinde santrifüj işlemi gerçekleştirildiği görülmüştür. Bu sebeple ihtiyaç olması durumu için alternatifli bir şekilde santrifüj düzeneği tasarım ve üretim çalışmaları yapılmıştır. Nema 17 ile çalışan ve bu step motorun dönüş hızını dişli çarklardan oluşan bir dişli sistemiyle artırıldığı düzenek tasarlanmıştır. Çevrim oranı 1:300'dür. Literatürdeki verilere dayanarak dakikada 10000 veya 7500 devir çevrilmesi hedeflenmiştir. Bununla beraber alternatif olarak A2212 Quadcopter 2200KV Fırçasız Motor kullanılarak redüktör kullanmadan 10000 devir elde edilmesi istenmiştir. Motorun sağlıklı sürülebilmesi için 30A ESC Fırçasız Motor Sürücü ve Servo Test Cihazı – CCPM Tutarlılık Denetleyicisi bağlanarak sürülmüştür. Şekil 3.45'de dişli sistemi ve drone motorlu sistem verilmiştir. Şekil 3.46'da santrifüj sistemin tüplerin takılacağı kısım verilmiştir. Bu bölümde tüpler merkezden kaçık bir şekilde teğet yerleştirilerek birbirlerinin çıkmasını engellememektedir.



Şekil 3.45. Redüktörlü sistem tasarımı ve 2200kV'lık drone motorlu sistem

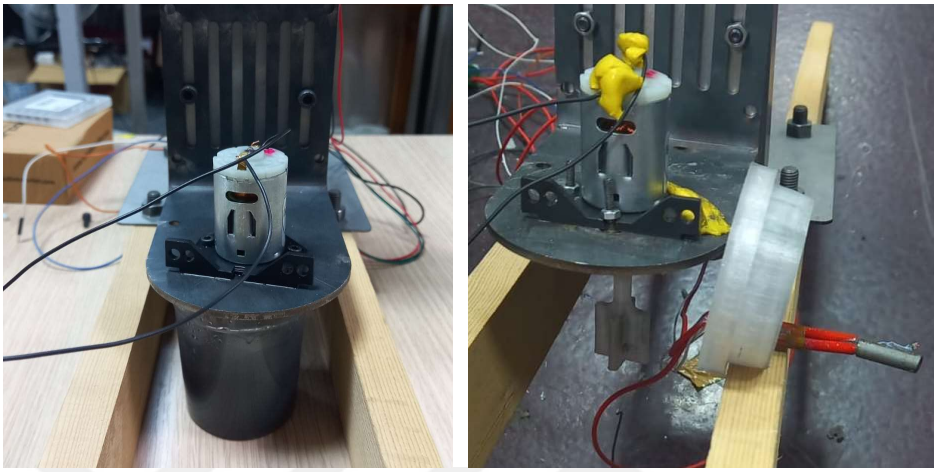


Şekil 3.46. Tüplerin takıldığı santrifüj tasarımı ve sistemin genel görüntüsü

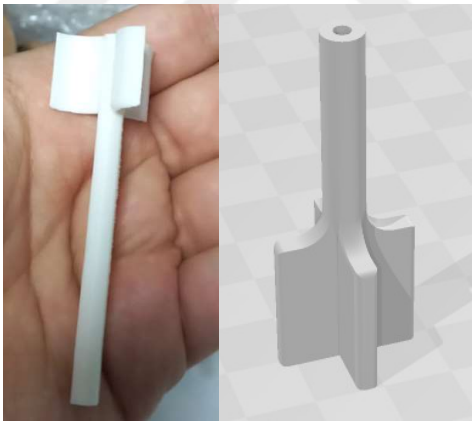
Literatür taraması sonucunda 2000 rpm civarında ve gerekli görünürse ısıtma sistemli düzeneklerde ortalama 4 saat boyunca iletken nanoparçacıklar ile mürekkep malzemeleri karıştırıldığı görülmüştür. Bu sebeple DC motorda voltaj ayarı yapılarak hız ayarlanmıştır. Şekil 3.47'de karıştırma düzeneğinin görseli verilmiştir. DC motorun ucuna Şekil 3.48'deki karıştırıcı uçlar konmuştur. Kaşık formundaki PLA karıştırıcı sıcaklıkla büküldüğü ve fazla dalgalanma oluşturduğu için düz formlu PETG malzemeden üretilen karıştırıcı motora montajlanarak kullanılmaya başlanmıştır. 100k

NTC termistör ve 12V ısıtıcı fişek üretra kabı içine salınarak karıştırıcı düzeneği ısı kontrollü bir şekilde yapılmaya başlanmıştır. Kontrol kartı olarak BIGTREETECH firmasının Octopus V1.1 kartı kullanılmaktadır. Aynı kart ile ana sistemde gcode'ların çalıştırılması ve XYZ eksenlerin kontrolü yapılmaktadır.

.



Şekil 3.47. Mürekkep karıştırma düzeneği: dc motor, ısıtıcı fişek, termistör sıcaklık sensörü ve karışım kabı



Şekil 3.48. Karıştırma düzeneğinin karıştırıcısı kaşık şeklinde ilk tasarım ve düz tasarım olan ikinci tasarım

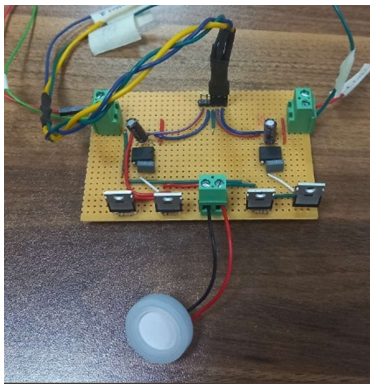
Ek olarak karıştırma için piezo disk ile ultrasonik karıştırıcı yapılmaya çalışılmıştır. Piyasadaki ultrasonik homojenizatörlere bakıldığında 5-40 kHz değerlerinde çalıştığı görülmektedir. Aşağıda 5 kHz değerinde çalışan piezo diskin arduino kodu verilmiştir. Şekil 3.49'da sıcaklık ve zaman ayarlı ultrasonik temizleyici hazne verilmiştir. Olası bir olumsuz durum olduğunda alternatif deneme yapılmak üzere kullanılacaktır.

```
#include <stdint.h>
const int RELAY_PIN2 = 9;
void setup() {
  pinMode(RELAY_PIN2, OUTPUT);
}
void loop() {
  digitalWrite(RELAY_PIN2, HIGH);
    delayMicroseconds(100);
 digitalWrite(RELAY_PIN2, LOW);
    delayMicroseconds(100);
}
```



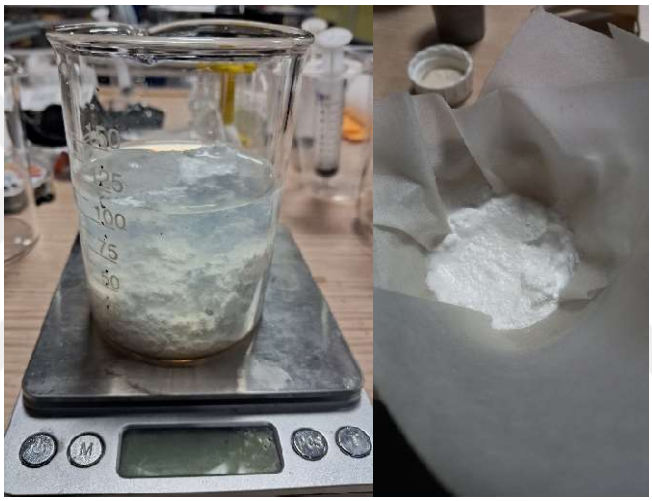
Şekil 3.49. Sıcaklık ve zaman ayarlı ultrasonik cleaner düzeneği ve sağda oda nemlendiricinin ultrasonik karıştırıcı olarak denenmesi

Şekil 3.50'de geliştirilen ultrasonik homojenizer sistemi verilmiştir. Bir uçtan sinyal üreteci ile 40-20 kHz frekans verilirken diğer girişlerden 70V güç girişi yapılmaktadır. Ses dalgalarıyla homojenleştirme ve öbekleşmiş parçaların dağılması hedeflenmektedir. 70V güç girişiyle +70 ve -70 volt arasında 140V değerinde bir deplasman yapmaktadır.



Şekil 3.50. Ultrasonik homojenizatör düzeneği

Parçacıksız gümüş mürekkebin elde edilebilmesi için 10,18 gr gümüş nitrat kullanılmıştır. Gümüş Nitratın mol ağırlığı 169,87 gr/mol'dür. Gümüşün mol ağırlığı 107,87 gr/mol'dür. Yapılan işlemler sonucunda çözelti içerisinde 6,46 gram gümüş kalmıştır. Karıştırma işlemleri Creality UW-02 yıkama ve kürleme makinasının manyetik döndürme mekanizması kullanılarak beherlerin içerisine atılan manyetik balık aracılığı ile yapılmıştır. Şekil 3.51'de gümüş asetat sentezi ve distile su ile yıkanarak süzülüp safsızlaştırma işlemi verilmiştir. Şekil 3.52'de mürekkebin titre yoluyla su içerisinde çözdürülme işlemi verilmiştir. Son işlem olarak çökelen parçaları uzaklaştırmak için elde edilen sıvı süzülerek parçacıksız gümüş mürekkep elde edilmiştir (Şekil 3.53).



Şekil 3.51. Gümüş asetat sentezi ve distile su ile yıkanarak saflaştırılması



Şekil 3.52. Gümüş mürekkebin titre edilme yoluyla elde edilmesi

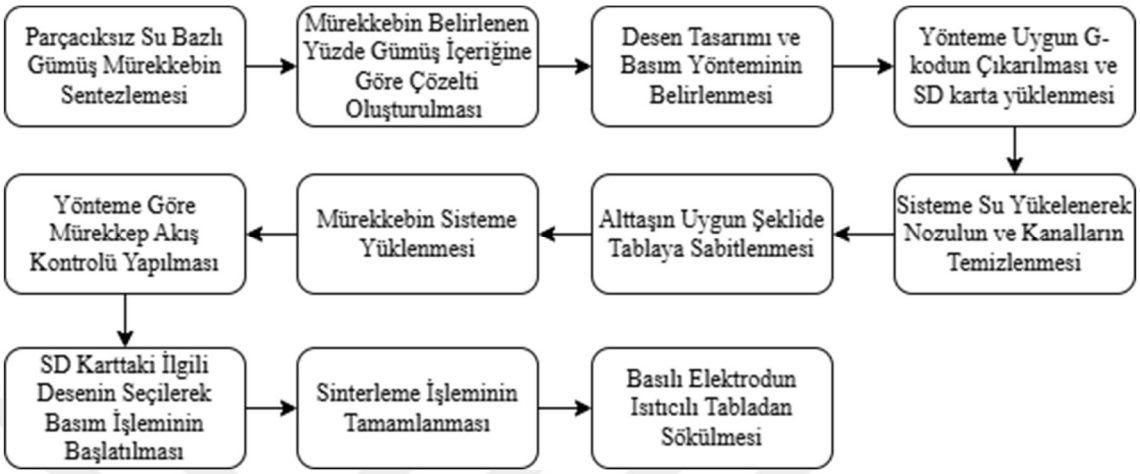


Şekil 3.53. Elde edilen sıvı süzülerek çökelmiş kirleticilerin uzaklaştırılarak gümüş mürekkebin saflaştırılması

3.9. Elektrotların Üretilmesi, Yapılacak Testler ve Ölçüm Yöntemleri

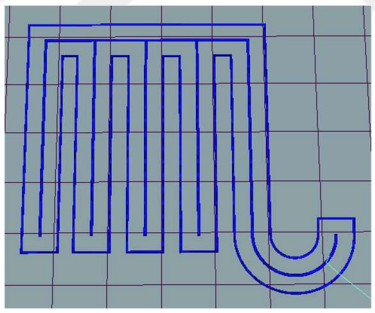
Basılı devrenin üretilmesi için öncesinde bazı süreçlerin tamamlanması gerekir. Bunlar Parçacıksız su bazlı gümüş mürekkebin sentezlenmesi ile başlar. Daha sonra üretilen mürekkep istenilen oranlarda derişimi ayarlanır ve gerekiyorsa katkılanır. Basım için üretim yönteminin serme mi yoksa damla püskürtme mi olacağına karar verilir. Bu karar basılı devrenin tasarım şeklini etkilemektedir. Bu tasarım yapılırken G-kod da düşünülerek yapılmalıdır. Desen tasarımından sonra Repetier host gibi bir G-kodun düzenlenebildiği ve izlenebildiği bir programda düzeltmeler ve gerekli yerlerde nozulun z eksende yükselme hareketleri tayin edilerek kod basıma hazır hale getirilir. Daha sonra hazır olan .gcode veya .g uzantılı dosya SD hafıza kartına yüklenerek mürekkep üreteci cihazın ilgili birimine takılır. Sisteme ilk olarak su yüklenerek kanalların ve nozulun temiz olduğuna kanaat getirilir. Su ile damla püskürtme ve tazyikli sıvı akşının normal olduğu gözlemlene kadar temizlik işlemine devam edilir. Temizlik işlemi tamamlandığında dozaj pompasına entegre edilen hava alma kanalından hava basılarak kanallar içerideki suyun atılması sağlanır. Alttaş ısıtıcılı tablaya boşluk bırakmayacak şekilde sabitlenir. Daha sonra mürekkep sisteme yüklenir ve hava kalmadığından emin olunur. Seçilen basım yöntemine göre bir mühlet damla püskürtme yapılır veya serme yöntemi ise nozuldan akış izlenir. Nozulun tıkalı olmadığı ve akışın düzgün olduğuna kanaat getirildiğinde cihaz basıma uygun hale geldiği kabulü yapılır. Ekran aracılığıyla SD karttaki veri seçilir ve basım işlemi başlatılır. Basım işlemi bittiğinde belirlenen süre kadar sinterlemenin tamamlanması beklenir ve tabla sıcaklığı kapatılır. Tabla 30-40°C'ye

geldiğinde basılı devre tabaldan sökülerek kullanmaya hazır hale gelir. Sürecin akış şeması Şekil 3.54'ta verilmiştir.



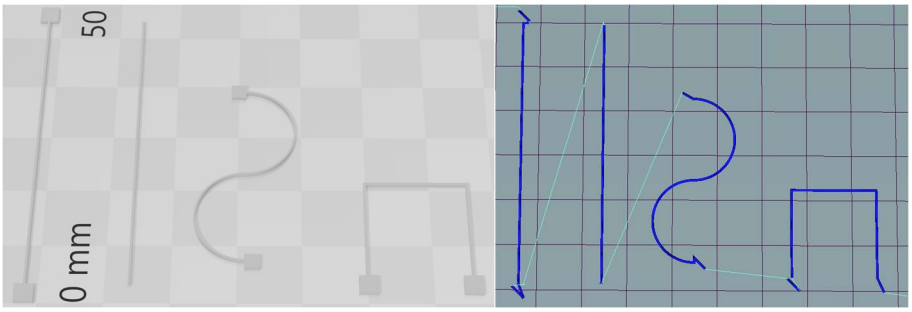
Şekil 3.54. Eklemeli imalat ile üretilecek baskılı devrenin üretim sürecinin akış şeması

Şekil 3.55'te dairesel yapıların çizilmesi kenar dönüşlerin görülmesi ve izlenmesi amacıyla yapılmış desen verilmiştir.



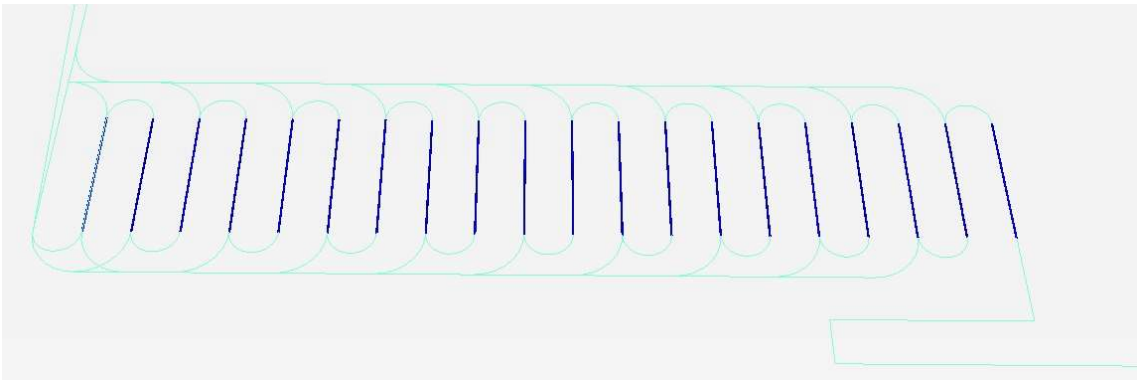
Şekil 3.55. Basım kalitesini görebilmek için tasarlanıp tek katman g-code çıkarılmış desen

Şekil 3.56'da uzunlukları 50 mm olan dairesel dönüş içeren, düz çizgi ve kenar dönüşleri olan yapıların tasarımı ve Repetier-Host V2.3.2 programında çıkarılan g-code görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.56. Düz, dairesel dönüş ve köşe dönüşüne sahip desenler; solda tasarım ve sağda g-kodun görselleştirilmiş hali

Şekil 3.57'de Repetier-Host programında elle yazılarak oluşturulmuş gcode'un ilerleyişini içeren deney tasarımı verilmiştir. Deney katman sayısına göre direnç ölçümlerinin gerçekleştirilmesine dayanır. Sağdaki ilk çizgi tek katman yapıya sahiptir. En soldaki çizgi ise 20 katmanın üst üste basılmasını içerir. Deney 135°C ısıtılmış tabla üzerine yerleştirilmiş alttaşa iletken mürekkebin damlatılması ve serme yöntemiyle yığdırılması işlemini içerir. G-code son çizgiyi çizdikten sonra bir süre kuruma için kenara çekilip bekleme yaptıktan sonra 2. çizgiye gidip ikinci katmanları yazmaya başlar. Daha sonra 3. çizgiye döner ve son çizgi 20 katman olur. Her bitişten sonra bekleme süresi 10 sn daha artırılır. 20 katmanlı gcode 850 satır kod içerir. Bu deney tasarımında ilerleme hızı farklılığı, serme ve damla atma, derişim farkı gümüş içeriği %2-%2,5 olacak şekilde yapılmıştır. Uygun parametrelerdeki katman sayısına sahip yapı diğer deneylerde kullanılmak üzere seçilecektir.



Şekil 3.57. Repiteir host dilimleyici programında tek katmandan 20 katmana kadar g-kodun görüntüsü

Deney tasarımı parametreleri olarak gümüş oranı, basım hızı ve kullanılan basım yöntemi kararlaştırılmıştır. Ön çalışmalar sonucu 150 mm/dk ve 300 mm/dk olmak üzere 2 farklı hız seçilmiştir. Gümüş içeriği yoğunluğu yapılan ön sinterleme ve damlatma denemeleri çalışmaları sonucu ve gümüş mürekkebin maliyetli oluşundan dolayı %2 ve %2,5 olarak belirlenmiştir. Yöntem olarak isteğe bağlı piezolar ile damla oluşturma ve mikro serici mantığıyla basım yapan ve bu çalışma kapsamında serme olarak kodlandırılan yöntemler seçilmiştir. Deney numaraları ve parametrelerini içeren bilgiler Çizelge 3.3'te verilmiştir. Çalışmada hız verisi verilirken g-kodlarda geçen ilerleme hızını ifade eden F değeri ile verilmiştir. Mürekkebin tasarruflu kullanılması amacıyla sadece Deney 1 ve Deney 6'daki elektrotların yirmi katmana kadar üretilmesine karar verilmiştir. Bu deneylerde üst üste basılan katmanların sayısına bağlı olarak direncin ne kadar değişeceğine bakılmıştır. Ayrıca serme yöntemiyle hız olarak da tam karşılaştırma için Deney 2'de 16 ila 20 katman arasında ayrı bir baskı alınmıştır. Diğer deneyler 7 katmanla sınırlandırılmıştır. Deneyler 75 µm kalınlığında DTF PET alttaş üzerine yapılmıştır. Nozul çapı 600 µm, sinterleme sıcaklığı 135°C ve sinterleme süresi 30 dk olacak şekilde seçilmiştir. Sıcaklık değeri 135-140°C arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Dozaj pompasının debisi saniyede 5,544 mikrolitre olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu değer damlacık püskürtme için optimal olarak tespit edilmiştir. Kullanılabilir haznenin strok dğeri 5,6 ml'dir. Sistemin stabil çalışması için ihtiyaç olan hacim 7,4 ml dir. Toplamda hazenin tam dolu olduğu durumda 13 ml mürekkep ihtiyacı vardır.

Çizelge 3.3. Deney numaralarının, basım yönteminin, deneye ait hız verisinin ve deneyde kullanılan mürekkebin yüzdelik oranını verildiği deney tasarımı

Deney Numarası	**Basım Yöntemi**	**Hız (mm/dk)**	**% Gümüş İçeriği**
Deney 1	Damla	150	2,0
Deney 2	Damla	300	2,0
Deney 3	Damla	150	2,5
Deney 4	Damla	300	2,5
Deney 5	Serme	150	2,0
Deney 6	Serme	300	2,0
Deney 7	Serme	150	2,5
Deney 8	Serme	300	2,5

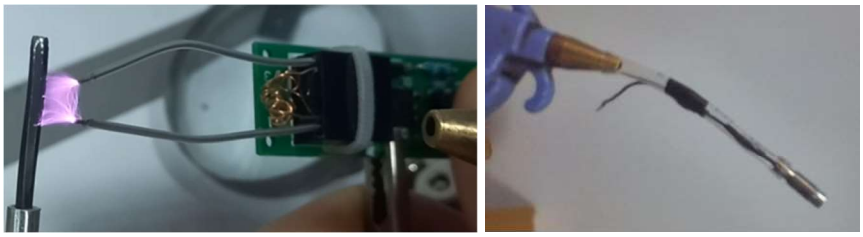
İlk Direnç ölçümleri 0,1 ohm hassasiyete sahip Mastech MS8268 dijital multimetre cihazıyla yapılmıştır. Katman sayısının artmasıyla cihaz yeterli hassasiyette okuma yapamamasından dolayı hassas direnç ölçümleri Tektronix DMM 4050 6-1/2 Digit Precision multimetre cihazı ile tekrardan yapılmıştır (Şekil 3.58).



Şekil 3.58. Direnç ölçümlerinin yapıldığı multimetre cihazı

Sırasıyla 1'den 20 katmana kadar basılan elektrotların g-kodu EK 4'te paylaşılmıştır. Diğer numune üretimleri benzer kod mantığında yapılmıştır.

İlk plazma denemeleri için çalışma voltaj 3-5 V olan 3 Amper değerinde çalışabilen voltajı 800 volta çıkaran 20 kHz değerinde bir voltaj dönüştürücü kullanılmıştır. İçi boş barel katotlanıp barelin ortasında belirli bir mesafede anot bırakılmış ve hortumun içerisinde hava geçirilmiştir (Şekil 3.59). Anot ve katot arasında plazmaya dönüşen hava alttaş üzerine uygulanmıştır. Alttaş olarak 75 µm kalınlığında DTF-PET transfer filmi kullanılmıştır. Elde edilen plazmanın etkisini tespit edebilmek için 1mm uzaklıktan PET alttaşa plazma uygulaması yapılmıştır. Deney plazma uygulanmamış, 10 sn plazma uygulanmış ve 20 sn plazma uygulanmış alttaş yüzeyi olmak üzere bir kontrol grubu ve 2 deneyi kapsar. Bu yüzeylerin üzerine 0,5ml'lik şırınga ile eşit miktarda distile su bırakılarak temas açısı ölçümü gerçekleştirilmiştir. Su damlalarının arkasından beyaz flaş ışık tutulmuştur. Temas açısı ölçümleri virgülden sonra iki basamağa kadar hassas açı ölçüsü gösterebilen Paint.net programı ile damla fotrağrafları üzerinden yapılmıştır.



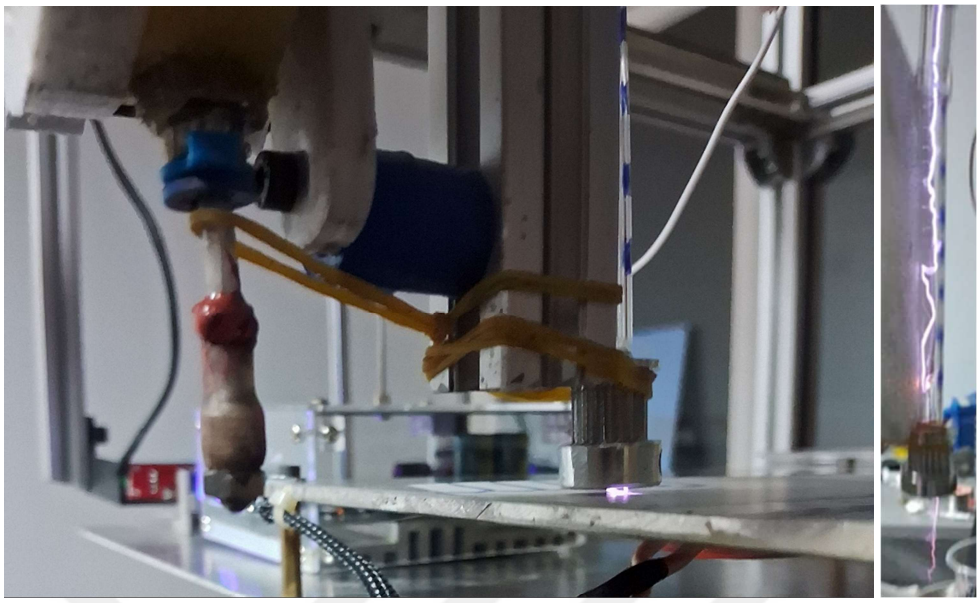
Şekil 3.59. Plazma ateşleyicisinden oluşturulan kaymalı plazma ark deşarjı

10 Volt giriş voltajını 5 kV'a çıkaran hava çekirdekli transformatör yapılmıştır. İlk katman sargısına 4 kat bobin sarılmıştır. Şekil 3.60'ta oluşturulan transformatörün görüntüsü verilmiştir. Ucundaki sivri deşarj yapılacak kısmı cıvatadan zımparalanarak elde edilmiştir.



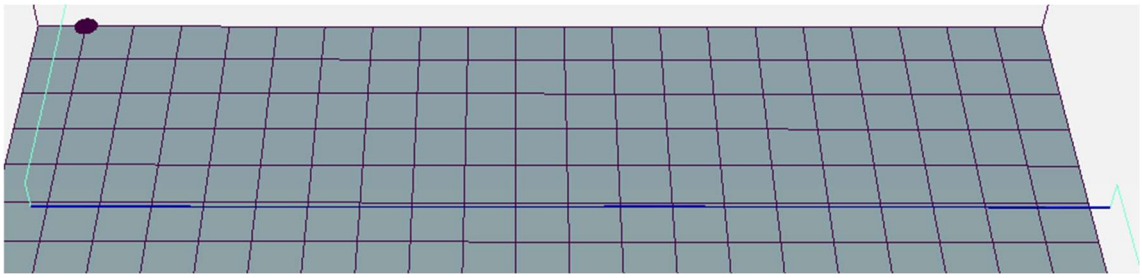
Şekil 3.60. Hava çekirdekli transformatör ile korona deşarjı oluşturma çalışması

Yapılan ön çalışmalarda ısınma problemleri olduğu için 25 W değerinde korona desarj yapabilen bir voltaj yükselitici satın alınmıştır. Cihaz belirli frekanslarda kondasatörlerde depoladığı yüksek voltajı boşaltarak çalışmaktadır. Güç ve frekans ayarı yapılabilmektedir. Alınan cihazın baskıda kullanılabilmesi amacıyla bir adet üfleme nozulu yapılmıştır. Bir cam pipete argon gazının pnomatik hortumu bağlanarak ortasından tek damar bir kablo geçirilmiştir. Telin ortada kalabilmesi için aralayıcı parçalar tel etrafına yapıştırılmıştır. Voltaj sıçramasının oluşması için tüp ucuna bir adet alüminyum kasnak bağlanmıştır. Üretilen yapı ve çalıştığı sırada iyonlaşan argonun görüldüğü görüntüler Şekil 3.61'de verilmiştir.



Şekil 3.61. Damla üretici ve aynı profil üzerine sabitlenmiş soğuk plazma üreticinin sistemde konumlandırması

Plazmanın yüzeyi deforme etmesi ve kirlilikleri uzaklaştırma gibi özelliklerinden dolayı katmanlar arasına plazma uygulanarak elektrotların dönme yarı çapı gibi mukavemet değerlerinde artış olması beklenmektedir. Yüzey deformasyonu ve pürüzlülüğü artması sonucunda üzerine gelecek olan katmanın aralara nüfuz ederek daha iyi bir birleşim sağlayacağı ön görülmektedir. Bu iyileşmeyi izleyebilmek için Çizelge 3.4'de verilen deneylerin yapılmasına karar verilmiştir. G-kodun Repetier-host'taki görüntüsü Şekil 3.62'de verilmiştir Parametreler önceki deney bulguları tartışılarak katman sayısı 5, ilerleme hızı 300 mm/dk, gümüş içeriği %2,5 olarak belirlenmiştir. Plazma uygulması güçlü ve zayıf olacak şekilde iki tip olarak belirlenmiştir. Soğuk plazma uygulaması ilk katman basıldıktan sonra üzerine belirli hızda ve güçte soğuk plazma uygulanması ve bu prosesin her katmanda tekrarlanması olayına dayanır. Plazma 3 deneyi 25 W plazma gücü, gaz debisi 9 l/dk ve alttaştan uzaklık 1 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Plazma 2 deneyinde ise 3,5 W plazma gücü, gaz debisi 9 l/dk ve alttaştan uzaklık 2 mm olacak şekilde belirlenmiştir. Elektrot uzunlukları A4 ve cihaz boyutlarına göre 200 mm olarak belirlenmiştir.

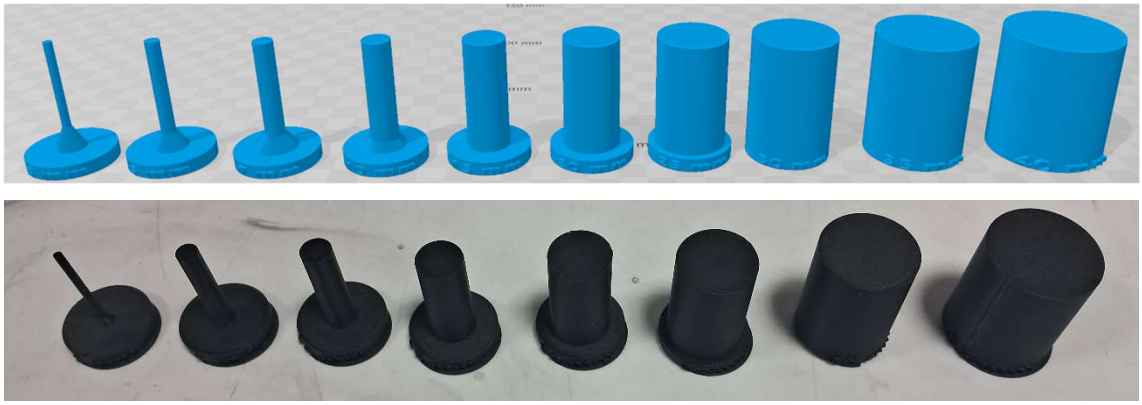


Şekil 3.62. 200 mm uzunluğundaki elektrotun g-kod oluşturucu programdaki görüntüsü

Çizelge 3.4. Deney numaralarının, basım yönteminin, deneye ait hız verisinin ve deneyde kullanılan mürekkebin yüzdelik oranını verildiği deney tasarımı tablosu

Deney Numarası	Basım Yöntemi	Basım Hızı (mm/dk)	(%) Gümüş İçeriği	Katman Sayısı	Plazma İlerleme Hızı (mm/sn)	Plazma Gücü (Watt)	Argon Gaz Debisi (l/dk)	Alttaştan Uzaklık (mm)
Plazma 1	Serme	300	2,5	5	-	-	-	-
Plazma 2	Serme	300	2,5	5	1	3,5	9	2
Plazma 3	Serme	300	2,5	5	0,5	25	9	1

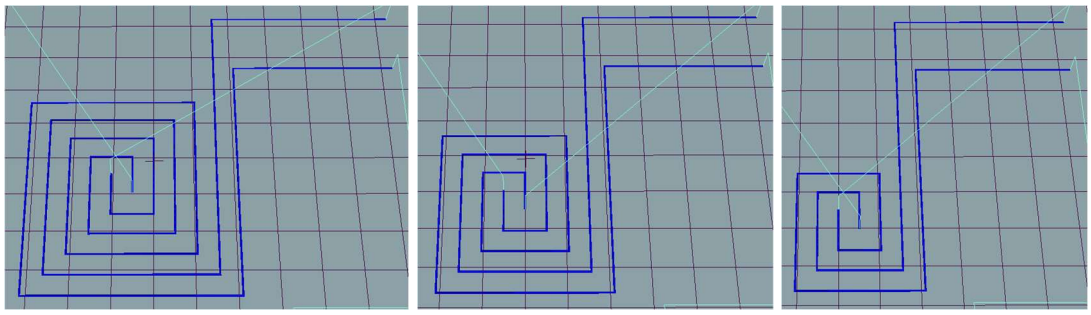
Şekil 3.63'de elektrotların eğilme yarı çaplarını ve bu yarı çaplarda oluşan direnç değişimlerini tespit edebilmek için 3-5-7-10-15-20-25-30-35-40 mm çaplara sahip silindir numuneler basılmıştır. Deney kapsamında bu numunelerin etrafına sarılacak elektrotların direnç ölçümleri gerçekleştirilerek elektrik iletkenliğinde kopma olup olmadığına bakılacaktır.



Şekil 3.63. Basılı elektrotun bükülme çapının tespiti için tasarlanmış ve üretilmiş çap düzenekleri

Basım parametrelerinin etkisini anlayabilmek için üretilen elektrotların incelenmesi gerekir. 3B optik yüzey profilometresi kullanılarak yüzey pürüzlüğü ve katman kalınlıkları tespit edilecektir. Optik profilometre ve mikroskop görüntüleriyle plazmanın maruziyeti sonucunda oluşan yüzey tipi ve kenar geometrileri doğrusallığına bakılacaktır. Ayrıca mürekkep için temas açısı ve yüzey gerilimi ölçümü yapılacaktır.

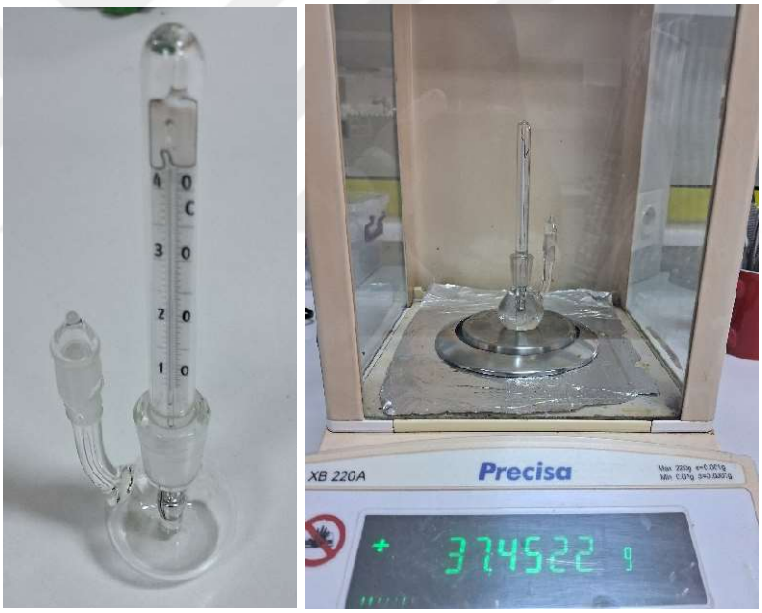
Çalışmalar sonucunda elde edilen optimal parametreler ile kapasitör devresi basımı yapılacaktır. Bu devre labirente benzeyen iç içe sarmal desenlerden oluşur. Şekil 3.64'te üretilmesi planlanan kapasitör devreleri verilmiştir. En soldaki desen L4, ortadaki desen L3 ve sağdaki desen L2 olarak isimlendirilmiştir. Plazma uygulandığında değerlerin gelişeceği hipotezi sebebiyle L2 deseni LP2 olarak adlandırılarak katmanlar arasına plazma uygulanarak tekrarlanacaktır. Elde edilen desenlerin direnç değerleri ve kapasitans değerleri ölçülecektir. Daha sonra 15 mm iç çaplı borulara sarılarak tekrar kapasitans değerlerinde ölçüm yapılacaktır. Esnek elektrot olmasının avantajıyla arasına yalıtım filmi koymadan ve çift metal plaka kullanmadan sadece iki ayrı devre yoluyla kapasitör oluşturma avantajına sahiptir. Deneyler yapılan çalışmalar ışığında 300 mm/dk, 5 katmanlı %2,5 gümüş içeren mürekkep ile serme yöntemi kullanılarak üretilecektir. Plazmalı LP2 deneyi ise katmanlar arasına 3,5 W gücünde ve 1 mm/sn hızla soğuk plazma uygulanarak gerçekleştirilecektir.



Şekil 3.64. Kapasitör devreleri soldan sırasıyla; L4, L3 ve L2 baskılı devresi g-kod deseni

3.10. Mürekkebin Özelliklerinin Belirlenmesi

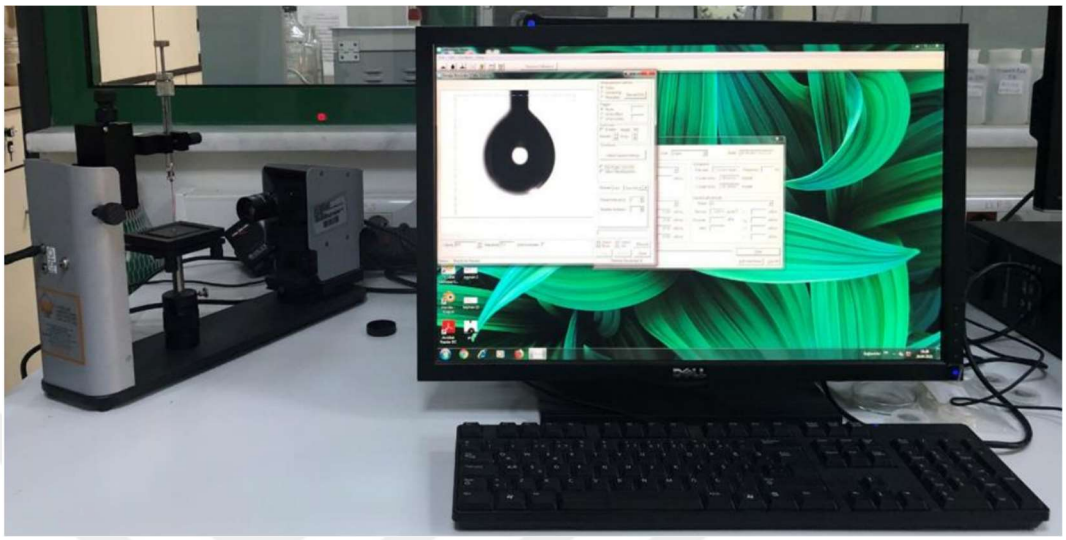
Üretilen gümüş mürekkeplerin yoğunluğu 10ml kapasiteli bir piknometre deneyi ile yapılacaktır. Şekil 3.65'te kullanılan piknometre verilmiştir. Piknometrenin üzerinde içerisine konulan sıvının sıcaklığını ölçebilen bir termometre vardır. Bu sayede ultra saf su ile yapılan ilk deney ile hacim tespiti yapılır. Bundan sonraki aşamalarda değişik derişimlerdeki gümüş mürekkepler ile deney tekrar edilerek bulunan hacim kullanılarak yoğunluk tespit edilir. Hacim 9,8520 cm^3 olarak tespit edilmiştir. Piknometrenin darası 27,5933 g olarak ölçülmüştür. Bu veriler eşliğinde %5 gümüş içeren mürekkebin yoğunluğu 1,0227 g/cm^3, %2,5 gümüş içeren mürekkebin yoğunluğu 1,0038 g/cm^3 ve %2 gümüş içeren mürekkebin yoğunluğu 1,006 g/cm^3 olarak tespit edilmiştir. Yoğunluk bilgisi yüzey gerilimi hesapları içinde kullanılacaktır.



Şekil 3.65. 10ml'lik Piknometre ile gümüş mürekkeplerin yoğunluğunun tespit edilmesi

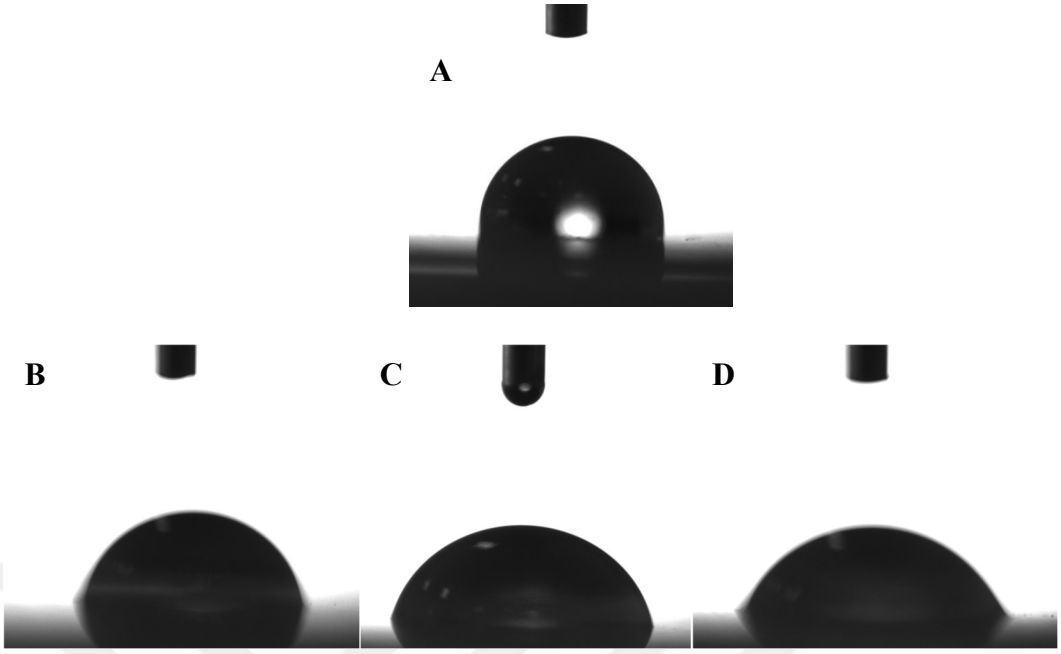
Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçümleri Attention KSV Instrument'ın yüzey gerilim cihazı ve aynı ada sahip üreticinin ticari programı aracılığıyla ölçülmüştür (Şekil 3.66). %5, %2,5 ve %2 gümüş içeren mürekkeplerin yüzey gerilimleri bu cihazla ölçülmüştür. Mürekkeplerin 3 tekrar olacak şekilde yüzey gerilimlerinin ölçülmesi sonucunda ortalama olarak %5 gümüş içeren mürekkebin yüzey gerilimi 56,69 mN/m, %2,5 gümüş

içeren mürekkep 57,61 mN/m ve %2 gümüş içeren mürekkep ise 58,26 mN/m olarak tespit edilmiştir.



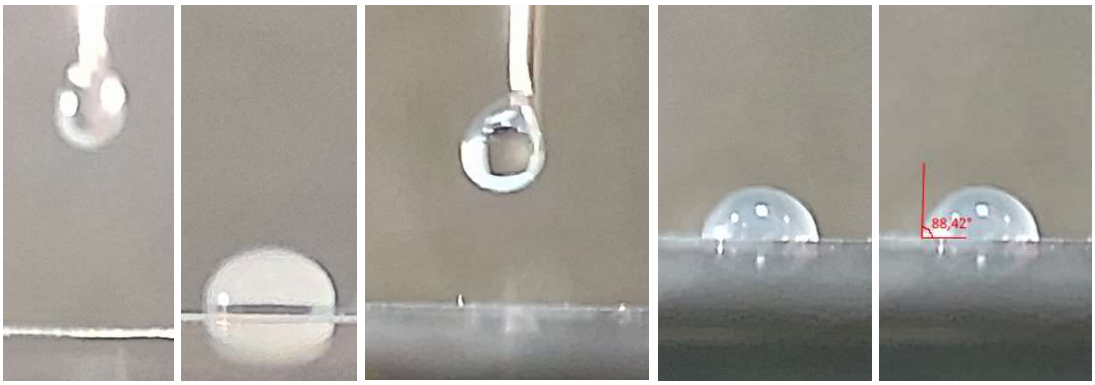
Şekil 3.66. Yüzey gerilimi ve temas açısı ölçüm cihazı

DTF PET film üzerine sırasıyla distile su, %2 gümüş içeriğine sahip mürekkep, %2,5 gümüş içeriğine sahip mürekkep ve %5 gümüş içeren mürekkep damlası cihaz yardımıyla bırakılmış ve cihazın yazılımıyla temas ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yazılımdan alınan temas açısı ölçüm fotoğrafları Şekil 3.67'de verilmiştir. Ölçümler sonucunda distile su 90,35°, %2 gümüş içeren mürekkep 86,83°, %2,5 gümüş içeren mürekkep 77,83° ve %5 gümüş içeren mürekkep 68,12° yüzeyle temas açısı yaptığı ölçülmüştür. Şekil 3.66'da PET alttaş üzerine bırakılan ve ölçümleri gerçekleştirilen damların görselleri verilmiştir. Ekstra yapılacak olan ölçümler profesyonel cihazdaki ölçümler tekrar edilip doğrulandıkları takdirde yapılacaktır.



Şekil 3.67. DTF PET film üzerindeki damla temas açısı ölçümleri **A)** distile su 90,35° **B)** %2 gümüş içeren mürekkep 86,83° **C)** %2,5 gümüş içeren mürekkep 77,83° **D)** %5 gümüş içeren mürekkep 68,12°

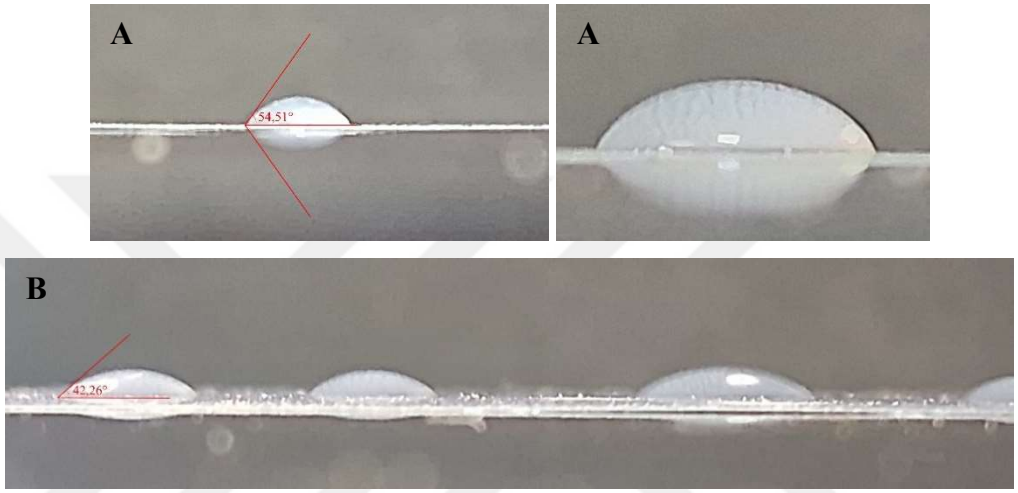
Hızlı ölçüm alınabilmesi için profesyonel ortamda gerçekleştirilen deneyler telefon kamerası ve flash ışık yardımıyla distile su ile tekrar edilmiştir. Doğrulama sonucunda %2,13 hata payı ile 88,42° temas açısı gözlemlenmiştir. Şekil 3.68'de tekrarlanan deneyin görseli verilmiştir.



Şekil 3.68. DTF PET film üzerindeki damla temas açısı ölçümü doğrulanması

Plazmanın etkisini görebilmek adına plazma uygulanmış yüzeylerde deney tekrarlanmıştır. DTF-PET film alttaşlara 3,5 W ve 25 W plazma uygulanmıştır. Ve bu

alttaşlara temas açısı ölçümleri ile su damlatılmıştır. 3,5 W plazma uygulanmış deney sonucunda temas açısı 54,51° olarak gözlemlenmiştir. 25 W plazma uygulanmış alttaşta ise temas açısı 42,26° olarak bulunmuştur. Bu durum sisteme entegre edilen soğuk plazma sisteminin etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 3.69'da 3,5 W 1 mm/sn hızla ve 25 W 1 mm/sn hızla soğuk plazma uygulanmış yüzeylere damlatılmış damlaların temas açıları verilmiştir.



Şekil 3.69. DTF PET film üzerindeki damla temas açısı ölçümü **A)** 3,5 W plazma uygulanmış yüzey, **B)** 25 W soğuk plazma uygulanmış yüzey

Soğuk plazma deneylerinin W değerleri Wellhise PM-003 wattmetre güç ölçüm cihazı ile doğrulanmıştır. Kullanılan güç ölçüm cihazı Şekil 3.70'te verilmiştir. %2 ölçüm hassasiyetine sahiptir.



Şekil 3.70. Güç ölçüm cihazı

4. BULGULAR TARTIŞMA

4.1. Mikro Pompa Çalışmaları

Reçineli yazıcı ile mikro pompa üretiminde üretim sorunlarıyla karşılaşılmıştır. Kanaların iç bölgelerde oluşu ve yazıcı toleranslarına çok yakın olmasından dolayı ve yüksek parametre optimizasyonu gerektirdiğinden kanalların dolu çıkmasıyla sonuçlanmıştır. İkiye bölünen pompa tasarımlarında ise açılı üretim ve kürleme dolayısıyla hortum bağlantı noktalarında bükülmeler meydana gelmektedir. Pompayı kanal hizasından ikiye bölme durumunda da parça sayısının artması ve montajlanacak parça sayısını artırarak hatanın kaynaklandığı bölgenin tespitini de zorlaştırmaktadır.

Eklemeli imalatlar ile üretilen mikro pompalar kısa süreli damla atımını sağlasa da uzun sürede sıvıyı emme ve çek valf görevini yerine getiremeyecek hassaslıkta üretime izin vermemesi eklemeli imalattan vaz geçilmesine yol açmıştır. Parametrik çalışmaların ve denemeleri sonucunda da olumlu ve anlamlı sonuç veren bir çıktı olmamıştır. Belirli bir ölçüm değişiminde mantıklı cevap alınsa da hassaslık isteyen ara ölçülerde pompalar sürekli ya tıkalı konumda olmakta ya da açık konumda kalmaktaydı. Aynı değerlerde basılan pompalar farklı davranışlar gösterebilmekteydi. Ayrıca bazı iyi kabul edilen ölçülerde haznenin durduğu yükseklik ciddi öneme sahip olmaktaydı; kapalı bir pompa haznenin yükseltilmesiyle açık hale gelebilmekteydi. Bu durumda haznenin damla atımıyla eş olarak konum değiştirmesi gereken ayrı bir mekanizmanın yapılması gerekliliğini düşündürmüştür. Bu sebeple piezolu peristaltik pompa yapısından vazgeçilmiştir. Çizelge 4.1'de kendinden çek valfi olacak mikro pompanın parametrik tolerans çalışmaları sonuçları verilmiştir. Bu çalışamaya bakıldığında benzer parametrelerde farklı sonuçlar alındığı görülebilir. Örneğin GA-06-1_1 numunenin kademe ölçüleri ile GAv4-06-1_1 numunenin kademe ölçüleri eşittir sadece hortum bağlantı noktasında kalınlaşma yapılmıştır fakat bu numunelerden biri sürekli açıkken diğeri sürekli kapalı bir yapı sergilemiştir. GAv2 numunelerinde ise iç contanın konulduğu kademenin kalınlığı 1mm'den 0,5mm düşürülmüştür. Bu kademenin düşürülmesi olumsuz etki oluşturarak sürekli açık sistemler elde edilmesine yol açmıştır. Bu sebeple ufak contanın dayandığı ikinci kademenin et kalınlığı GAv4 tasarımda tekrar

1mm e çıkarılmıştır. GAv4y tasarımda ise yine hortumların bağlandığı kısımla ilgili değişikliğe gidilmiştir. Benzer çalışma dairesel hareketleri daha iyi yapabildiği düşünülen delta tipi yazıcıyla da tekrarlanmıştır. Sonuçlar kartezyen yazıcıyla benzer çıkmıştır.

Çizelge 4.1. Eklemeli imalat ile üretilen pompa düzeneklerindeki o ring kanalı derinlik çalışması

İsimlendirme	Kademe 1 ölçüsü (mm)	Kademe 2 ölçüsü (mm)	Sonuç
GA-04-1_2	1,2	0,4	Kapalı
GA-04-1_3	1,3	0,4	Kapalı
GA-05-1_0	1	0,5	Açık
GA-05-1_1	1,1	0,5	Açık
GA-05-1_2	1,2	0,5	Kapalı
GA-05-1_3	1,3	0,5	Kapalı
GA-06-1_0	1	0,6	Açık
GA-06-1_1	1,1	0,6	Kapalı
GA-065-1_1	1,1	0,65	Açık
GA-07-1_1	1,1	0,7	Kapalı
GAv2-05-1_05	1,05	0,5	Açık
GAv2-05-1_1	1,1	0,5	Açık
GAv2-05-1_2	1,2	0,5	Açık
GAv2-05-1_25	1,25	0,5	Açık
GAv2-06-1_1	1,1	0,6	Açık
GAv4-06-1_0	1	0,6	Açık
GAv4-06-1_05	1,05	0,6	Kapalı
GAv4-06-1_1	1,1	0,6	Açık
GAv4-063-1_1	1,1	0,63	Kapalı
GAv4y-06-1_1	1,1	0,6	Açık

Çek valf tasarımından vaz geçildiği ve direkt kafadan damlacık üretildiği sistemlerde iki tip problemle karşılaşılmıştır. Birinci problem parçaların sıvı kaçırması PLA'nın sıvıyı emerek yüzeyden kusması da bu probleme dahildir. İkinci problem ise sistemin hava alarak damla üretiminin kesintiye uğramasına yol açmaktadır. Damla atımından sonra içeri kaçan hava birikerek oluşan basınç sebebiyle piezoyu çatlatabilmektedir. Bu sistemlerde çek valf yapısı çalışmadığından rezervuarın belirli bir konumda havada tutulmasıyla çalışmaktaydı. Bu durumda önceki kendinden çek valfli pompa çalışmasında karşılaşılan rezervuar yüksekliği çek valfin çalıştığını göstermediğinin iç kayıplar sebebiyle sistemin dengede kaldığı olgusunu gündeme getirmiştir.

Satın alınan ve dişlilerle devri hassaslaştırılan Peristaltik pompanın printer parçalarının toleransları sebebiyle hortumu tam sıkıştıramayarak stabil akışı tam olarak sağlayamamıştır. Fakat PLA dan yapılan bu parça motor ısındığı ve tekrarlı burulma kuvvetleri sebebiyle belirli süre sonra kırıldığından parça kalıp çeliğinden tekrar imal edilmiştir. Fakat yeni sağlam parçada da sabit hızda çalıştırılan pompadan çıkan damlalar sayılmıştır. Örneğin hortum ucundan motor hızına bağlı olarak 10 sn'de bir damla düşmekteyken 6. damla 15 sn sonra düşmektedir. Daha sonra 10. damla 12 sn sonra düşmekte ve bu gecikmeli damla düşüşü her 6 damlada bir olmamaktadır. Tespit edilemeyen bir yapıda damlalar oluştuğu için debide stabilite sorunu çözülememiştir. Daha sonra step motor kullanılarak dişliler ile 10 katlık redüktör ile yavaşlatılan ayrı bir tasarım yapılmıştır. Fakat benzer sorun bu pompada da gerçekleşmiştir. Bu sebeple şırınga sistemine geçilmeye karar verilmiştir.

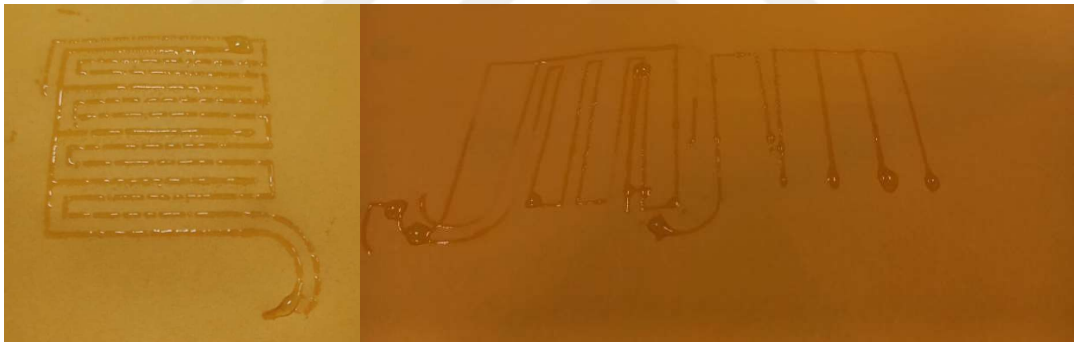
Şırınganın ucuna bağlanan alternatif bir dıştan vuruşlu damla üreteci sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem kompakt yapısıyla avantajlara sahiptir. Esnek hortumun piezo ile dıştan sıkıştırılması mantığına dayanan tasarımda piezonun dıştan hortumu sıkıştırma işlemi sırasında fazla bükülerek çatlamasına sebep olmuştur. Diğer denemelerde de silikon hortumu yeterli miktarda ezemediği için sağlıklı bir damla oluşturma işlemi yapamadığı görülmüştür. Bu sistem için piezo yapısının ve voltaj ayarlarının değiştirilmesi ve daha güçlü kalın bir piezo kullanılmasıyla sağlıklı sonuç alınabilir. Fakat mevcut malzemelerle ilerlenmek istendiği için bu Şekil 3.26'daki tasarımdan vaz geçilmiştir.

Kestamitten üretilen mikro pompa düzeneğinde su ile denemeler yapılmıştır. Şekil 4.1'de su ile yapılan denemelere ait elle kâğıdın ittirilmesiyle oluşturulmuş damlacık sürekliliği ait görsel verilmiştir.



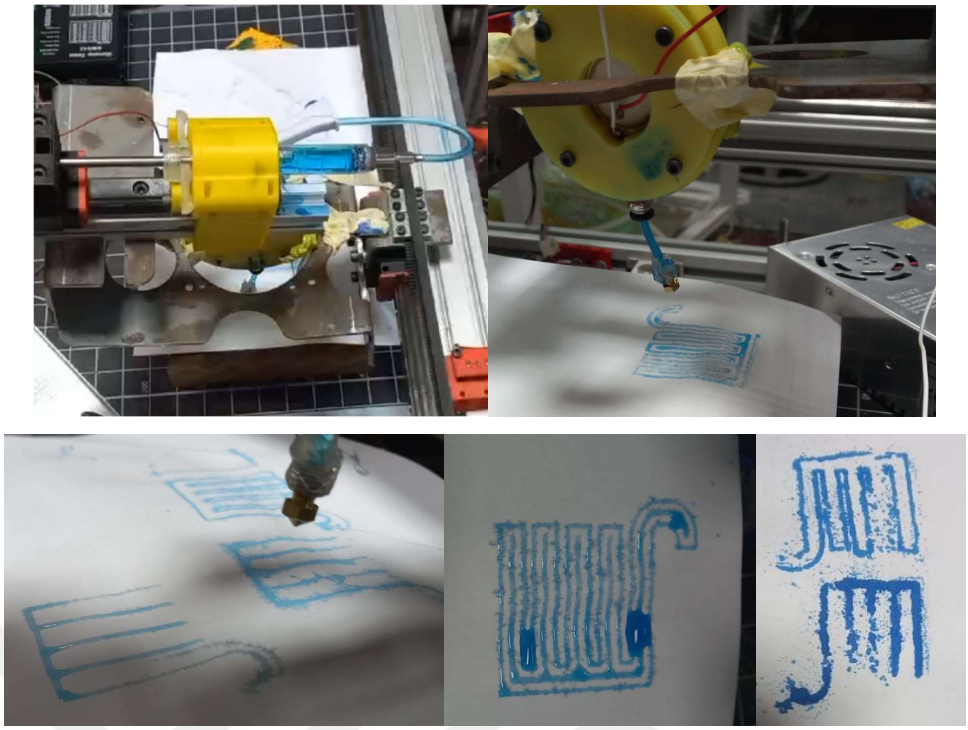
Şekil 4.1. Tek piezo ile atılan damlaların görseli

Daha sonra yeni sistem XYZ koordinatlarında hareket edebilen sisteme montelenmiştir. Koordinat sistemine bağlanmış sistemde su ile tekrar denemeler yapılmıştır. Şekil 4.2'de yüklenen desenin su ile damlatılarak elde edilmiş hali verilmiştir.



Şekil 4.2. Su ile baskı denemeleri

Şekil 4.3'te şırınga dozaj pompalı tek piezolu sistemde mürekkep karışım denemelerinden görseller verilmiştir. Su içerisindeki mürekkep yüzdesi artıkça atılan damlalar yüzeye vurduklarında daha geniş alan kaplamaya başlamıştır. Ve %50'yi geçen mürekkep oranlarında stabil damla oluşturulamamıştır. %15 mürekkep oranına sahip su-mürekkep karışımlarında belirgin bir desen basımı yapılabilmiştir. Bu denemelerden yüzey kontak açıları ve viskoziteler suya yakın olması gerektiği çıkarımı yapılmıştır.



Şekil 4.3. Farklı derişimlerde mürekkep-su karışımı ile yapılan basım denemeleri

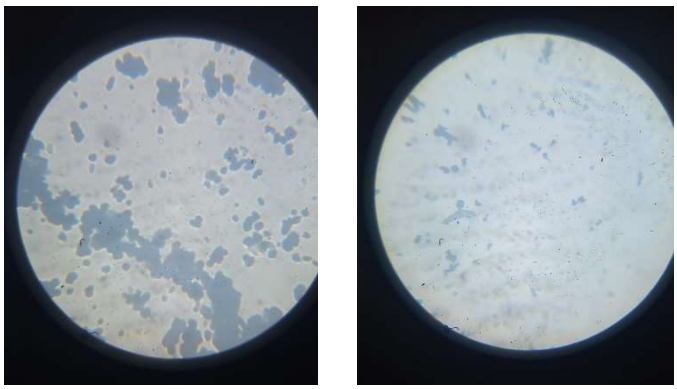
Baskıdaki sıçratma, vuruş sırasında münferit damla püskürtmeme, sıvının nozula yapılarak büyümesi ve köpürmesi, nozul ağzından damla atımı sonrası içeriye hava çekmesi vb bazı düzensizlikler ve damlanın yavaş çekimde incelenmesi ve inceleme sonucunda değiştirilen parametreler optime edilmeye çalışan damla sonuç vermemiştir. Ve bazı noktalarda küçük damla atma veya hiç damla atmama gibi durumlarla karşılaşılmıştır. Bu sebeple çift piezolu damla üreteç sistemine geçilmiştir. Önceki tecrübelerden yola çıkılarak şırınga ucunun yukarı bakacak şekilde gelmesine karar verilmiştir. Bu sayede şırınga ucunun çıkarılmasıyla daha kolay hava alma işlemi yapılabilmektedir. Fakat bu işlemde şırınga ucunda hava birikmesine yol açmaktaydı. Bu sebeple hava alma işleminin zor ve vakit alıcı yapısından dolayı şırınga contasının delinerek hava alma kanalı açılmıştır. Bu kanal sayesinde kısa sürede hazne mürekkeple doldurulabilir hale gelmiştir. Bu değişimden sonra şırınga dikey bir şekilde konumlandırılmıştır.

4.2. Bilyalı Öğütme Çalışmaları

Bilyalı öğütme sistemine geçilmeden önce yapılan 5 mikronluk tozun alkol, PVP ve su ile belirli sıcaklıklarda da yapıldığı çalışmalar sonucunda metal tozlarının askıda kalmaması sebebiyle 5 mikronluk demir tozunun özgül ağırlığınında yüksek olmasından dolayı sıvı içerisinde askıda kalamadığı yorumu yapılmıştır. Literatüre bakıldığında yapılan çalışmalarda en fazla 1-2 mikronluk tozlardan zeta potansiyeli yakalanabilmiştir (Ahmed vd., 2024; Aliofkhazraei, t.y.; Q. Huang vd., 2014; Jafarpour vd., 2022). Bu sebeple bilyalı öğütme sistemi kurularak 5 mikronluk tozdan nano toz elde edilmek istenmiştir.

Mikser ile karıştırılan 5 mikronluk tozlar zeta potansiyeline kavuşamamıştır. 15-30 dk içinde çökme meydana gelmiştir. Literatüre bakıldığında bir haftaları hatta 3-4 ayı bulan askıda kalma sürelerinden bahsedilmiştir (S. Chen vd., 2017; Chien Dang vd., 2015; Jeong vd., 2010; Oliveira vd., 2022).

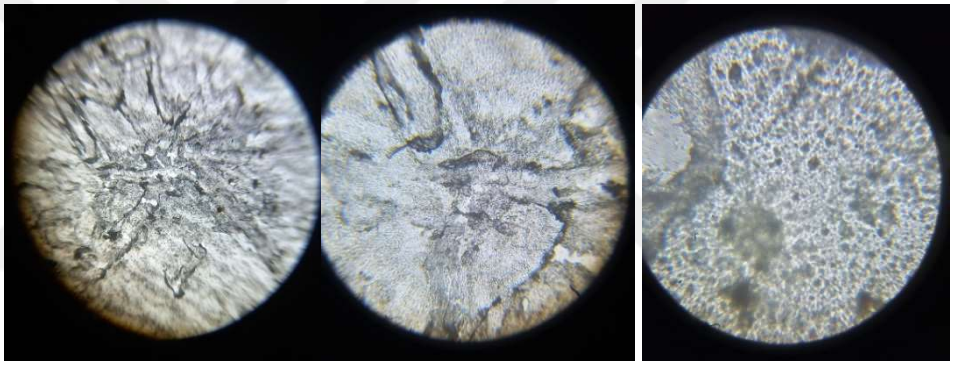
5 mikrontluk tozdan nano toz elde etmek 48 saatlik 110 rpmle tozların döndürülmesi ardından düzenek durdurularak mikroskop ile ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.4'te cam yüzey üzerinde 640x büyütme ile solda öğütülmemiş ortalama 5 µm demir tozu dağılımına sahip mürekkep damlası, sağda ise öğütmeden sonra metal tozlarının görünümü verilmiştir.



Şekil 4.4. Solda bilyalı öğütme öncesi tozların görnümü; sağda öğütüldükten sonrakı 640x büyütülmüş karışımın görüntüsü

Karışım maynetik balık ile manyetik karıştırıcıda karıştırılmak istenmiş fakat metal tozlarının manyetik özelliği sebebiyle kavanoz tabanına metal tozları yapışacağı için mekanik karıştırıcı kullanılmaya karar verilmiştir. Materyal metod da anlatıldığı oranda karışım mürekkep değerlerince elde edilen tozla kavanoz boşaltılmadan hazırlanmıştır. Burada kurutma işlemlerinin yapılmamasının nedeni nano tozun ortama karışması ve sağlık sorunları ortaya çıkarmasının önüne geçilmek istenmiştir.

Mürekkep şırınga haznesine doldurularak farklı zeminler üzerine damla atılmıştır. Bunlar parlak fotoğraf kağıdı, DTF-PET film ve cam lameldir. Direncin ölçülebildiği yüzey DTF-PET film olmuşturu ölçüm alınan yerden yapılmış mikroskop görüntüleri Şekil 4.5'de verilmiştir.



Şekil 4.5. 64x, 160x ve 640x yakınlaştırma ile DTF PET film üzerindeki mürekkebin görüntüsü

Şekil 4.6'da 75 µm kalınlığındaki DTF PET filmin doğal mikroskop görüntüsü verilmiştir



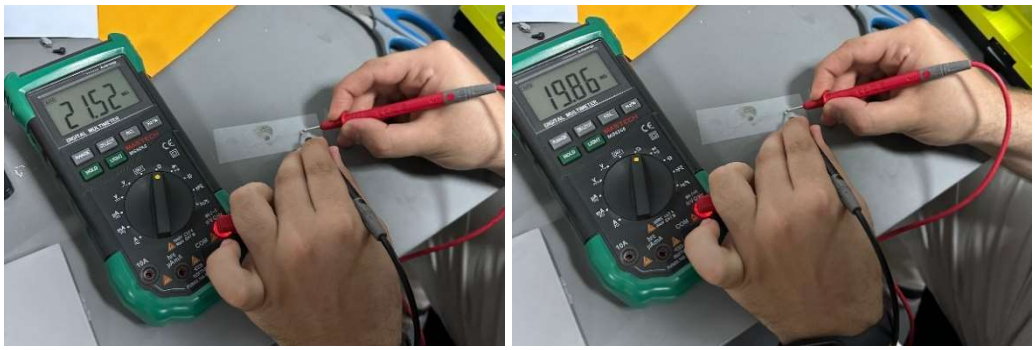
Şekil 4.6. DTF PET filmin yüzeyi

Şekil 4.7'de parlak fotoğraf kağıdı üzerine atılmış damlaların oluşturuduğu kahve lekesi desenlerinin mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.7. Parlak fotoğraf kağıdı yüzeyinde farklı ölçeklerde kahve lekesi deseni

Şekil 4.8'de DTF-PET film üzerinde kurumuş damlalar üzerinden yapılan direnç ölçümlerinde 20 MΩ'luk direnç ölçümü görülmüşütür. Tek katman damla atılıp kurutulmuştur. Kurutma düzeneği için 80°C de ayarlanmış printer tablası kullanılmıştır. Damlanın atıldığı gün 200 kΩ değer okunmuştur. PET alttaş üzerinde 2 gün bekleyen mürekkep iki günün sonunda 20 MΩ olarak ölçülmüştür. 3. gün sonunda bu iletkenlik değeri kaybolmuştur.



Şekil 4.8. DTF PET film üzerine damlatılmış ve kurumuş damla üzerinde yaklaşık 2 mm mesafede alınan 20 MΩ direnç değeri

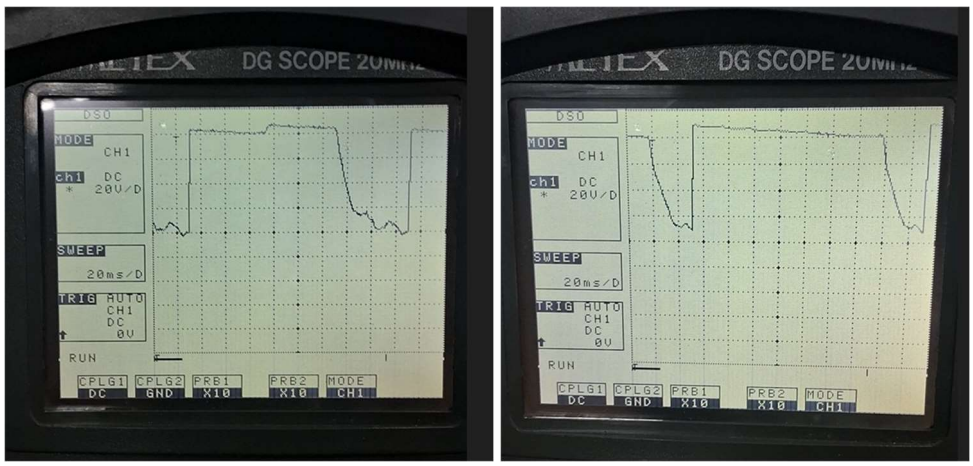
Çöken mürekkebin 4 gün sonra 4 saat boyunca 1600 rpm ile karıştırılması sonucu mürekkepte paslanma görünmüştür. Parlak fotoğraf kağıdına basım sonrası mikroskopta taneler yerine sadece renk değişimi gözlemlenmiştir. Şekil 4.9'da oluşan renk değişimleri verilmiştir. 3 sefer üst üste tekrarlı basım ve kurutma işlemi yapılmasına rağmen metal taneciklere rastlanamamıştır.



Şekil 4.9. Oksitlenmiş demir parçacıklı mürekkebin parlak fotoğraf kağıdı üzerine tekrarlı basılmış görseli

4.3. Dalga Formu Çıktıları

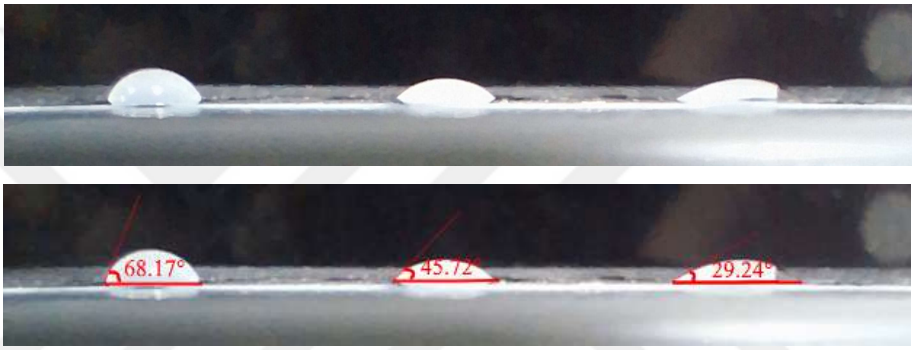
Materyal metot kısmında verilen kare dalga sonucunda piezodan alınan sinyal değerleri osiloskop aracılığıyla ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda verilen sinyalin net bir kare dalga görünümü olmadığı ve bir miktar gecikme olduğu görülmüştür. Hazneye parçacıksız mürekkep doldurulduğunda ise gecikmenin bir miktar daha artığı ve voltaj değerinin sıfırlanmadığı görülmüştür. 82 Volta ayarlanmış değerinde 82 Volttan 80 volta doğru düşüş izlenmiştir. Verilen sinyal değerinin Şekil 4.10'da mürekkep dolu mikro pompaların ölçüldüğü dalga formunda olduğu gibi kabul edilebilir.



Şekil 4.10. Mürekkep yokken piezoda oluşan dalga formu ve sağda mürekkep doluyken oluşan dalga formu

4.4. Soğuk Plazmanın Alttaşa Etkisi

Plazma ateşleyicinden oluşturulan ve havanın yönlendirmesiyle 1 mm uzaklıktan verilen plazma maruziyeti sonucunda PET filme üzerine su damlatılmıştır. Kontak açıları değişimi görüntülenmesi için damlalar dikey ve yataydan fotoğraflanmışlardır. Kontak açılarındaki değişim Şekil 4.11'de verilmiştir. Soldaki damla plazmaya maruz bırakılmamıştır. Sırasıyla 10 sn ve 20 sn plazma maruziyeti mevcuttur. Herhangi bir işlem yapılmamış DTF PET yüzey üzerindeki %5 gümüş içeren damlanın temas açısı 68,17° olarak ölçülmüştür. 10 sn plazma maruziyeti sonucunda 45,72° temas açısı ölçülmüştür. 20 sn maruziyet sonucunda ise temas açısı 29,24° olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.11. Plazma uygulanmış yüzeye damlatılmış su görüntüleri ve temas açıları

4.5. Parçacıksız Mürekkebin Performansı

%2 oranında gümüş içeren su bazlı mürekkebin eş zamanlı olarak kurutma ve sinterleme işleminin bir arada yapıldığı damlanın 135°C sıcaklığa maruz kalması sonucunda fiziksel değişimleri Şekil 4.12'de verilmiştir. 80°C de kurutma yapılıp daha sonra 135°C sinterleme yapılan mürekkeplerde dirençlerin yüksek olduğu bazı durumlarda ise iletkenliğin olmadığı görülmüştür. Bu sebeple sinterleme ve kurutma işlemi tek prosese düşürülmüştür. Bu durum aynı zamanda zamandan tasarruf edilmesine de fayda sağlamıştır.



Şekil 4.12. Parçacıksız berrak şefaf %2 derişimli gümüş mürekkebin eş zamanlı sinterleme işleminde kurumadan sinterlemeye kadar aldığı formlar

Yapılan parçacıksız su bazlı gümüş mürekkep %5 gümüş içeriğine sahiptir. Fakat sinterleme tablasına alınan damla sinterleme esnasında köpürmüş ve istenmeyen bir kabuk oluşumu gözlemlenmiştir. Bu köpürme esnasında çevreye az miktarda sıçramada yapmıştır. Bu sebeple derişim seyreltilmesine karar verilmiştir. Şekil 4.13'te %5 gümüş ihtiva eden mürekkebin sinterlenme aşamaları verilmiştir. Fakat bunun 1 cm çaplı bir damla olduğu unutulmamalıdır. Mikron boyutlu ve tam ıslatma veya çok düşük temas açısı görülen yüzeylerde çekilen çizgiler benzer özellik göstermeyebilir.



Şekil 4.13. %5 gümüş içeren parçacıksız mürekkebin sinterleme sırasında değişen formu

Deney tasarımına göre eldeki cihazlarla ölçülebilen ve iletkenliği olabildiğince yüksek olan, az mürekkep gerektiren, hızlı üretilebilen, optimum katman sayısı ve gümüş içeriğine sahip numunenin seçilerek esneklik deneyleri için kullanılması planlanmıştır. Bu sebeple farklı derişime farklı ilerleme hızlarına sahip parametrelerde 1. katmandan 20. katmana kadar damla atımı ve desen oluşumu için farklı bir yöntem olan nozul ağzına gelen mürekkebin yüzey ile teması sağlanarak nozul ilerletilmesine mürekkebin yüzeye sürülmesini sağlayan yöntemler ile 30 mm uzunluğundaki elektrot yollar oluşturulmuştur. Şekil 4.14'te %2 gümüş içeren mürekkebin 1 katmandan 20 katmana kadar olan 30 mm elektrotların görseli verilmiştir. Basım hızı 150 mm/dk olarak belirlenmiştir. Sinterleme sıcaklığı 135°C ve 30 dk sinterlemeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 4.14. %2 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan 150 mm/dk hızla basılan ve 135°C sinterlenmiş damlaların görüntüsü

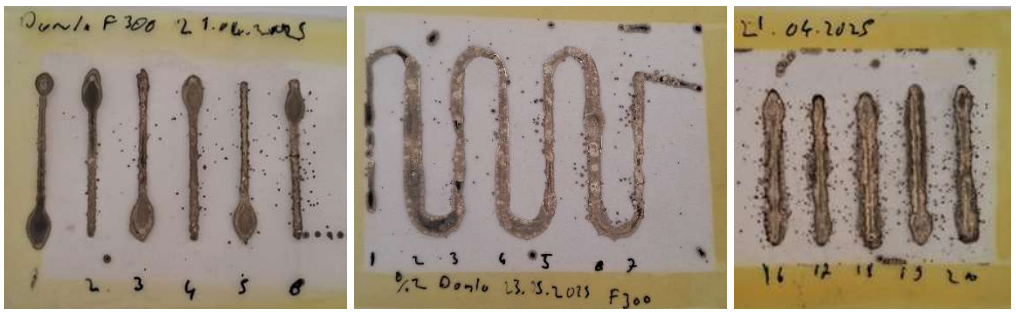
Üretim sonrasında direnç ölçümleri üç noktadan olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Kahve lekesi varsa görebilmek için problar sağ kenar orta nokta ve sol kenar olmak üzere üç ölçüm alınmıştır. Çizelge 4.2'de ölçülen direnç değerleri verilmiştir. Katman sayısının artmasıyla direnç düşüşü gözlemlenmiştir. 14. Katmandan sonra dirençlerdeki düşüş gözlemlenememiştir. Bazı katmanlarda düşüş beklenirken dalgalanmalar ve değişken değerler gözlemlenmiştir. Bu durum üretim stabilizasyonu ile ilgili bir durum olabilir. 10. katmandan sonra 0,2 ohm direncin altına düşüş gözlemlenmiştir. İlk katmanda ise iletkenlikte problemler mevcuttur.

Çizelge 4.2. %2 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan 150 mm/dk hızla damla püskürtme yöntemiyle basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri

Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama
1	-	15,60	-	15,600
2	6,380	6,406	6,352	6,379
3	2,335	2,324	2,302	2,320
4	1,232	1,156	1,147	1,178
5	0,851	0,815	0,774	0,813
6	0,585	0,557	0,577	0,573
7	0,447	0,408	0,356	0,404
8	0,296	0,302	0,256	0,285
9	0,235	0,311	0,304	0,283
10	0,282	0,226	0,212	0,240
11	0,168	0,193	0,182	0,181
12	0,147	0,162	0,160	0,156
13	0,116	0,132	0,136	0,128
14	0,108	0,118	0,112	0,113
15	0,132	0,152	0,143	0,142
16	0,102	0,142	0,179	0,141
17	0,112	0,114	0,113	0,113
18	0,098	0,108	0,113	0,106
19	0,167	0,182	0,176	0,175
20	0,144	0,174	0,224	0,181

Şekil 4.15'te %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 6 katmana ve 16 katmandan 20 katmana kadar olan 300 mm/dk hızla 135°C sinterlenmiş damla püskürtme yöntemiyle üretilmiş baskıların görüntüsü verilmiştir. Damlatma yönteminde hız artırılmış ve 150 mm/dk'dan 300 mm/dk'ya çıkarılmıştır. Bu deneyde hız

artırılarak yayılan damlaların hat kalınlıkları inceltilmeye çalışılmıştır. 20 katmanın tümünün tekrardan deneye dahil edilmemesinin sebebi mürekkebin pahalı ve üretiminin zahmetli oluşudur. Şekil b4'te ortadaki basıma bakıldığında ilk katman basılırken yüzeye plazma işlem uygulanmaması ve damlatma sisteminin denge rejimine girmemesi sebebiyle başlangıç damlalarında ayrışma ve topaklaşma görülmüştür. İlk çizgiden sonra sistem stabil hale gelerek çizgileri düzgün bir şekilde tamamlanmıştır. Elektrot yolların doğrusallığı 150 mm/dk hıza kıyasla muntazamdır. Fakat benzer şekilde gümüş yolların 6. katmana kadar kenarlarda birikmiş olduğu net bir şekilde görülebilir. Ortadaki sürekli kavisli kenarla birleştirilmiş elektrotların tercih edilmesinin sebebi başlangıçlarda meydana gelen kaşık formunu ortadan kaldırmaktır. Bu sayede bozucu değişkenleri minizmize etmek ve kontrol edilmesi gereken parametre ve optimizasyon sayısını düşürmektir. Reinhold vd. (2013) ve Ivaniševic vd. (2019) çalışmalarına baktığımızda benzer şekilde gümüşlerin elektrotun kenarlarına biriktiği ve elektrot kenarlarında ufak sıçrama izlerinin olduğu görülmektedir. Reinhold bu durumu çözünürlüğü ve parametreleri değiştirerek bir miktar optimize edebilmiştir. Dalgalanma durumunun göz ardı edilebileceğini dile getirmiştir. Bu çalışmada genel olarak sıçramanın oluşu alttaşın 135°C olarak basım yapılması ve 600 µm çaplı nozul sebebiyle damla boyutunun büyük ve tabladan fazla yüksek olmasından dolayı alttaşa çarpan damlanın saçıldığı yönünde olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.15. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 6 katmana ve 16. katmandan 20. katmana kadar olan 300 mm/dk hızla 135°C sinterlenmiş damlaların görüntüsü ve ortada 1 katmandan 7 katmana kadar aynı parametrelerde basılmış farklı bir desen

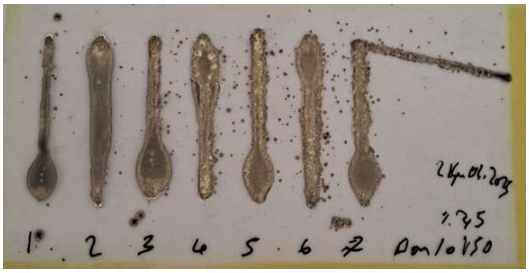
Hız artırılarak yapılan elektrotlarda direnç ölçümleri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Damla püskürtme yoluyla üretilen bu elektrotlar 6. Katman sonunda 2 ohm direncin altına

düşememiştir. Aynı zamanda kahve lekesi yapılanması görülerek orta noktalarında dirençleri düşük çıkmıştır. Bu durum elektrotlar sıcaklıkla yan taraflardan kurumaya başladığını ve kuruma sırasında gümüşler elektrotun yan taraflara biriktiğini göstermektedir. Bu direnç dalgalanmasının 20. Katmana kadar devam gözlemlendiği söylenebilir. %2 mürekkep içeren ve 300 mm/dk ile damlacık püskürtülerek yapılan deneylerde 18. katmanda 0,2 ohm direnç değerinin altına düşülebilmiştir.

Çizelge 4.3. %2 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1. katmandan 6. katmana ve 16. katmandan 20. katmana kadar olan 300 mm/dk hızla damla püskürtme yöntemiyle basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri

Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama
1	20,623	-	18,747	19,685
2	9,743	-	9,816	9,780
3	5,968	7,312	4,486	5,922
4	3,837	5,812	3,956	4,535
5	2,232	3,124	2,378	2,578
6	2,158	3,234	2,047	2,480
7	3,261	1,259	2,188	2,236
16	0,262	0,351	0,254	0,289
17	0,184	0,275	0,161	0,207
18	0,167	0,191	0,182	0,180
19	0,263	0,292	0,273	0,276
20	0,341	0,451	0,302	0,365

Şekil 4.16'da gümüş oranı %2,5'a çıkarılmış mürekkep ile damla atma yöntemiyle yapılan 30 mm uzunluğundaki çizgilerin görseli verilmiştir. Çizgiler incelendiğinde gümüşlerin çizginin kenarlarında biriktiği gözlemlenir. Ayrıca damlaların başladığı noktalarda daireleşme görülmüştür. Bunun sebebi olarak damlanın vaktinde kesilmesi, ivme ve sarsıntı (jerk veya junction deviation) ayarlarının optimize edilmesi gerektiği ve yüzey yapısının veya mürekkep fiziksel özelliklerinin ayarlanması ile çözülebileceği düşünülmüştür. Benzer sorunlara literatürde rastlamak mümkündür (Boumeganane vd., 2022; Rohit, 2017). Ge, (2017) yaptığı çalışmada serme yönteminde benzer problemlerle karşılaşmış ve çözüm olarak nozul çapı, nozul yüksekliği, baskı hızı ve mürekkep hızını değiştirme yoluna gitmiştir. Belirli bir miktar hatalarda düzelme görülmüştür.



Şekil 4.16. %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan 150 mm/dk hızla 135°C sinterlenmiş damlaların görüntüsü

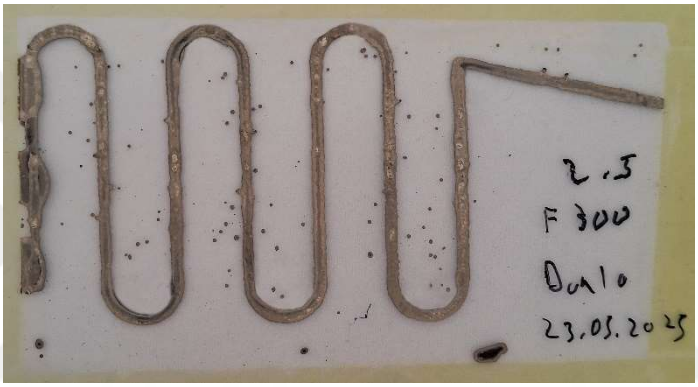
Çizelge 4.4'te %2,5 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1. katmandan 7 katmana kadar 150 mm/dk hızla basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri verilmiştir. Ölçümlere bakıldığında 8. katmanda 0,2 ohm direncin altına düşüleceği tahmin edilebilir. Elektrotların basımı sırasında damla atımı kapatılması yerine yüksek hızla dönme yapılarak yeni elektrota geçiş yapılmaktadır. Bu sebeple elektrot başlarında ivmeli hareket sebebiyle mürekkep dağılması oluşarak yayılma yapmaktadır. Bu sebeple yayılan mürekkep kahve lekesine benzer bir yapılanmaya yol açar. 5., 6. ve 7. numunelerin direnç değerlerine bakıldığında orta noktadan alınan direnç değerinin yüksek çıkması kahve lekesi oluşumundan ve giriş çıkışlarda oluşan birikmiş damlanın yayılmasından kaynaklanır.

Çizelge 4.4. %2,5 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1. katmandan 7. katmana kadar olan 150 mm/dk hızla damlatma yöntemiyle basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri

Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama
1	7,64	-	7,71	7,675
2	5,834	5,746	5,556	5,712
3	1,862	1,792	1,864	1,839
4	0,701	0,717	0,779	0,732
5	0,413	0,724	0,426	0,420
6	0,318	0,713	0,322	0,320
7	0,225	0,722	0,204	0,215

Şekil 4.17'de basım hızı 300 mm/dk'ya çıkarılmıştır. Sinterleme süresi 30 dk ve sinterleme sıcaklığı 135°C'dir. Çizgi hatları düzgün görülmektedir. Katmanlar arasındaki dönüşlerde ilerleme hızı sabit 300 mm/dk tutulmuştur ve damla püskürtme kesilmemiştir. Bu sayede kavisli deseninde basılabilir olduğu test edilmek istenmiştir. Ayrıca damla

püskürtmenin kesilmesi, hızlı dönme, ivmeli yavaşlama ve damla püskürtmenin tekrar açılması farklı parametrelerin ve farklı sistemlerin kontrolünü gerektireceğinden direnç ölçümü için yapılan testte amaç dışına çıkılmak istenmemiştir ve farklı parametrelerden kaynaklı oluşacak değişimler minimize edilmeye çalışılmıştır. Görsel incelendiğinde 6. katmana kadar kadar kahve lekesi probleminin oluştuğu görülebilir. Bu hızda ve gümüş içeriğinde 5 mm yarı çaplı dairesel dönüşler ve dar açılı köşeler basılabilir olduğu gözlemlenmiştir. Bu parametrelerin kabul edilebilir bir basım kalitesi olduğu çizgi doğrusallığı, dairesel ve kenar birleşimlerindeki dönüşlerde birikme yapmaması ile değerlendirilebilir.



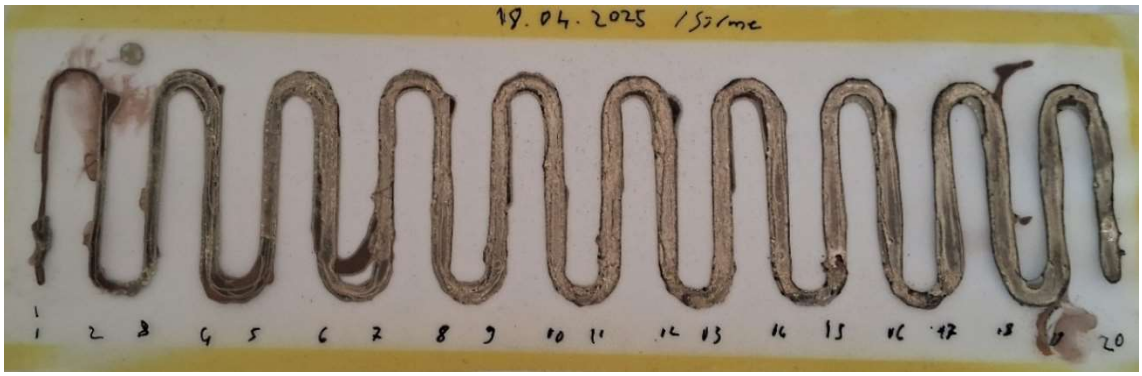
Şekil 4.17. %2,5 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan damla yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C'de sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü

Çizelge 5.5'te 300 mm/dk hızda ve %2,5 gümüş içeren damlatma metodu ile 1 katmandan 7 katmana kadar üst üste basılan numunelerin direnç ölçüm değerleri verilmiştir. Değerlere bakıldığında ilk numunede elektrot bütünlüğü sağlanamadığı görülmektedir. 2 katmanlı numunenin direnci 2,993 ohm ortalama olarak hesaplanmıştır. Direnç ölçümleri yolun sağından ortasından ve sol kenardan olmak üzere 3 kere alınarak yapılmaktadır. Numunelerin görüntüleri olumlu bir görsel sunsa da direnç ölçümleri sonucunda homojen bir gümüş dağılım olmadığı sonucuna varılabilir. Fakat katman sayısı artıkça direnç değerlerindeki dalgalanmalar azalmaktadır.

Çizelge 4.5. %2,5 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1. katmandan 7. katmana 300 mm/dk hızla damla püskürtme metodu ile basılan ve 135°C de sinterlenmiş elektrotların yan yana 3 noktadan yapılmış direnç ölçümleri

Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama
1	25,20	-	-	25,20
2	3,182	2,354	3,442	2,993
3	3,094	2,082	1,212	2,129
4	2,228	1,556	0,628	1,471
5	1,318	2,927	1,812	1,565
6	0,624	0,578	1,112	0,868
7	0,923	0,612	0,533	0,728

Damla atımının optimize edilmesi elde olan imkanlarla zor olduğu için daha pratik olan mürekkebin nozul ağzının alttaşa değdirilmesiyle mürekkebin alttaş yüzeyine sürüldüğü ve elektrotların mürekkebin sürülmesi tekniğiyle üretildiği yapı Şekil 4.18'de verilmiştir. Bu teknikle daha düzgün yapıları yüksek hızlı çekim için ağır çekim kamera, görüntü işleme için bilgisayar gibi yüksek teknoloji cihazların kullanımı; şırınga pompası hızı, dalga formu, dalganın genliğinin voltaj ile ayarlanması, tabla sıcaklı, damla hızının hesaplanması vb. birbirinden bağımsız parametrelerin analizi gibi karmaşık ve süreç isteyen parametrelerin ayarlanmasına ve pahalı cihazların kullanılmasına gerek olmadan yolların oluşturulmasına imkan tanımıştır. Aynı zamanda mürekkebin damlatılabilir aralıkta olmasını gerektirecek zorluklar bu teknik için gerekli değildir. Mürekkebin viskozitesi, içeriği vb. karakteristik yapılardan daha az etkileneceği aşikardır. Ayrıca nozul çapı da düşürülerek daha ince çizgiler damlatma tekniğine göre daha kolay oluşturulabilir.



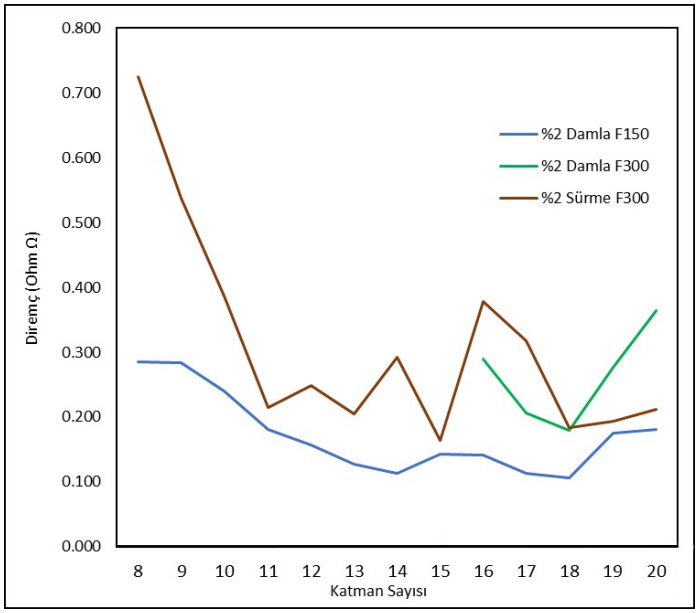
Şekil 4.18. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C mürekkebin sinterlenmiş görüntüsü

Çizelge 4.6'da 300mm/dk hızla %2 derişimli mürekkep ile serme tekniğiyle yapılan elektrot yolların direnç ölçüm değerleri verilmiştir. 8. katmana kadar sağlıklı bir iletkenlik görülmemiştir. İstisnai durumları saymazsak 18. katmana kadar 0,2 ohm direnç değerinin altı görülmemiştir. Aynı derişimdeki ve aynı ilerleme hızında damla püskürtme tekniği kullanıldığında ise 3 katmandan sonra bütünlüğün sağlanabildiği ve iletkenliğin elektrotun her yerinde olduğu görülebilmektedir. Fakat yine benzer dalgalanmalar ve 18. Katmana kadar 0,2 ohm direncin altına düşülmediği görülmüştür. Hızlı basım istendiğinde %2 derişimin az kaldığı söylenebilir. Katman sayısının artmasıyla kuruma için bekleme süreleri de dahil edildiğinde çok uzun bir üretim prosesi oluştuğu söylenebilir.

Çizelge 4.6. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 20 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C mürekkebin sinterlenmiş elektrotların direnç ölçümleri

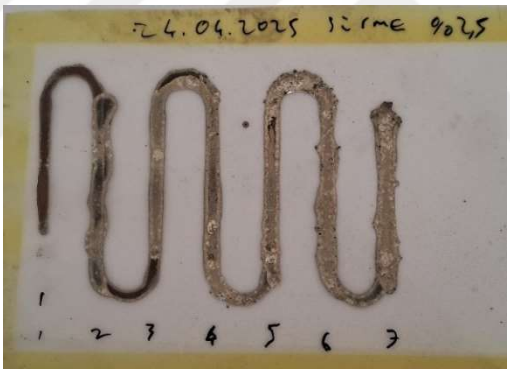
Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama
1	-	-	-	-
2	-	-	-	-
3	4,002	7,821	3,124	4,982
4	-	4,520	4,482	4,501
5	1,118	-	1,554	1,336
6	0,801	-	0,952	0,877
7	0,509	11,123	0,486	0,498
8	0,714	0,806	0,656	0,725
9	0,638	1,876	0,436	0,537
10	0,416	0,409	0,336	0,387
11	0,216	0,224	0,206	0,215
12	0,268	0,244	0,235	0,249
13	0,196	0,232	0,187	0,205
14	0,332	0,321	0,224	0,292
15	0,152	0,213	0,125	0,163
16	0,643	0,256	0,235	0,378
17	0,218	0,413	0,321	0,317
18	0,144	0,237	0,168	0,183
19	0,132	0,312	0,138	0,194
20	0,134	0,391	0,111	0,212

Şekil 4.19'da 8 katmandan daha fazla katmana sahip olan denemelerin karşılaştırma yapılabilmesi adına dirençlerinin verildiği grafik verilmiştir. Grafiğe göre %2 gümüş içeren damla püskürtme yöntemiyle 150 mm/dk hızla üretilen elektrot yolların daha düşük direnç değerlerine sahip olduğu görülebilir. Fakat tek başına direnç değerlerini karşılaştırmak doğru bir yaklaşım olmamaktadır. 150 mm/dk hızla püskürtülen damlaların serimi birbirine çok yakın olduğu için hat genişlemekte ve daha fazla dalgalanmalara maruz kalmaktadır. Bu durumda desen doğruluğunu bozacaktır. Damla püskürtme yönteminde 150 mm/dk'dan daha yüksek hız değerleri seçilmesi daha uygun bir yaklaşım olacaktır. Hız değerinin 300 mm/dk çıkarıldığında ise damla püskürtme yöntemiyle serme yönteminin direnç değerleri olarak birbirlerine çok yakın olduğu damla püskürtme yönteminin hat boyunca daha az direnç dalgalanması yaşandığı ve kahve lekesi etkisinin daha az oluşundan dolayı daha avantajlı durumda olduğu söylenebilir. Fakat uygun açıklığa sahip nozul ile serme yöntemi kullanırsa kahve lekesi ortadan kalkabilir. İki numunenin de dozaj pompa hızları aynı olsa da nozul ağzının 600 µm omasından dolayı erme yönteminde mürekkep nozul genişliğinden ve yüzeye yakınlıktan dolayı sağ ve sola yayılmaktadır. Bu durum aynı nozulla yapılan iki yöntemde elektrot hattında genişlik farkına yol açmaktadır.



Şekil 4.19. 8 katman ve üstü yapılmış deneylerde katman sayılarına göre 30 mm boyundaki elektrotların farklı parametrelerde ve farklı yöntemle basılmış numunelerin direnç ölçümleri

Şekil 4.20'de gümüş içeriği %2,5'a çıkarılmıştır. Basım hızı 300 mm/dk olarak seçilmiştir. Sinterleme süresi 30 dk ve sinterleme sıcaklığı 135°C'dir. Çizgi hatları düzgün görülmektedir. Katmanlar arasındaki dönüşlerde bilerek nozul kaldırılmamış ve baskının sürekli kalması istenmiştir. Akışın kesilmesi nozulun yükseltilmesi ve tekrardan basıma devam etmesi farklı parametrelerin ve farklı sistemlerin kontrolünü gerektireceğinden direnç ölçümü için yapılan testte amaç dışına çıkılmak istenmemiştir ve farklı parametrelerden kaynaklı oluşacak değişimler minimize edilmeye çalışılmıştır. Fakat cihaz mürekkebin gereksiz harcanmaması için nozulun dönüşlerde yaptığı yarı çap şeklini 15000 mm/dk hız girdisi ile yerine getirmektedir. Fakat cihaz içerisindeki sarsıntı ayarları sebebiyle dönülerde verilen hız değerine ulaşmadığı söylenebilir. Çizgi hatları hızlı hareketlere ve dönüşlere rağmen bütünlüklerini koruyabilmişlerdir.



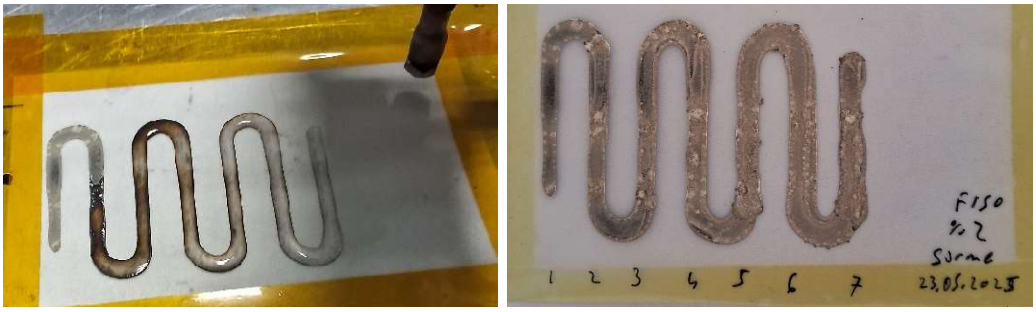
Şekil 4.20. %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü

Derişimin artırılmasıyla 3. katmanla beraber elektrotta bütünlük sağlanıp iletkenlik oluşmuştur. Çizelge 4.7'de 300 mm/dk hızda %2,5 oranında gümüş içeren mürekkebin basım sonucunda ölçülen direnç değerleri verilmiştir. Çizelge incelendiğinde 5. Katmanla beraber hatın kenarları ve ortasında direnç dalgalanmanın azaldığı görülebilir. 5. Katmanla beraber direnç değerindeki azalmanın oranı düşmüştür.

Çizelge 4.7. 300 mm/dk hızda %2,5 oranında gümüş içeren mürekkebin serme yöntemiyle basımı sonucunda ölçülen direnç değerleri

Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama
1	-	-	-	-
2	6,612	-	6,118	6,365
3	1,132	2,311	1,251	1,565
4	0,867	0,942	0,833	0,881
5	0,438	0,403	0,440	0,427
6	0,316	0,340	0,332	0,329
7	0,258	0,245	0,276	0,260

Şekil 4.21'de basım hızı 150 mm/dk olarak seçilmiştir ve gümüş içeriği %2'dir. Sinterleme süresi 30 dk ve sinterleme sıcaklığı 135°C'dir. Çizgi hatları düzgün görülmektedir. Katmanlar arasındaki dönüşlerde bilerek nozul kaldırılmamış ve baskının sürekli kalması istenmiştir. Dönüş hızları Deney 8'e göre basım hızıyla sabit tutulmuştur. İlerleme hızının yavaş olmasından dolayı bu basımda çizgi hattının 5. katmanla beraber yayılma göstermeye başlamıştır. Çizelge 4.8'de direnç ölçüm değerleri verilmiştir. 5. katmanla beraber sıvının yayılmaya başlamasından dolayı direnç değerleri genel olarak stabil gitmeye başlamıştır.

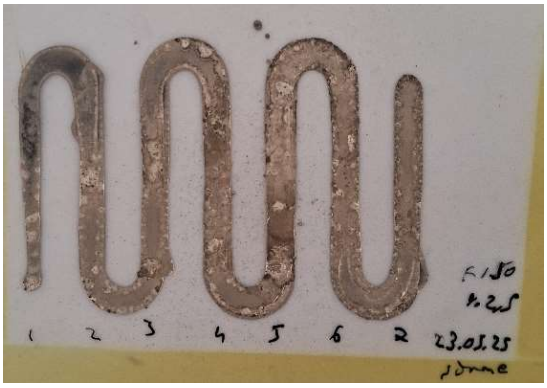


Şekil 4.21. %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü; soldaki ilk katmanın kuruması esnasında çekilmiş görüntüsü

Çizelge 4.8. 150 mm/dk hızda %2 oranında gümüş içeren mürekkebin serme yöntemiyle basımı sonucunda ölçülen direnç değerleri

Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama (ohm)
1	10,384	11,08	12,41	11,291
2	3,382	3,254	3,526	3,387
3	1,454	1,622	1,356	1,477
4	1,214	1,428	1,082	1,241
5	0,472	1,138	0,554	0,721
6	0,578	4,482	0,572	0,575
7	0,542	0,742	0,535	0,539

Şekil 4.22'de %2,5 gümüş içeriğine sahip 150 mm/dk hızla serme yöntemiyle basılan elektrotun görüntüsü verilmiştir. Tabla 135°C sıcaklıkta tutulup basım ve sinterleme aşamalarında bu sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Bu deneyde saniyede 2,5 mm hız gibi yavaş bir hızla ilerlemesine rağmen hattın doğrusallığı korunmuştur. Bu durum gümüş miktarının fazla olmasından dolayı kuruduktan sonra hat kenarlarında birikmesinden ve sıvının bu hat dışına çıkamayarak sürekli içeride birikmesi olarak yorumlanabilir. Çizelge 4.9'da ölçülen direnç değerlerine bakıldığında 4. Katmanla beraber iletkenliğin tüm hat boyunca ölçülebildiği ve kahve lekesi etkisinin bu elektrotlarda direnç bazında görülmediği gözlemlenebilir.

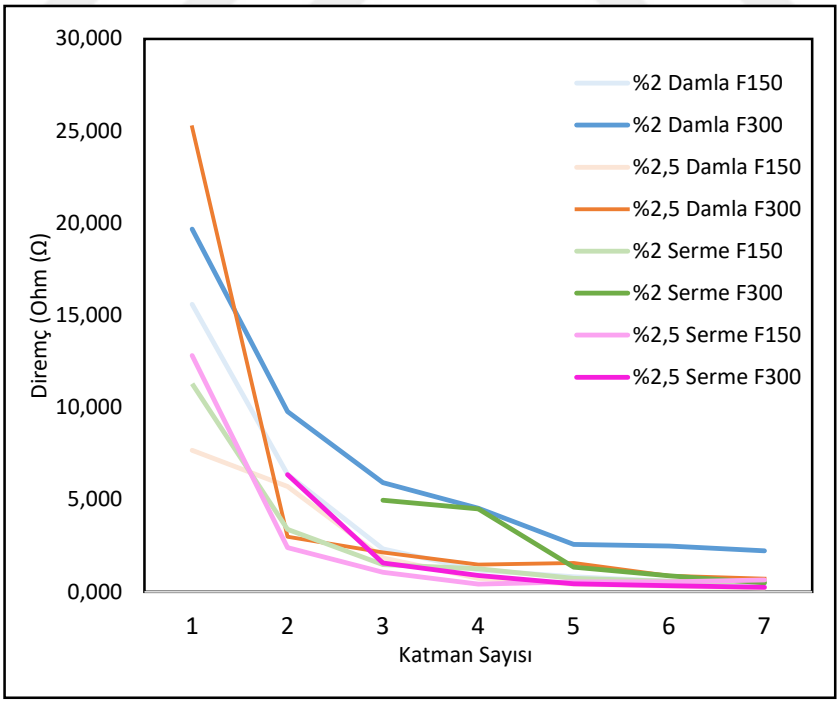


Şekil 4.22. %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş mürekkebin görüntüsü

Çizelge 4.9. 150 mm/dk hızda %2,5 oranında gümüş içeren mürekkebin serme yöntemiyle basımı sonucunda ölçülen direnç değerleri

Katman	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)	Ortalama (ohm)
1	14,162	225,418	11,482	12,822
2	1,964	-	2,819	2,392
3	1,254	25,438	0,872	1,063
4	0,328	0,447	0,483	0,419
5	0,538	0,416	0,642	0,532
6	0,327	0,775	0,536	0,546
7	0,536	0,845	0,532	0,638

Şekil 4.23'te uygun katman sayısını ve yöntemi tespit etmek adına yapılan 8 deneyin karşılaştırılabilmesi için direnç ölçümleri toplu olarak verilmiştir. Grafikte net bir şekilde %2 gümüş içeriğine sahip 300 mm/dk hızla basılan damla püskürtme yöntemi ve serme yönteminde direnç değerleri yüksek çıkarak en kötü sonuçları verdiği görülebilir. Serme yönteminde katman sayısı arttıkça diğer deneylerdeki değerlere yaklaşılsa da katman sayısının artışıyla beraber hata oluşma olasılığı ve basım süresi artmaktadır. Bununla beraber kullanılan mürekkep miktarıda artış gösterir.



Şekil 4.23. Katman sayılarına göre 30 mm boyundaki elektrotların farklı parametrelerde ve farklı yöntemle basılmış numunelerin direnç ölçümleri

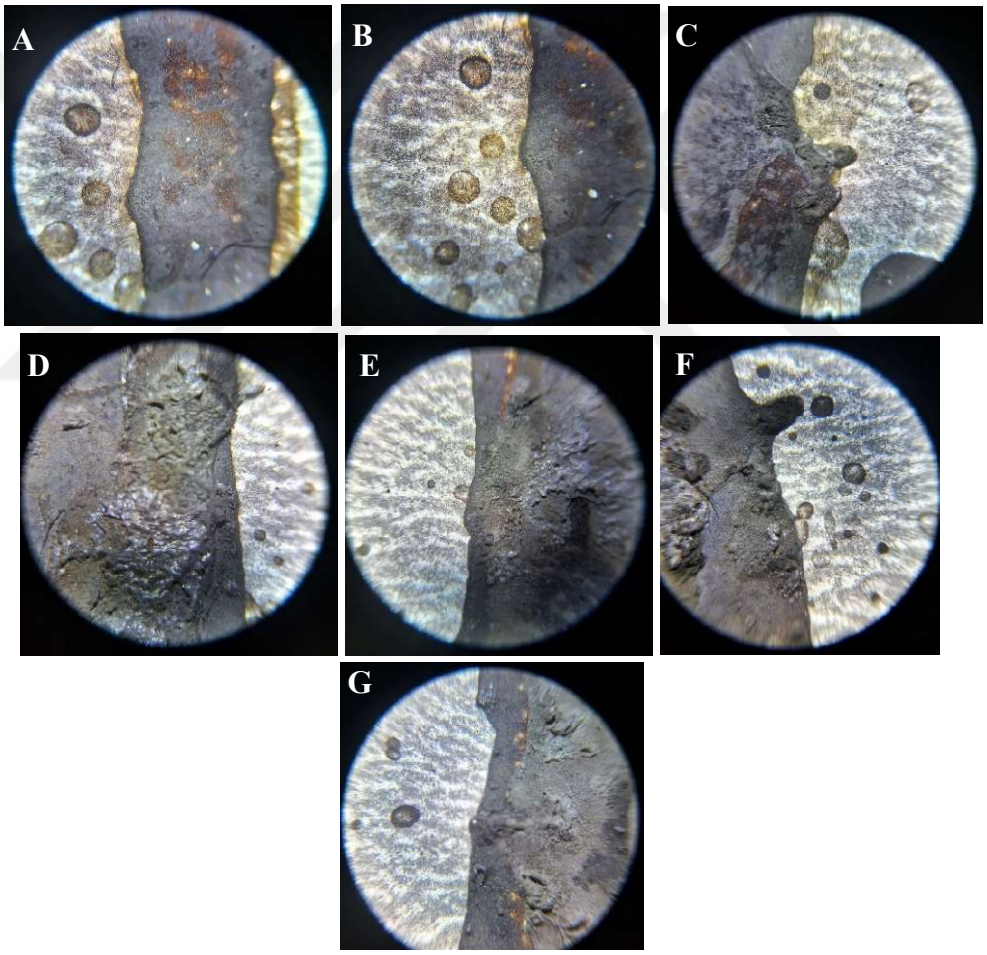
Çizelge 4.10'de yapılan 8 deneyin ortalama olarak alınan direnç ölçüm değerlerleri verilmiştir. En küçük iki direnç değeri net olarak karşılaştırılmak üzere kalın puntalı olarak işaretlenmiştir. Değerler incelendiğinde en iyi sonuçları veren deney takımları Deney 3 (F150, %2,5, Damla püskürtme yöntemi) ve Deney 8 (F300, %2,5, Serme yöntemi) olarak görülmektedir. 150 mm/dk hızla basılan Deney 3'ün görselleri incelendiğinde çizgilerin doğrusallıklarında problem olduğu görülmektedir. Bu sebeple desen doğrusallığı yüksek olan Deney 8 parametreleri daha kullanışlı olduğu söylenebilir. Ayrıca Deney 3'te yavaş ilerlemeden dolayı 2 kat fazla mürekkep kullanımı söz konusudur. Bu değerlendirmeler göz önüne alındığında 300 mm/dk hızda %2,5 gümüş ihtiva eden serme yöntemiyle çizilen desenlerin esneklik ve plazma çalışmalarında temel alınması uygudur.

Çizelge 4.10. Yöntem, basım hızı, gümüş içeriği ve katman sayısına göre 30 mm uzunluğundaki 135°C sinterlenmiş numunelerin direnç ölçüm değerleri

Basım Özellikleri			**Katman Sayısına Bağlı Direnç (Ω)**						
Yöntem	**Hız (mm/dk)**	**Gümüş Oranı (%)**	**1 Katman**	**2 Katman**	**3 Katman**	**4 Katman**	**5 Katman**	**6 Katman**	**7 Katman**
Damla	F150	2,0%	15,600	6,379	2,320	1,178	0,813	0,573	0,404
Damla	F300	2,0%	19,685	9,780	5,922	4,535	2,578	2,480	2,236
Damla	F150	2,5%	**7,675**	5,712	1,839	0,732	**0,420**	**0,320**	**0,215**
Damla	F300	2,5%	25,200	**2,993**	2,129	1,471	1,565	0,868	0,728
Serme	F150	2,0%	**11,291**	3,387	**1,477**	1,241	0,721	0,575	0,539
Serme	F300	2,0%	-	-	3,124	4,482	1,554	0,952	0,486
Serme	F150	2,5%	12,822	**2,392**	**1,063**	**0,419**	0,532	0,546	0,638
Serme	F300	2,5%	-	6,365	1,565	0,881	**0,427**	**0,329**	**0,260**

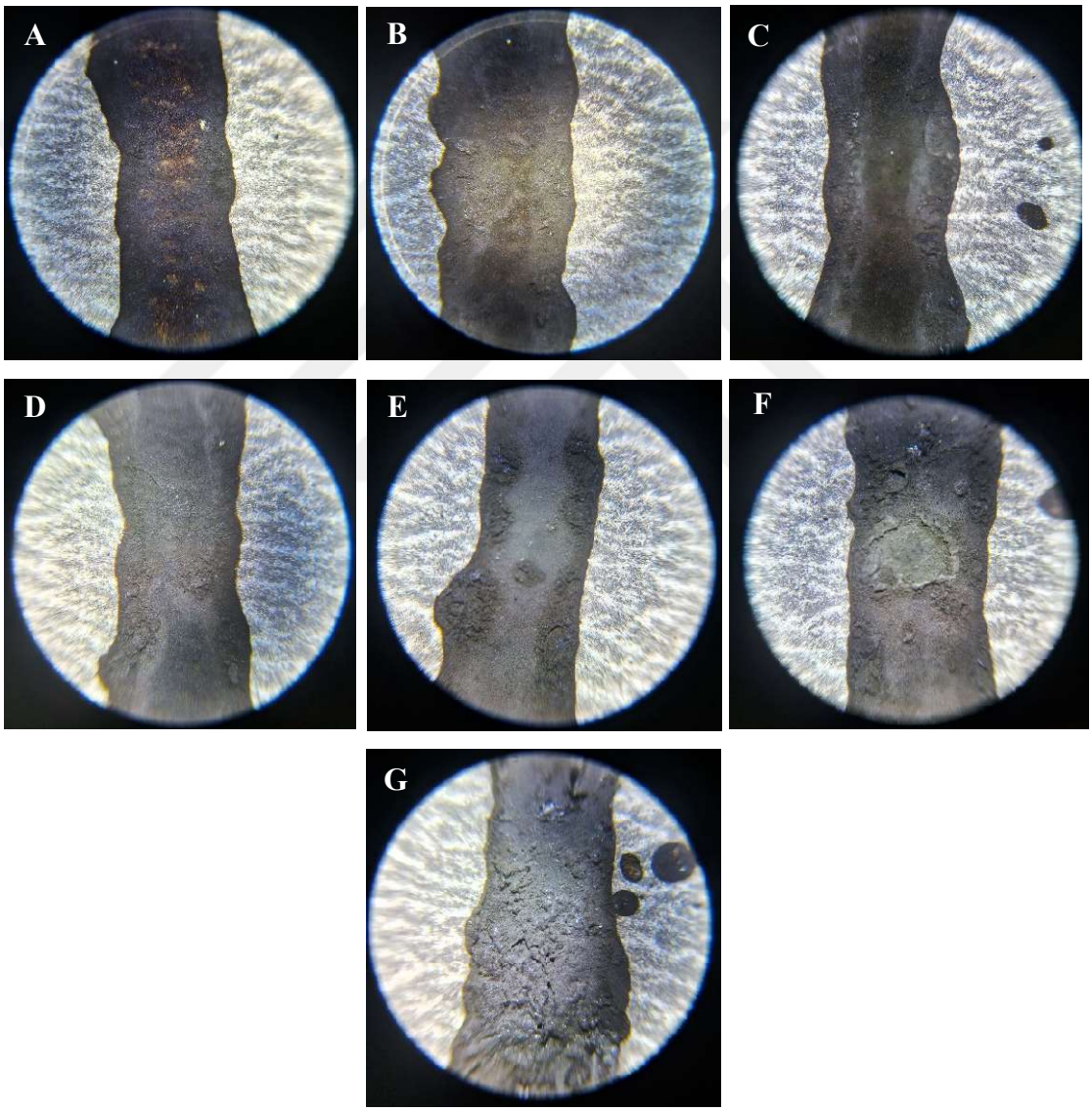
Bazı ön basımlarda mürekkebin alt dönüşlerde birikme yaptığı fark edilmiştir. Bu birikmenin sebebi olarak tablanın ve cihazın açılı bir şekilde durduğu tespit edilmiştir. Tabla su terazisi ve daha hassas inceleme için leidenfrost etkisiyle dengeye alınmıştır. Fakat ısıtıcılı tabla yüzeyinin düzlemselliğinde problem olduğu ve bölgesel olarak düzlemsel farklılıkların olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum bazı elektrotları karşılaştırırken dikkate alınmalıdır. Şekil 4.24'te 15 mm/dk hız ve %2 gümüş içeren mürekkep ile damla püskürtme yöntemiyle üretilmiş birden yedi katmana kadar ayrı ayrı elektrot deseninin kenar doğrusallığının ve kahve lekesinin 64x büyütme ile mikroskopla incelenmesine ait görseller verilmiştir. Kahve lekesi kurumanın elektrotut sağ ve sol kenarlarından başlaması sebebiyle çökelen gümüş tanelerin kurumanın olduğu yere doğru

birikme eğilimine geçmesiyle oluşur. Bu durumda elektrotun orta kısmında gümüş yoğunuluğun azalmasına yol açar. Yüzey geriliminin yüksek olması elektrotun orta kısmında bombe oluşmasına yol açarak orta kısımdaki kurumayı geciktirir. Eğer yüzey soğuk plazma gibi bir yöntemle işlenirse temas açısı düşerek damla yayılacak ve kahve lekesi oluşumu azalma eğiliminde olacaktır. Katmanlar incelendiğinde ilk katmanın yetersiz gümüş içerdiği ve yer yer alttaşın görüldüğü gözlemlenmektedir. Şekil 4.24 e ve g'de yavaş hız sebebiyle kenarlarda set oluşturan gümüşün yavaş hız sebebiyle mürekkep tarafından aşılarak hattın genişlediği görülebilir. Hat genel olarak yavaş ilerleme sebebiyle doğrusallığını ve inceliğini koruyamamıştır ve genel olarak dalgalanmlar mevcuttur.



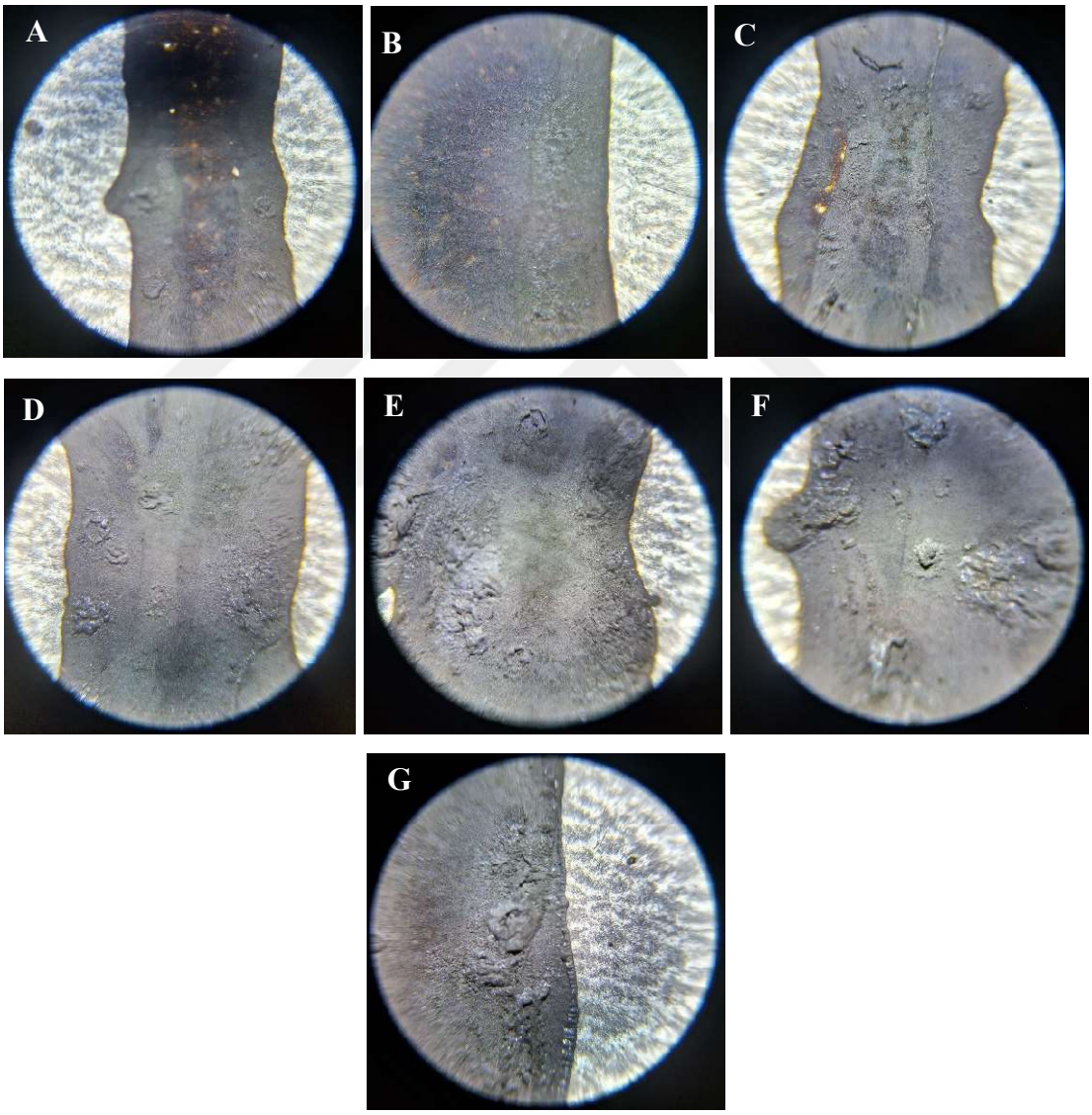
Şekil 4.24. Deney 1: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri ilk katman 1,8 mm olmak üzere yaklaşık 2,3 mm civarındadır, **A)** 1 katman, **B)** 2 katman, **C)** 3 katman, **D)** 4 katman, **E)** 5 katman **F)** 6 katman ve **G)** 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

Şekil 4.25, Deney 2'de ilerleme hızı artırılmış (300 mm/dk) ve gümüş miktarı aynı tutulmuştur. Hattın genişliği Deney 1'de gözlemlenen 2,5 mm genişliklerden 1,6 mm'ye kadar düşüş göstermiştir. 6. Katmanla beraber hat doğrusallığı ve gümüşün homojen dağılımı arttığı görülebilir. Direnç ölçümlerine de bakıldığında görsellerde kahve lekesi gözlemlense de damlacıkların daire biçimli oluşu sürekli iç kesimlere de mürekkebin taşınmasına yol açmaktadır. Bu durumda da orta noktadan geçen hattın kenarlarla bağlantı sağlaması ve direncin düşük gözlemlenmesinin önünü açar.



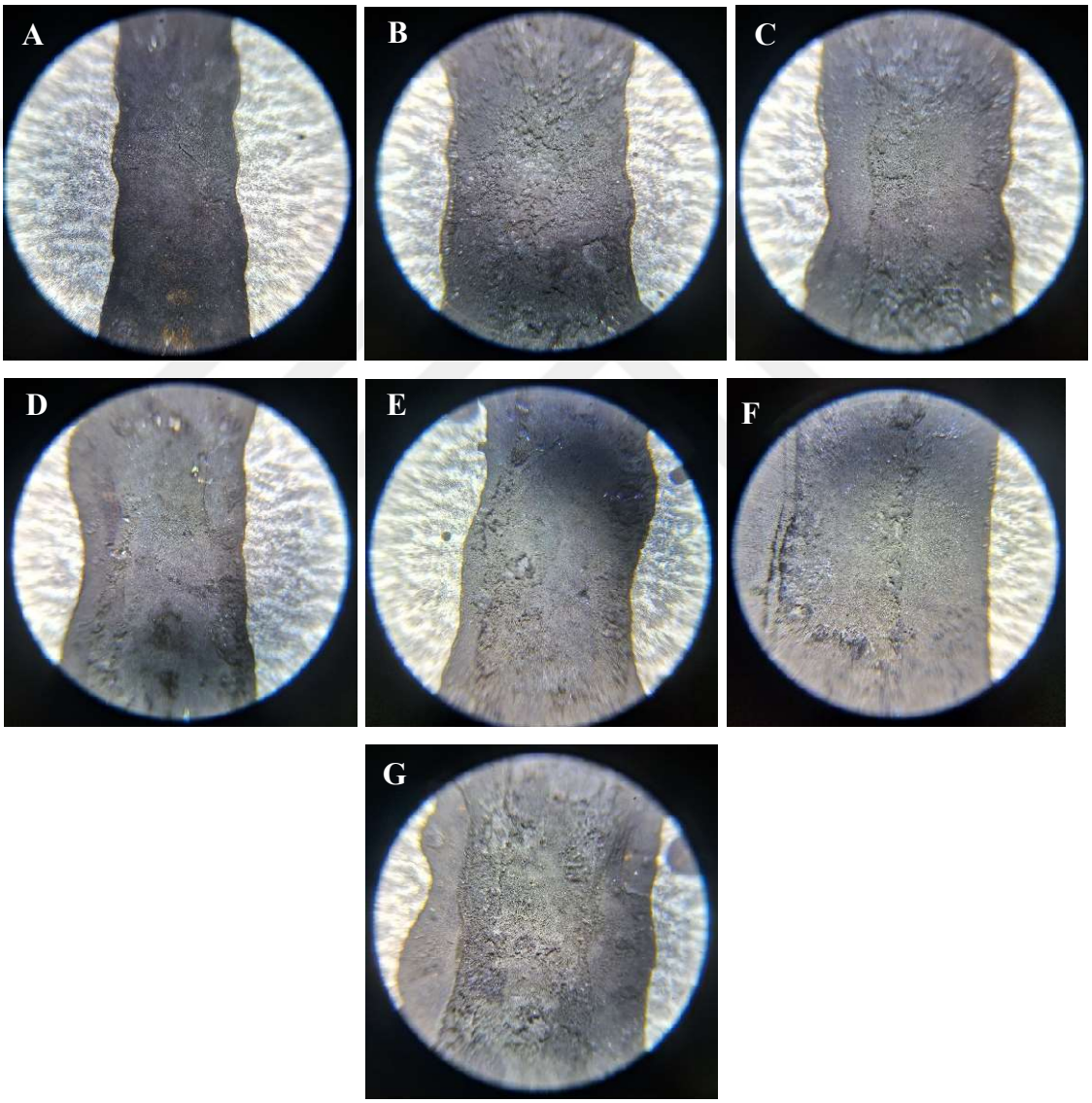
Şekil 4.25. Deney 2: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri yaklaşık 1,8 mm civarındadır, **A)** 1 katman, **B)** 2 katman, **C)** 3 katman, **D)** 4 katman, **E)** 5 katman **F)** 6 katman ve **G)** 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

Şekil 4.26'da Deney 3'ün görselleri verilmiştir. Bu deneyde hız 150 mm/dk yavaşlatılmış ve gümüş oranı %2,5'a çıkarılmıştır. Gümüş oranın artmasıyla kuruma esnasında gümüşler hat kenarlarında birikme yaparak set oluşturmuşlardır. Bu sayede Deney 1'e kıyasla daha doğrusal hatlar meydana gelmiştir. Gümüş oranın artması hat doğrusallıklarını dolaylı yoldan artırmıştır. Fakat yine yavaş hız yüzünden bir çok katman görselinde de gözlemleneceği üzere yükselen sınırdaki gümüş setleri aşılarak yeni setler oluşmuş ve yeni katmanda bu setler arası ve orta alanda tekrar yeni birikimler gerçekleşmiştir.



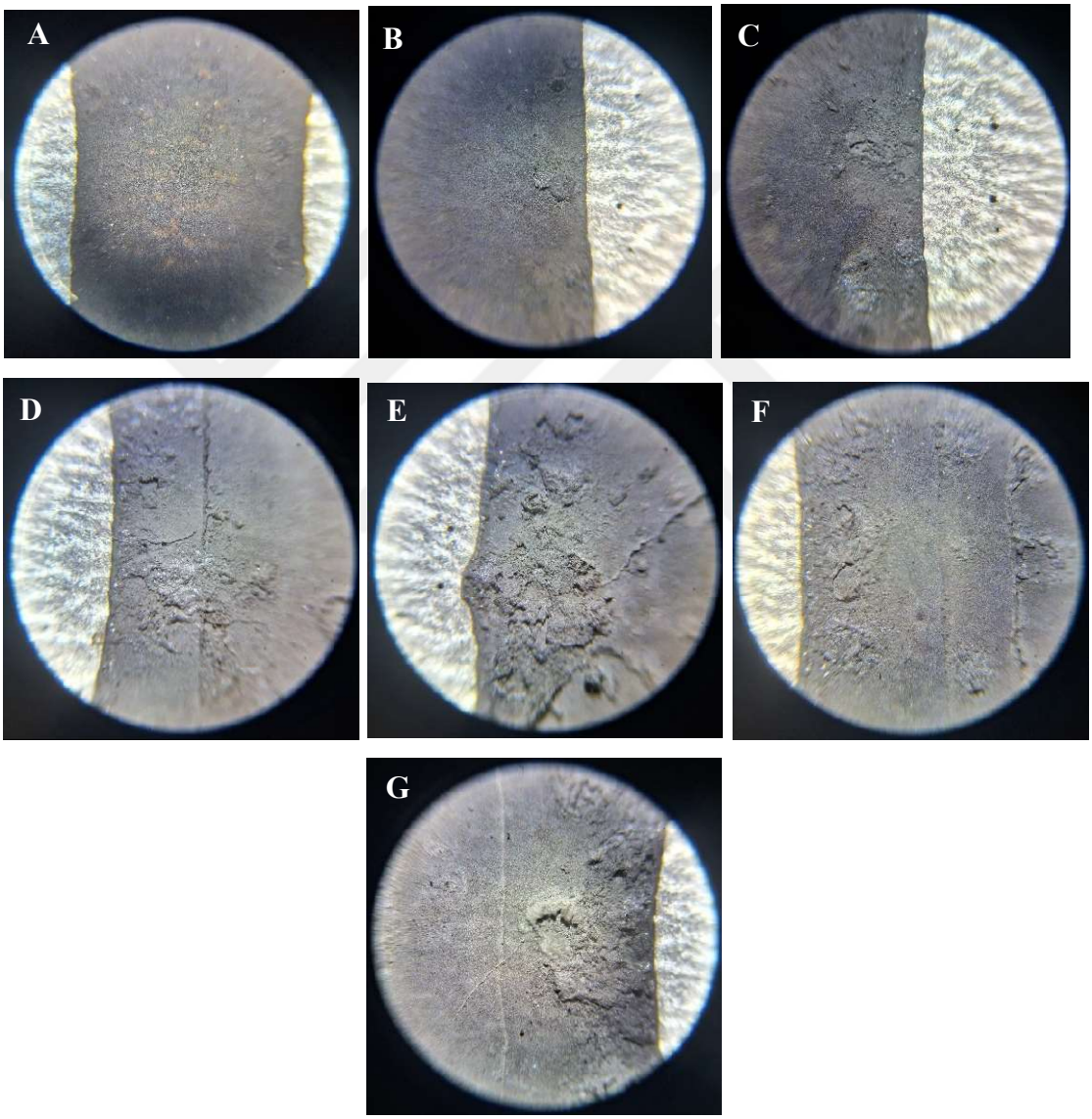
Şekil 4.26. Deney 3: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri ilk katman 1,8 mm olmak üzere yaklaşık 2,2 mm civarındadır, A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

Şekil 4.27'ye bakıldığında hatların daha muntazam ve gümüşün birinci ve ikinci katmanlarda bile daha homoken yayıldığı görülmektedir. Katman sayısı artıkça mürekkebin hat kenarlarından akarak yeni bir hat oluşturduğu gözlemlenebilir. Bozucu değişkenlerin elimine edilmesiyle (tablanın yüzey paralelliği, cihazın terazide olması, parametrelerin birbiriyle kombine çalışabilecek şekilde ayarlanması vb.) damla püskürtme metoduyla uygun desenlerin düşük toleranslarla yüksek iletkenliklerle üretilebilir olduğu görülmektedir.



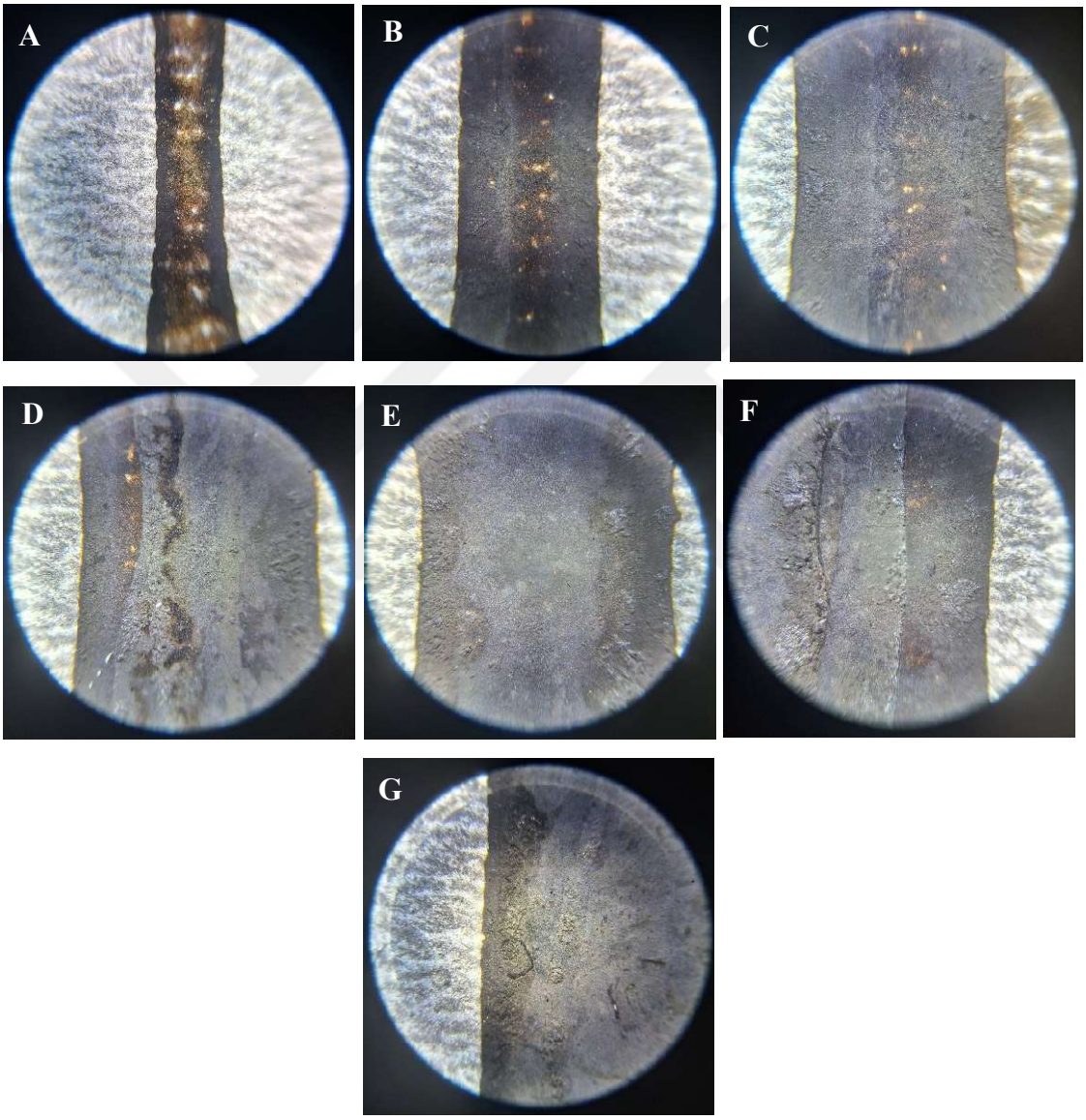
Şekil 4.27. Deney 4: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri yaklaşık 1,8 mm civarındadır, A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

Şekil 4.28'de serme metodu ile 150 mm/dk hız ve %2 gümüş içeriğine sahip mürekkeple basılan elektrotların görselleri verilmiştir. Yavaş ilerleme hızı sebebiyle ve nozulun alttaş ile arasındaki mesafe ile bağlantılıda olarak mürekkebi nozul ağzıyla yaydırması sebebiyle hatlar geniş olmuştur. Yavaş ilerleme sebebiyle hat kenarlarında oluşan birikme sürekli olarak aşılarak yeni hat oluşumu gözlemlenmiştir. Şekil 28f ve d'de durum açıkça gözlemlenebilmektedir.



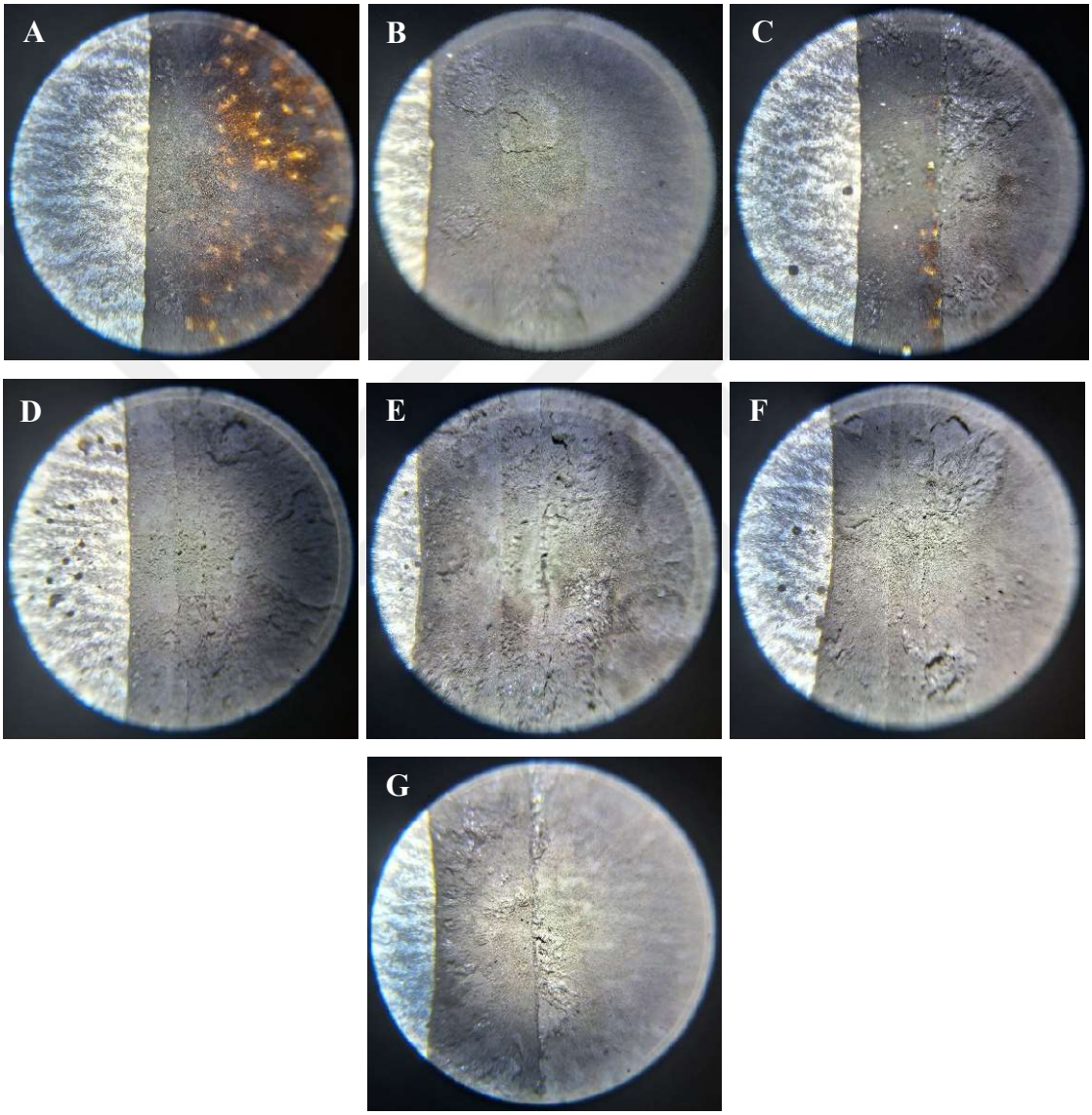
Şekil 4.28. Deney 5: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; **A)** 1 katman, **B)** 2 katman, **C)** 3 katman, **D)** 4 katman, **E)** 5 katman **F)** 6 katman ve **G)** 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

Şekil 4.29'da hız artırılmış ve 300m/dk'ya çıkarılmıştır. Gümüş miktarı sabit tutulmuştur. Hızın artmasıyla ilk katmanların 1,4 mm inceliklere ulaştığı gözlemlenebilir. Fakat düşük gümüş içeriği sebebiyle 4. katmana kadar iletkenliklerde problemlerin olduğu gümüşün yüzeyi tamamıyla kapatamadığı görülmüştür. Katman sayısının artmasıyla kahve etkisiyle oluşan sınırdaki set aşılarak hattın genişlediği görülebilir.



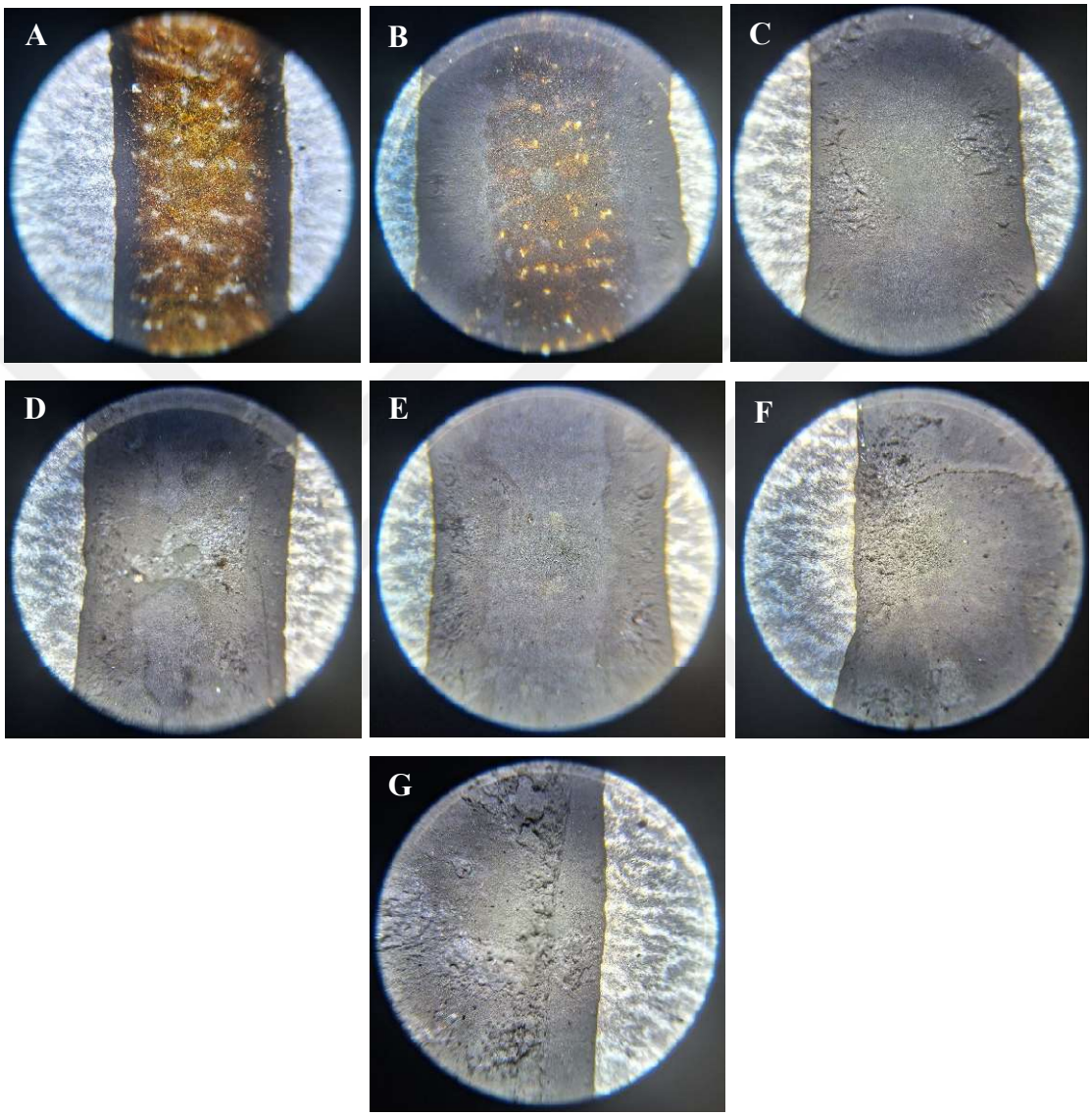
Şekil 4.29. Deney 6: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; **A)** 1 katman, **B)** 2 katman, **C)** 3 katman, **D)** 4 katman, **E)** 5 katman **F)** 6 katman ve **G)** 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

Şekil 4.30'da gümüş içeriği artırılmış (%2,5), hız 150 mm/dk olarak ayarlanmıştır. Hat doğrusallıkları muntazam çıkmıştır. Fakat yavaş ilerleme sebebiyle hat genişliği her katmanda biraz daha genişleme eğilimde olmuştur. Ve genişleyen hat yeni bir iletken yol oluşturarak gümüşün sürekli aynı hatta birikmesini engelleyerek iletkenliğin beklenen ölçüde artmasını engellemektedir.



Şekil 4.30. Deney 7: İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

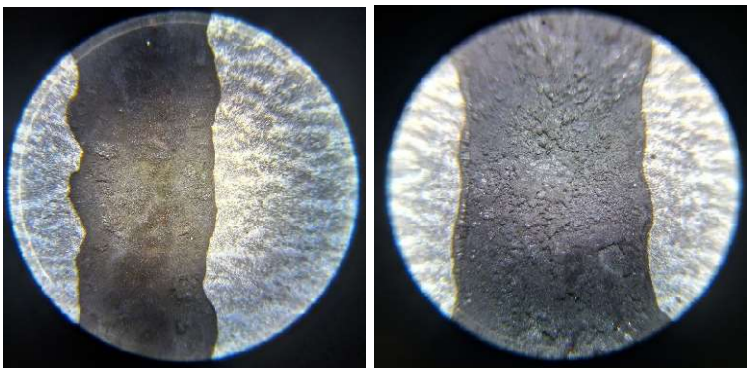
Şekil 4,31 Deney 8'de hız 300mm/dk ve gümüş içeriği %2,5 olarak ayarlanmıştır. Hatların doğrusallığı korunmuştur. Ek olarak önceki parametrelerde gibi katman sayısına bağlı olarak hat genişlemesi ciddi bir şekilde görülmemektedir.



Şekil 4.31. Deney 8: İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü; A) 1 katman, B) 2 katman, C) 3 katman, D) 4 katman, E) 5 katman F) 6 katman ve G) 7 katman üst üste damlatılmış elektrot

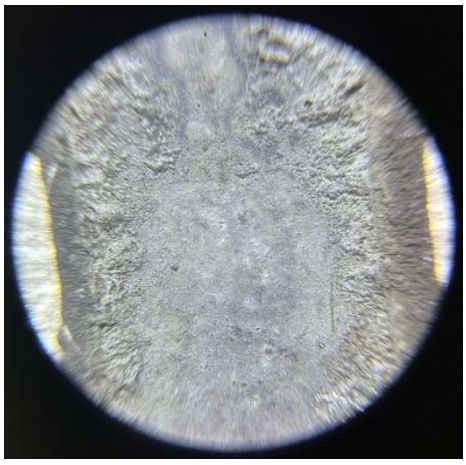
Şekil 4.32'de 300 mm/dk hızla basılmış farklı gümüş oranlarına sahip iki kat damla püskürtülümüş elektrotların 64x büyütülmüş görselleri verilmiştir. Gümüş içeriği artıkça sinterleme esnasında kenarlarda biriken gümüşler set oluşturarak hat doğrusallığını

artırmaktadır. Daha düşük gümüş içeren mürekkepte ise damla hattının doğrusallık kontrolü daha zordur.



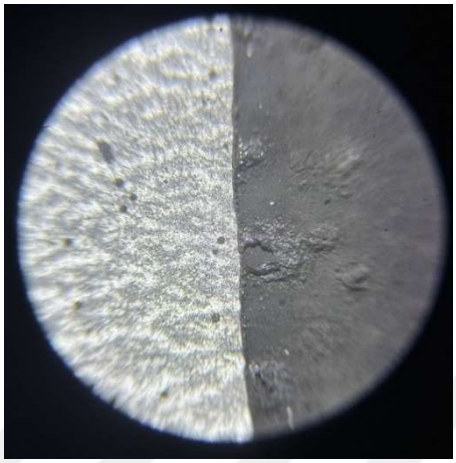
Şekil 4.32. İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi solda %2, sağda %2,5 2 katmanlı olan damlatma metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişlikleri yaklaşık 1,8 mm civarındadır

Şekil 4.33'te serme yöntemiyle %2 gümüş içeriğine sahip mürekkep ile 300 mm/dk hızda 15 kat üst üste mürekkep atılmış elektrotun mikroskop görüntüsü verilmiştir. Hat kenarlarına gümüş parçacıkların biriktiği net bir şekilde görülebilmektedir. Serme tekniğinde alttaş ile nozul arasındaki mesafenin iyi ayarlanması gümüşlerin kenarlarda birikmesi sorunu bir miktar azaltabilir. Hattın doğrusallığı gayet iyi ve kenar dalgalanmaları çok azdır.



Şekil 4.33. İlerleme hızı 300 mm/dk ve gümüş derişimi %2 olan serme metodu ile yapılan görselin 64x büyütülmüş görüntüsü, hat genişliği takribi 3 mm ve 15 kat atılmış hattın görseli ve kahve lekesinin incelenmesi

Şekil 4.34'te 150 mm/dk da serme tekniği ile yapılmış bir elektrotun sol kenarı mikroskopla incelenmiştir. Hızın düşmesiyle yüzeyde biriken mürekkep hattın kenarla çok az düzeyde dalgalanmalara sebep olmaktadır.



Şekil 4.34. İlerleme hızı 150 mm/dk ve gümüş derişimi %2,5 olan serme metodu ile basılan tek katmanlı hattın görselin 64x büyütülmüş görüntüsü ile hat doğrusallığının incelenmesi

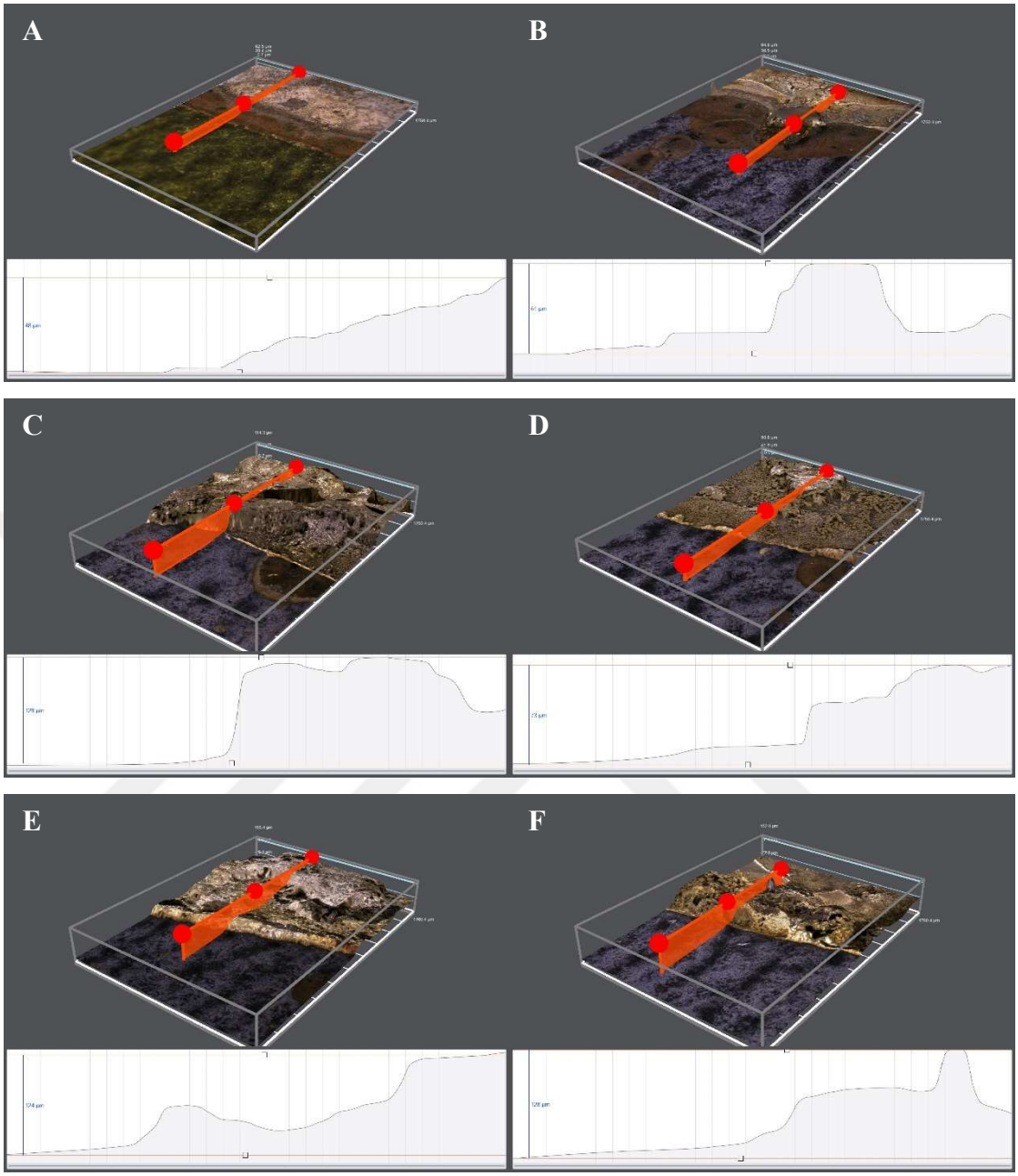
Şekil 4.35'de %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 1 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş Deney 1 sonucundaki elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi optik profilometre ile görüntülenmiştir. İlk katmanda belirgin bir doku görünmediği için ilk katmanların görselleri değerlendirmeye alınmamıştır. Görseller incelendiğinde kenar geometrilerinde doğrusallık bozuktur. Genel olarak belirgin kahve lekesi etkisi, kenarlarda gümüş birikmesi görülmemektedir. Bazı noktalarda birikme görülse de genel yükseklik kabul edilebilir şekilde doğrusaldır. Katmanlara bağlı kalınlık değerlerindeki değişim incelendiğinde direnç düşüşleriyle uyumlu olduğu ve katman arttıkça kalınlığın arttığı görülmektedir. Elektriğin geçtiği kesit alanı artıkça direnç değeri ters orantılı olarak düşmekte ve iletkenlik artmaktadır.

Şekil 4.36'e baktığımızda hız artırılmış ve gümüş oranı sabit tutulmuştur. Kenar doğrusallığı 150 mm/dk göre daha düzgün görünmektedir. Şeklin B, C, E görsellerinde kenar hatlarında yükseltiler görünmektedir. Bu durum kahve lekesi oluşumunu gösterse de elektrot profilin tamamı düşünüldüğünde bölgesel topaklanmalar olsa da ciddi bir

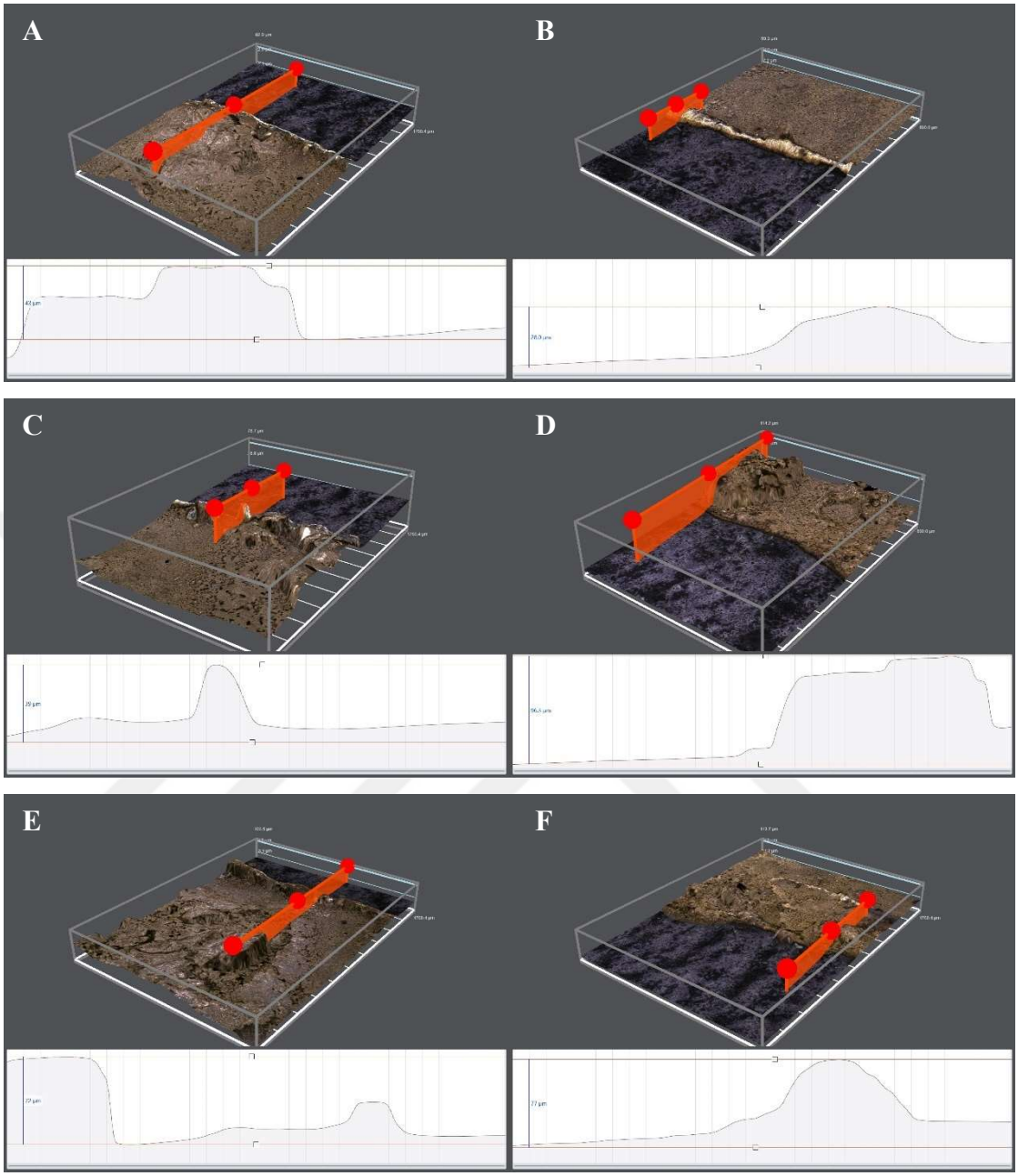
kahve lekesi olgusundan bahsedilemez. Kalınlıktaki değişim genel olarak dengeli gittiği görülebilir. Yüzey profiline bakıldığında ani kenar yükselmesi ve bu yükselmeden sonra ciddi düşüşler görünmez. Zaman zaman bölgesel gümüş birikmeleri olsa da ortalama profil yüksekliğine baktığımızda 15-25µm arasında seyrettiği ve yeterli gümüş genişliği ve yüksekliği olmamasından dolayı direnç değerlerinin diğer deneyler yanında Deney 2'nin yüksek kaldığı görülebilir.

Şekil 4.37'de gümüş oranı %2,5, ilerleme hızı 150 mm/ dk ve damla püskürtme yöntemi kullanılmıştır. Deney 3'te Deney 2'ye göre gümüş oranı artırılmış ve hız düşürülmüştür. 2 ve 3 katmanlı yapılar dengeli bir dağılım gösterse de 4 katmandan sonra hat kenarlarında gümüş birikimi artmıştır. Zaman zaman mürekkep Şeklin C bendinde 5 katmanlı yapıda net görülebilen yavaş ilerleme etkisiyle kenara biriken gümüşün üzerinden akarak yayıldığı görülmektedir. Damla püskürtme yönteminde yığılan gümüşlerin hatlarına dikkatli bakıldığında içe doğru kavisli yapılar olduğu ve hat boyunca paralel yayılmadıkları görülebilir. Bu durum belirgin kahve lekesi dezavantajını kırmakta ve iletken kalın duvarların iç bölgelere damlacık çapı boyunca taşınmasına yol açar. Bu sebeple damla püskürtme tekniğinde genel olarak orta noktalardan alınan direnç ölçümleri ile kenarlardan alınan direnç ölçümleri benzer çıkmıştır. Deney 3'te genel olarak hattın üzerinden taşan sıvı sebebiyle hattın doğrusallığı bozularak dalgalı bir kenar çizgisi elde edilmesine yol açmıştır.

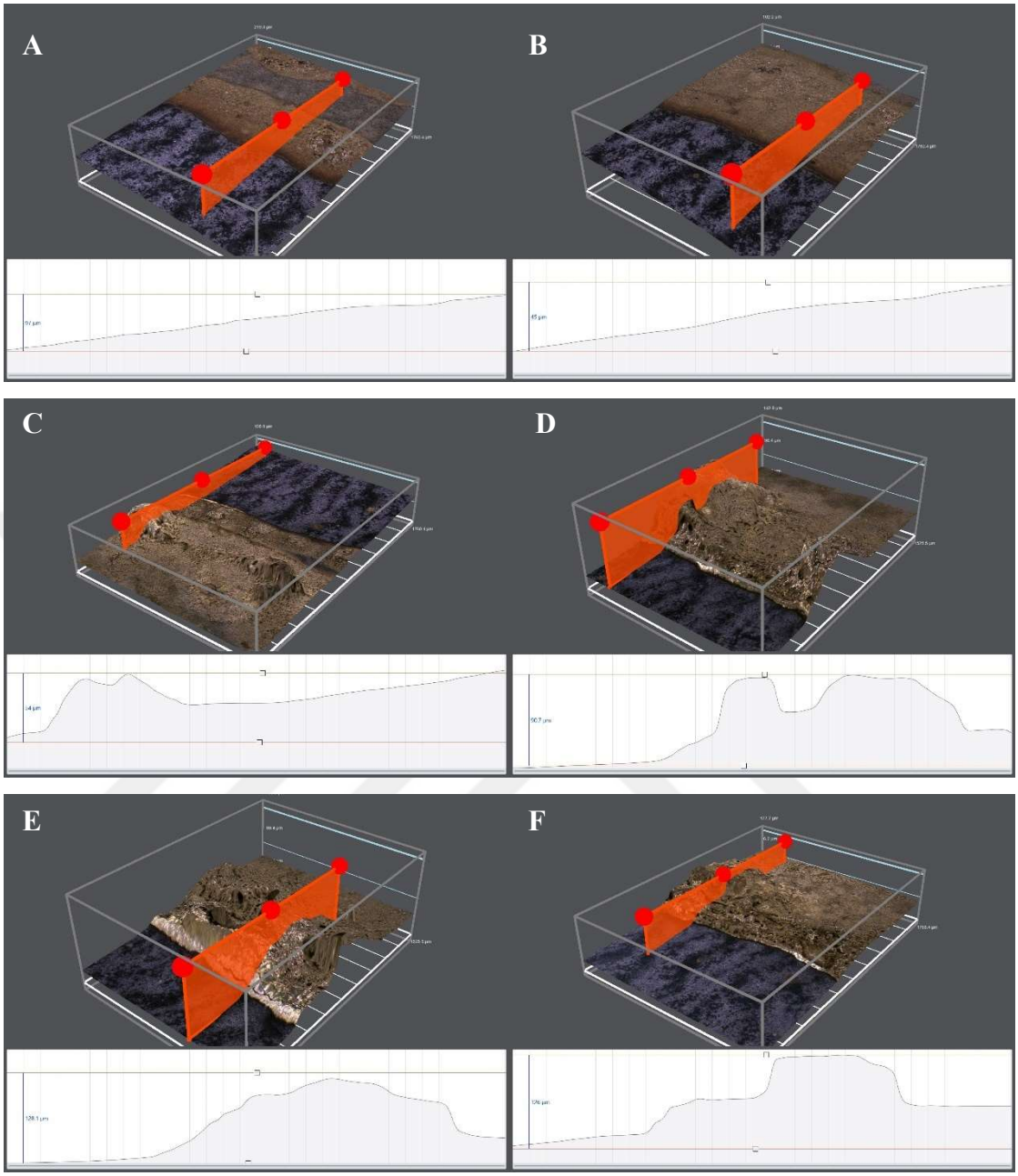
Şekil 4.38'de gümüş oranı %2,5 ve ilerleme hızı 300 mm/dk olacak şekilde damla püskürtme yöntemi kullanılmıştır. Elektrot hattı kenarları doğrusal görünmektedir. Kenarlarda genel olarak gümüş birikmesi gözlemlenmemiştir. Gümüş kahve etkisine ters bir şekilde merkez hattında birikmeye eğilimlidir. 5 katmandan sonra bölgesel topaklanmalara rastlansa da gümüş genel olarak hat boyunca dengeli yayılmıştır. Kenarlardan merkez çizgisine doğru lineer bir kalınlık artışı gözlemlenir. Deney 4'ün iki katmanlı olan elektrotun direnç değerlerine bakıldığında durum net olarak gözlemlenebilir. Kenarlar 3 ohm ve üzeri çıkmış iken orta hat 2,354 ohm çıkmıştır.



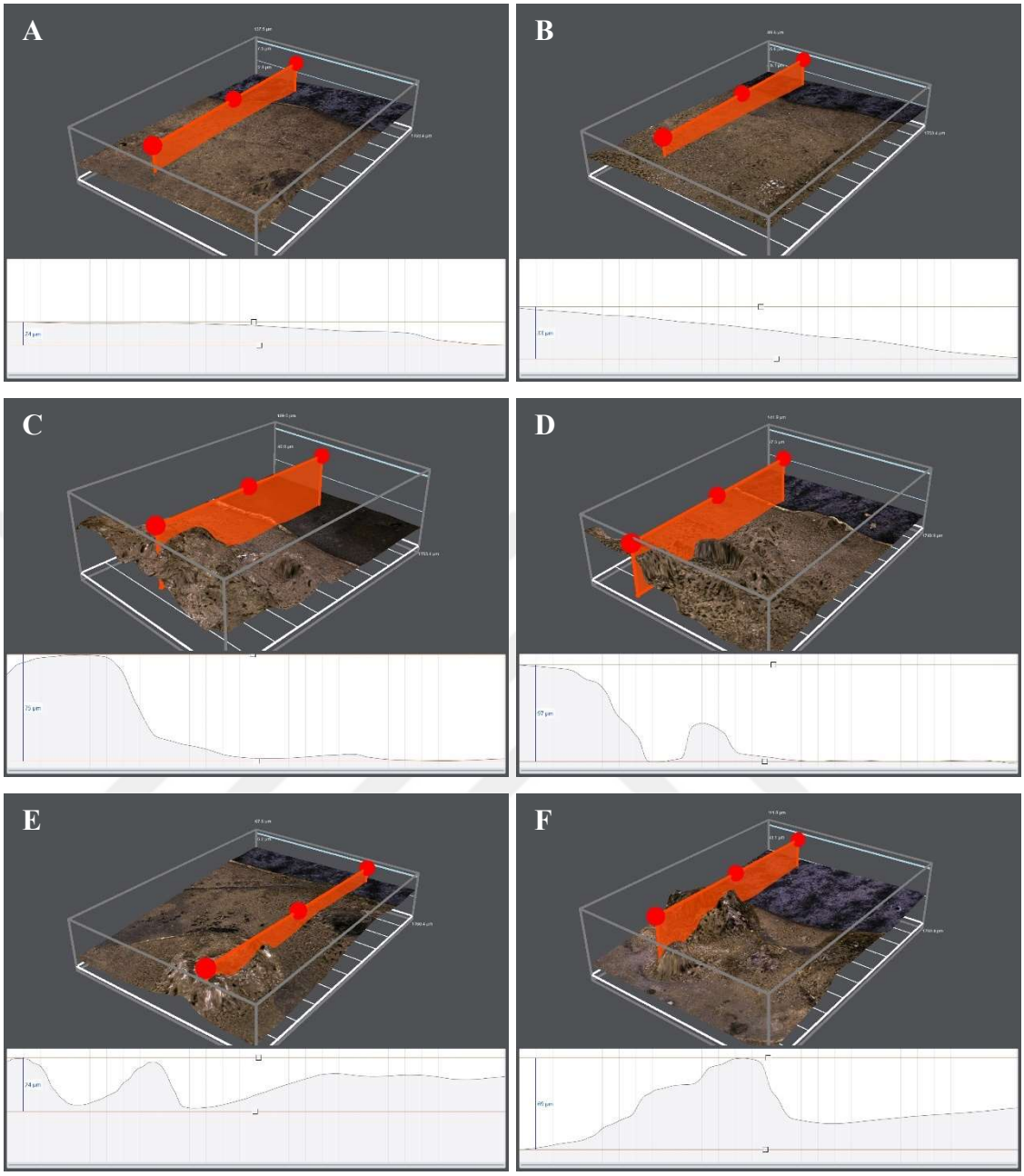
Şekil 4.35. Deney 1: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 2 katman **B)** 3 katman **C)** 4 katman **D)** 5 katman **E)** 6 katman **F)** 7 katman



Şekil 4.36. Deney 2: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 2 katman **B)** 3 katman **C)** 4 katman **D)** 5 katman **E)** 6 katman **F)** 7 katman



Şekil 4.37. Deney 3: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 2 katman **B)** 3 katman **C)** 4 katman **D)** 5 katman **E)** 6 katman **F)** 7 katman



Şekil 4.38. Deney 4: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan damla püskürtme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 2 katman **B)** 3 katman **C)** 4 katman **D)** 5 katman **E)** 6 katman **F)** 7 katman

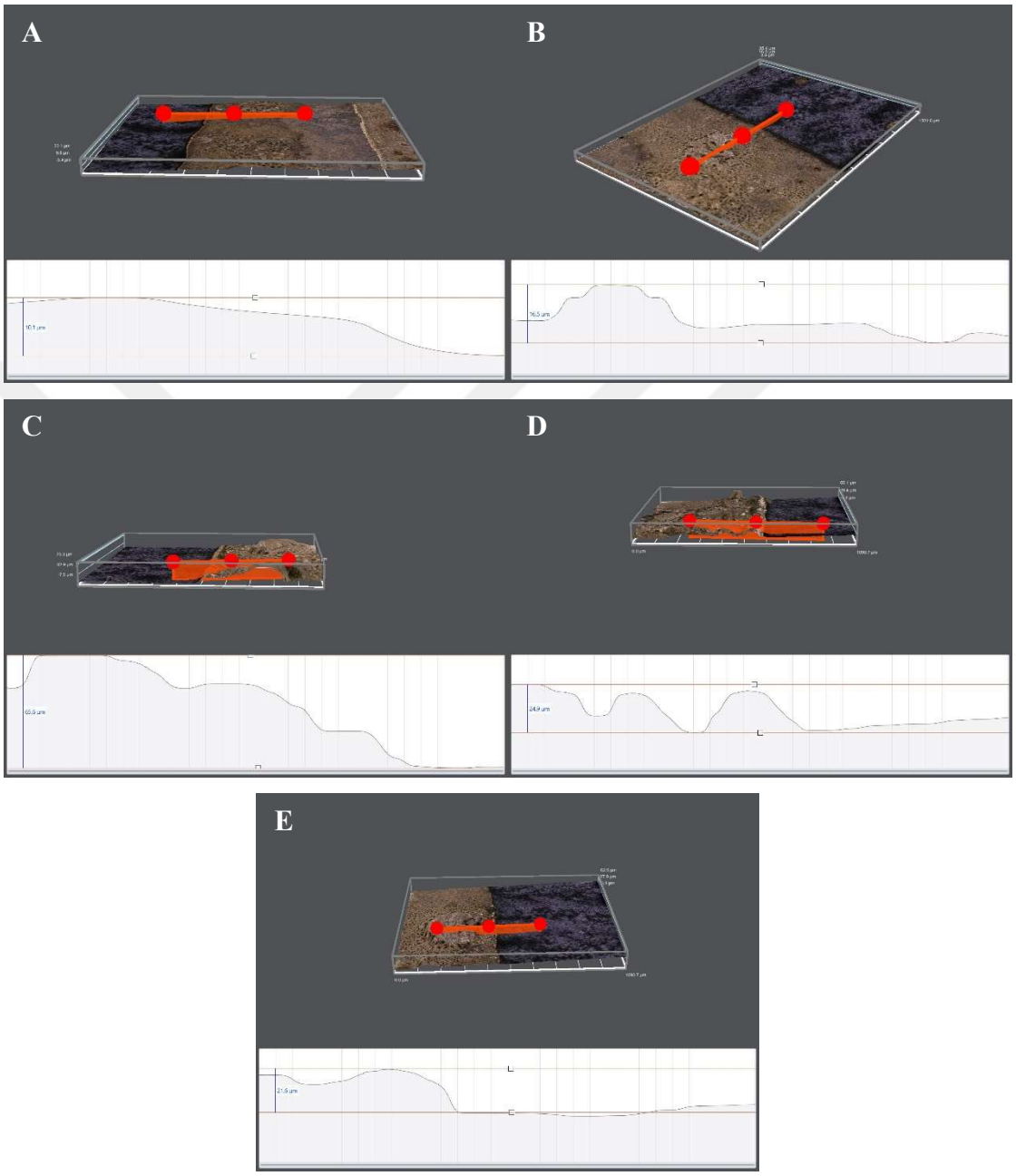
Şekil 4.39'de Deney 5'in katman 3 ten başlayan yüzey profili görselleri verilmiştir. %2 gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotlar bu deneyde yapılmıştır. Hat kenarlarının doğrusallığı

çoğunlukla muntazamdır. Yavaş hız ve yüksek debi sebebiyle üzerine gelen yeni katmanlar sınırları aşarak yayılma eğilimi göstermiştir. Şeklin A şıkkında bu durum net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Hat yayıldığı için genel olarak gümüş kalınlığı 20µm civarında sınırlı kalmıştır. Şekil 4.40'ta %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kırmızı renkle seçilen hat boyunca kalınlık bilgisi verilmiştir. Deney 5'e göre Deney 6'da hız artırılmıştır. Bu sebeple hatlarda hat üstünden atlayarak ikinci yayılma durumu görülmemektedir. Yükseklik genel olarak dengelidir. Fakat düşük gümüş içeriği, hızlı ilerleme ve nozulun büyük oluşundan dolayı geniş hat sinterlendiğinde gümüşün yeterli miktarda bütünlük sağlamasını engellemektedir. İnce hat sebebiyle bölgesel gümüş hattının bütünlüğünün kaybetmesi muhtemeldir. Direnç değerlerine de bakıldığında 7. katmana kadar iletkenliğin ölçülmesinde problemlerle karşılaşılmıştır.

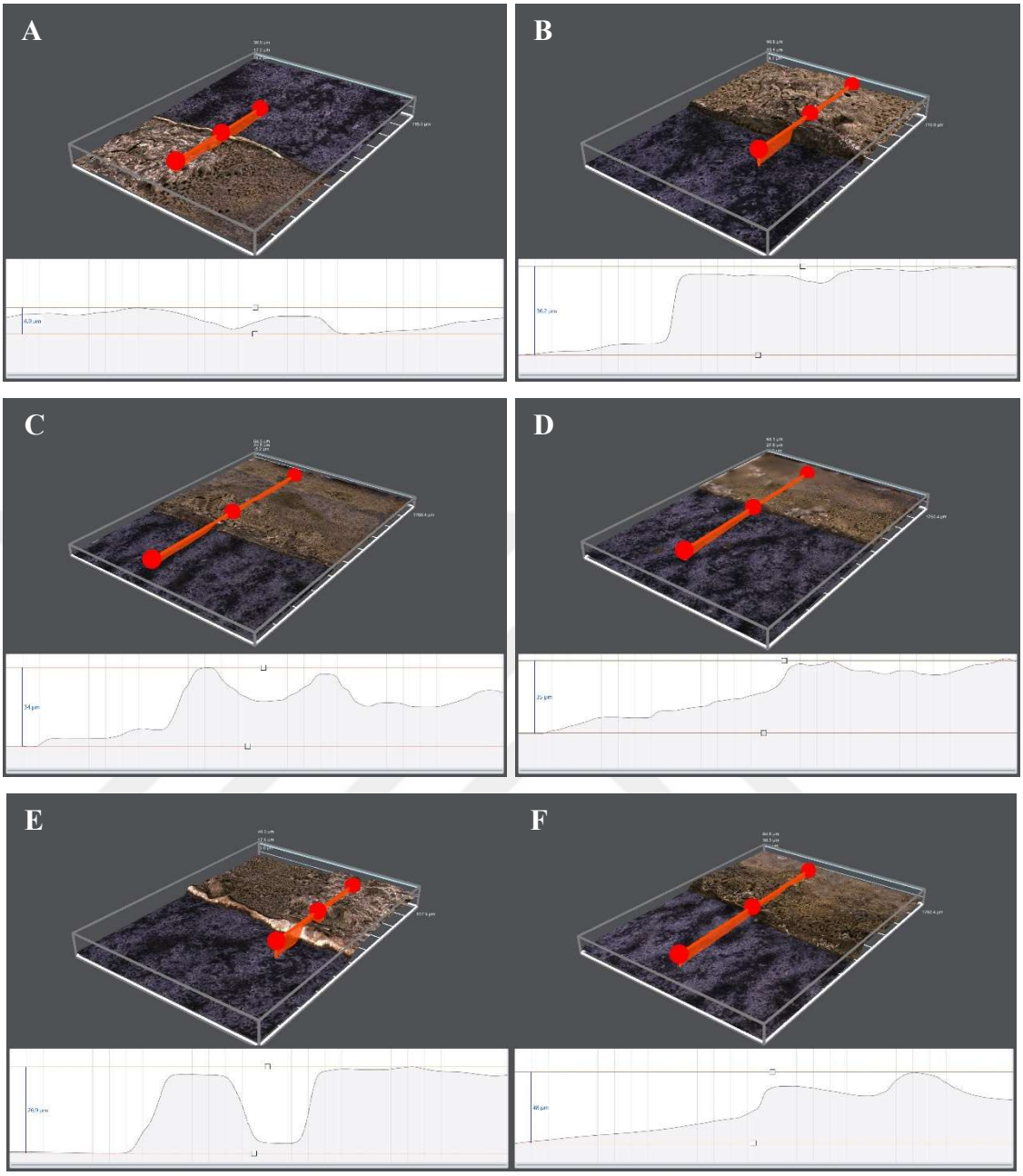
Şekil 4.41'te %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi verilmiştir (Deney 7). Hızın düşük (150 mm/dk) olmasından dolayı hat yayılma eğilimi göstermektedir. %2 gümüş içeren ve 150 mm/dk hızla basılan Deney 5'te karşılaşılan önceki hattın üzerinden akarak genişleyen hat Deney 7 görsellerinde gümüş yoğunluğunun fazla olmasından dolayı daha net bir şekilde görülmektedir. Kenarda birikmiş gümüşün üzerinden atlayan yeni sürülen mürekkep vadi yaparak tekrar ikinci sınırda birikme eğiliminde olmuştur. Bu durum Şeklin C ve D şıklarında net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Ortalama hat yükseklikleri 4 katmandan sonra 40µm ve üzerine çıkmıştır.

Şekil 4.42'de %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi (Deney 8) verilmiştir. Bu Deneyde genel olarak hat muntazam ilerlemiştir. Bazı katmanlarda kenarda birikme görülse de yerel topaklanmalardan ziyade sabit bir hat genişliği gözlemlenmektedir. Katman sayısına bağlı katman yüksekliği artış göstermiştir. Direnç değerleriyle karşılaştırıldığında bu

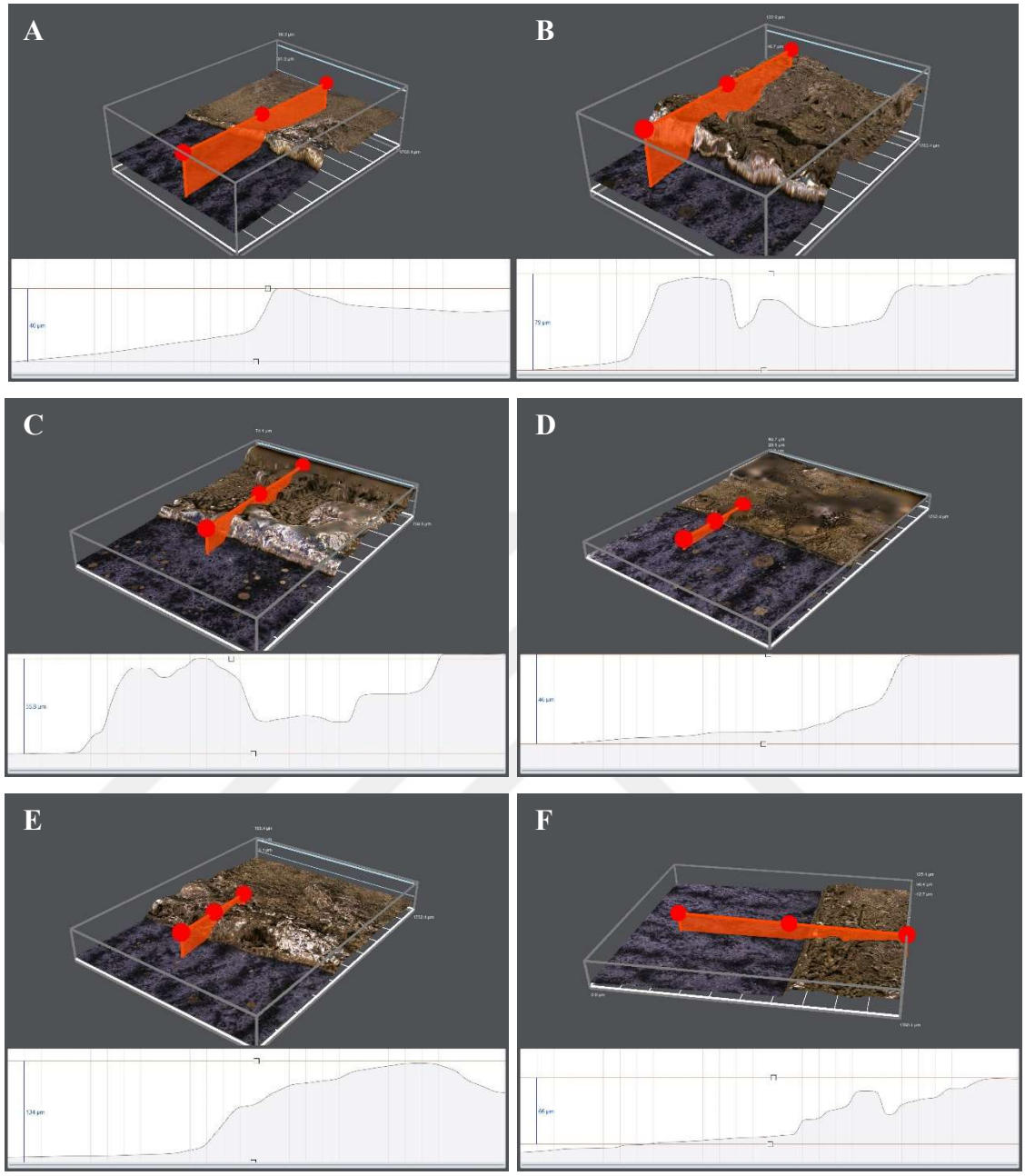
durum uyuşmaktadır. Kahve lekesi oluşumuna diğer deneylere nazaran bu deneyde çok nadir rastlanmıştır. Genel olarak sabit bir hat yüksekliği vardır.



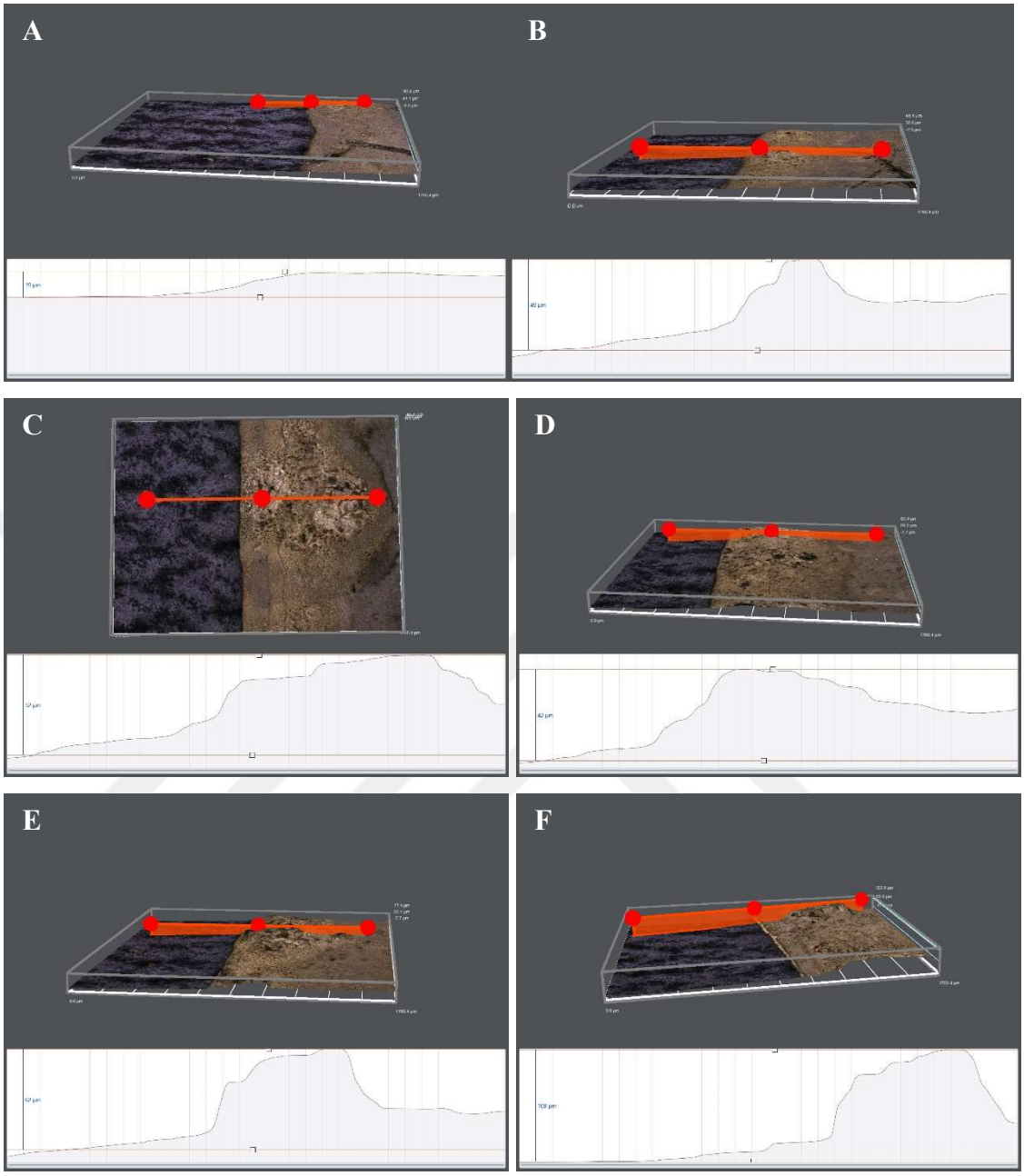
Şekil 4.39. Deney 5: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 3 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 3 katman **B)** 4 katman **C)** 5 katman **D)** 6 katman **E)** 7 katman



Şekil 4.40. Deney 6: %2 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 2 katman **B)** 3 katman **C)** 4 katman **D)** 5 katman **E)** 6 katman **F)** 7 katman



Şekil 4.41. Deney 7: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 150 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 2 katman **B)** 3 katman **C)** 4 katman **D)** 5 katman **E)** 6 katman **F)** 7 katman



Şekil 4.42. Deney 8: %2,5 Gümüş ihtiva eden parçacıksız mürekkep ile sırasıyla 2 katmandan 7 katmana kadar olan serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla basılan 135°C sinterlenmiş elektrotun yüzey geometrisi ve kalınlık bilgisi **A)** 2 katman **B)** 3 katman **C)** 4 katman **D)** 5 katman **E)** 6 katman **F)** 7 katman

Çizelge 4.11'de katman sayısına bağlı profilin pik yaptığı yükseklik değerleri µm cinsinden verilmiştir. Genel olarak katman sayısına bağlı olarak piklerde artış görülmektedir. Ortalama profil yüksekliğinin üzerine yığılma oluştuğu için pik değerlerin incelenmesiyle ortalama profil yüksekliği hakkında da değerlendirme yapmak mümkün

olabilmektedir. Ayrıca pik değerleri ve katman sayısı beraber değerlendirildiğin de topaklanma ve bölgesel yığılmaların olup olmadığı daha net anlaşılabilmektedir. Ufak dalgalanmalarla beraber Deney 8'in (Serme, F300, ve %2,5 gümüş) daha stabil bir yükseklik profili çizdiği ve daha dengeli parametreler içerdiği söylenebilir. Direnç düşüşü ve profil yüksekliği Deney 8 için tutarlılık gösterir. Benzer tutarlılık Deney 4 (Damla, F300 ve %2,5 gümüş)'te de görülse de 6 katmanlı yapıda ani bir düşüş göstererek tutarlılığı bozmuştur. Genel olarak damla püskürtme yönteminde de serme yönteminde de 300 mm/dk ve %2,5 gümüş içeriği iyi sonuç veren değer olmuştur.

Çizelge 4.11. Yöntem, basım hızı, gümüş içeriği ve katman sayısına göre 30 mm uzunluğundaki 135°C sinterlenmiş numunelerin optik profilometre ile yükseklik (µm) ölçüm değerleri

Basım Özellikleri			Katman Sayısısına Bağlı Profilin Pik Yaptığı Yükseklik Değerleri (µm)					
Yöntem	**Hız (mm/dk)**	**Gümüş Oranı (%)**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Damla	F150	2,0%	48,000	61,000	129,000	73,000	124,000	128,000
Damla	F300	2,0%	52,500	29,000	39,000	96,300	72,000	77,000
Damla	F150	2,5%	97,000	45,000	54,000	90,700	128,100	126,000
Damla	F300	2,5%	24,000	33,000	75,000	97,000	24,000	69,000
Serme	F150	2,0%	-	10,100	16,500	65,600	24,900	21,600
Serme	F300	2,0%	8,000	36,200	34,000	35,000	26,900	48,000
Serme	F150	2,5%	40,000	79,000	55,800	46,000	134,000	66,000
Serme	F300	2,5%	19,000	49,000	52,000	42,000	62,000	109,000

4.6. Katmanlar Arası Soğuk Plazma Uygulanmış Elektrotların Performansları

Katmanlar arasına çekilen soğuk plazmanın etkisini görebilmek için 3 deney planlanmıştır. Plazma 1 deneyinde plazma uygulanmadan 5 katmanlı 300 mm/dk hızda serme yöntemiyle %2,5 gümüş içeriğine sahip mürekkep ile 200 mm uzunluğunda bir elektrot oluşturulmuştur. Plazma 2 deneyinde 3,5 watt plazma gücünde 9 l/dk argon gazı debisinde plazma nozulunun ucu alttaştan 2 mm yukarıda olacak şekilde plazma ilerleme hızı 1 mm/sn olacak şekilde 5 katmanlı 300 mm/dk hızda serme yöntemiyle %2,5 gümüş içeriğine sahip mürekkep ile 200 mm uzunluğunda cihazın izin verdiği en düşük güç içeriğinde bir elektrot oluşturulmuştur. Plazma 3 deneyinde 25 watt plazma gücünde 9 l/dk argon gazı debisinde plazma nozulunun ucu alttaştan 1 mm yukarıda olacak şekilde plazma ilerleme hızı 0,5 mm/sn olacak şekilde 5 katmanlı 300 mm/dk hızda serme

yöntemiyle %2,5 gümüş içeriğine sahip mürekkep ile 200 mm uzunluğunda cihazın izin verdiği en yüksek güç içeriğinde bir elektrot oluşturulmuştur. Şekil 4.43'de deney sonucunda ortaya çıkan elektrotların görseli verilmiştir.



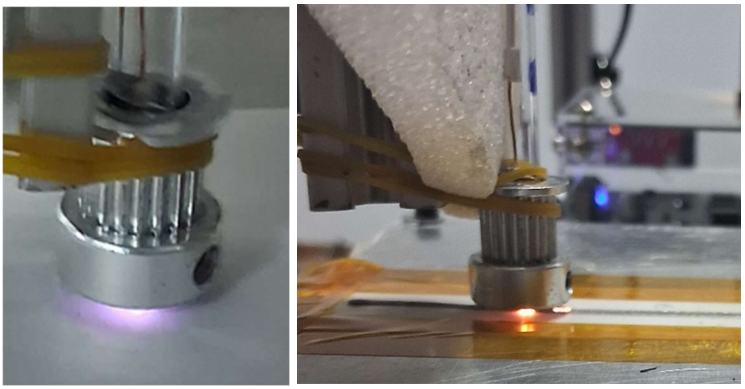
Şekil 4.43. Plazma deneylerinin görselleri

Elektrotlar incelendiğinde yüksek güce sahip Plazma 3 deneyinde elektrotun genişliğinin fazla olduğu görülmektedir. Plazma 2 deneyi görseli incelendiğinde kahve lekesi oluşumunun en az bu deneyde oraya çıkmıştır. Plazma 1 deneyinde kahve lekesi belirgin bir şekilde görülürken Plazma 3 deneyinde soğuk plazma uygulanmayan Plazma 1 deneyine nazaran daha az bir kahve lekesi oluşumu görülmektedir. Deney sonucu düz elektrotlarda ölçülen değerler Çizelge 4.12'de verilmiştir. Direnç değerleri incelendiğinde Güçlü soğuk plazmanın uygulandığı Plazma 3 deneyinde direnç değeri yüksek çıkmıştır. Yüksek güçlü soğuk plazma uygulaması sırasında ilk iki katmanın basılması sırasında basılı elektrot yolunda parlamalar oluşmaktadır. J. Kim vd. (2021) yaptıkları çalışma yaban mersinlerinin saklama ömrünü uzatmak için gümüş nanoparçacıklı mürekkeple kare desenlerden oluşan bir elektrot desenine yüksek voltaj verilerek soğuk plazma oluşturulması ve bu soğuk plazmanın yaban mersinlerine uygulanmasını içerir. Bu çalışmada gümüş yollar 6 dakika gibi bir sürede korozyona uğrayarak kullanılmaz hale gelmiştir. Plazma 3 deneyinde 0,5 mm/sn hız ile ilerleyen soğuk plazma nozulu 6,67 dk

boyunca 1mm mesafeden 25 W değerindeki soğuk plazmaya maruz bırakılmıştır. Bu uygulama esnasında elektrota voltaj atlaması olduğu çıkarımı yapılmıştır. Bu sebeple elektrotta korozyon meydana gelerek direnç değerinin yüksek çıktığı Şekil 4,43'te verilen görsel de incelenerek elektrottaki siyahlıklara bakılarak tespit edilebilir. Şekil 4.44'da güç ve mesafe farkı sebebiyle plazmanın aldığı renk değişimi verilmiştir. Düşük güç kullanılmış Plazma 2 deneyinde direnç değeri plazmasız ile neredeyse aynı gelmiştir. Fakat Şekil 4.42'de de görüleceği üzere Plazma 2 deneyine elektrottaki gümüş yayılımı dengelidir. Katmanlar arasına atılan düşük güçteki plazma kahve lekesinin önüne geçerek elektrot boyunca homojen bir dağılım oluşmasını sağlamıştır.

Çizelge 4.12. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmış plazma deneylerinden elektrotun sağ, orta ve sol kısımlarından ölçülen direnç değerleri

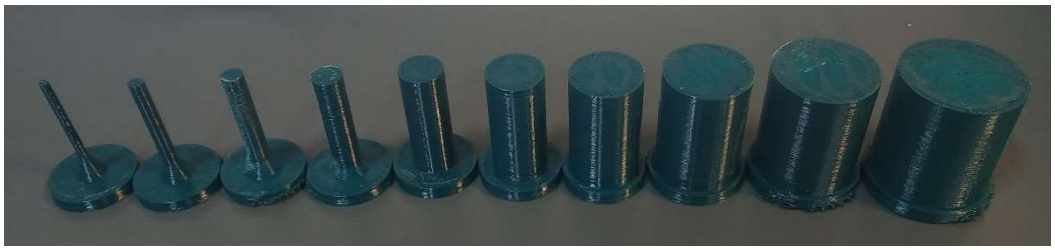
Deney Numarası	Plazma Gücü (watt)	Direnç 1 (ohm)	Direnç 2 (ohm)	Direnç 3 (ohm)
Plazma 1	-	3,448	920	3,442
Plazma 2	3,5	3,537	5,914	3,608
Plazma 3	25	6,404	1500	6,227



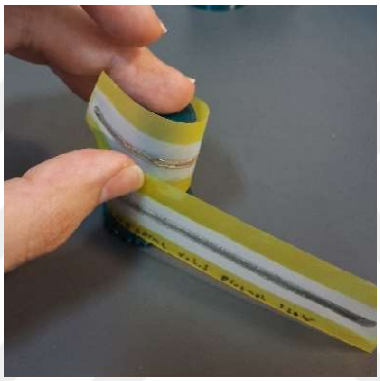
Şekil 4.44. Solda Plazma 2 deneyindeki 3,5 W plazmanın görseli; sağda Plazma 3 deneyindeki 25 W plazmanın görseli

Şekil 4.45'te 10 adet olmak üzere 3-5-7-10-15-20-25-30-35-40 mm çaplı silindirlerin görseli verilmiştir. 200 mm uzunluğunda 5 katman olarak üretilen plazmasız ve katmanlar arasına 3,5 W ile 25 W plazma uygulanmış elektrotlar bu silindirlere tek tur olacak şekilde

sarılmış ve hassas multimetre ile direnç ölçümü yapılmıştır. Şekil 4.46'da silindire sarılmış elektrotun bir görseli verilmiştir.



Şekil 4.45. Bükülme çapı direnç değişimi deneyi için üretilmiş silindirler



Şekil 4.46. Bükülme çapı deneyi için 200 mm elektrotun tek tur silindire sarılmış elektrotun görseli

Plazma uygulanmamış Plazma 1 deneyinin orta hattında direnç 900 ohm gibi bir değere çıktığı için Çizelge 4.13'te ölçüm değerleri içerisine alınmamıştır. Bazı orta noktalarda ise iletkenlik ölçülememiştir. Silindire sarma deneyi sonunda tekrar ölçülen orta hattın değeri 1200 ohm'a yükselmiştir. Genel olarak direnç değerleri Sağ ve sol hattın direnç değeri 30 mm çaplı silindirden sonra belirgin bir artış göstererek 1 ohm artış görülmüştür. Diğer ciddi artış ise 3 mm çapta gerçekleşmiştir. Deneyler sonucunda düz hale getirilen elektrot tekrar ölçüldüğünde ortalama 3,445 Ω gelen direnç değeri 5,100 Ω'a olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi olarak elektrot bütünlüğünün dönme sebebiyle bazı noktalarda bozulduğu söylenebilir.

Çizelge 4.13. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmamış Plazma 1 deneyi sonucun oluştururken 200 mm uzunluğundaki elektrotun silindirlere sarıldıkları sırada sağ ve sol kısımlarından ölçülen direnç değerleri

Plazma 1 Deneyi Elektrotu (0 W)			
Silindir Çapı (mm)	**Direnç 1 (ohm)**	**Direnç 3 (ohm)**	**Ortalama (ohm)**
Düz	3,448	3,442	3,445
40	3,602	3,682	3,642
35	3,660	3,733	3,697
30	3,822	3,841	3,832
25	4,752	4,832	4,792
20	4,865	4,960	4,913
15	5,982	6,013	5,998
10	6,110	6,308	6,209
7	6,103	6,202	6,153
5	6,448	6,430	6,439
3	7,632	8,102	7,867
Deney Sonu Düz	4,976	5,223	5,100

3,5 W değerinde düşük güçlerde plazma uygulanmış Plazma 2 deneyinin orta hattında direnç 5-6 ohm gibi bir değerleri arasında kalmıştır. Bu durum düşük güçlü plazma uygulamasının homojenliği artırdığı söylenebilir. Çizelge 4.14'te ölçüm değerleri verilmiştir. Genel olarak direnç değerleri plazmasıza benzer şekilde sağ ve sol hattın direnç değeri 30 mm çaplı silindirden sonra belirgin bir artış göstererek 1 ohm artış olmuştur. Orta hatta kademeli yükseliş varken kenar hatlarda ani yükselişin olması kenar hattında biriken gümüşlerin tarafsız eksenden uzaklığı artarak belirli bir dönüş çapında kırılma meydana gelmesi olarak yorumlanabilir. Bu durum kenar hattında deneyler sonucunda düz hale getirilen elektrot tekrar ölçüldüğünde ortalama 3,573 Ω gelen direnç değeri 5,057 Ω'a düştüğü görülmüştür. Bu değer 30 mm ve 25 mm çaplı değerler arasına tekabül etmektedir. Bu sebeple bu değerler arasında elektrot bütünlüğünün dönme sebebiyle bazı noktalarda belirli miktar bozulduğu fikrini güçlendirir.

Çizelge 4.14. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmış Plazma 2 deneyi sonucun oluştururken 200 mm uzunluğundaki elektrotun silindirlere sarıldıkları sırada sağ, orta ve sol kısımlarından ölçülen direnç değerleri

Plazma 2 Deneyi Elektrotu (3,5 W)				
Silindir Çapı (mm)	**Direnç 1 (ohm)**	**Direnç 2 (ohm)**	**Direnç 3 (ohm)**	**Ortalama (ohm)**
Düz	3,537	5,914	3,608	3,573
40	3,827	6,110	3,723	3,775
35	4,312	5,820	4,223	4,268
30	4,723	6,103	4,812	4,768
25	5,813	6,112	5,782	5,798
20	5,882	6,611	5,894	5,888
15	5,954	6,633	6,121	6,038
10	5,572	6,445	6,213	5,893
7	5,887	6,110	6,002	5,945
5	5,988	6,311	6,182	6,085
3	6,328	6,653	6,448	6,388
Deney Sonu Düz	5,006	6,382	5,108	5,057

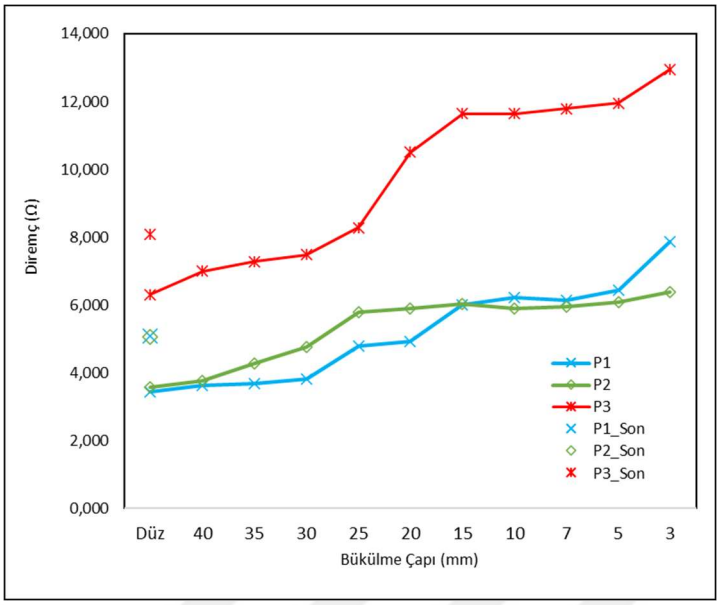
25 W yüksek güçte plazma uygulanmış Plazma 3 deneyinin orta hattında direnci 1,5 MΩ mertebelerinde ölçülmüştür. Plazma 1 deneyine kıyasla iletkenliğin tamamen koptuğu bir alan olmamış ve ölçüm her noktadan yapılabilmiştir. Silindire sarma deneyleri sonucunda tekrar düz bir şekilde ölçülen orta hattın direnç değeri 2,8 MΩ değerlerinde olmuştur. Plazma 1 ve Plazma 2 değerlerine göre 6,316 ohm ile direnç en yüksek çıkmıştır. Bu durum yüksek güçlü korona deşarj plazmanın daha önceden de bahsedildiği gibi ilk katmanlardaki ince yolları aşındırdığı yönündedir. Ek olarak çizgi hattı genişliği daha yüksek olmuştur. Çizelge 4.15'de ölçüm değerleri verilmiştir. İlk ani artış Plazma 3 deneyinde önceki deneylere nazaran daha düşük bir çapta 20-25 mm çapında görülmüştür. Bu durumun açıklaması iletken yol genişliğinin artmış olmasından dolayı tarafsız eksene olan uzaklığın azalması ve bu nedenle kırılmanın daha geç oluştuğu yönündedir. Kenar hattında deneyler sonucunda düz hale getirilen elektrot tekrar ölçüldüğünde ortalama 6,316 Ω gelen direnç değeri 8,071 Ω'a düştüğü görülmüştür. Bu değer 30 mm deneyinde ve 25 mm çaplı değerler arasına tekabül etmektedir. Bu sebeple bu değerler arasında elektrot bütünlüğünün dönme sebebiyle bazı noktalarda belirli miktar bozulduğu fikrini güçlendirir. Orta hattın ince olmasına rağmen yine de direnç kaybı yaşaması ilk katmanların iletkenliğini kaybetmesine ve bu sebeple üstte biriken

iletken yolun tarafsız eksene uzaklığı arttığı ve iletken yolların belirli bir yükseklikten başladığı fikrini destekler.

Çizelge 4.15. Katmanlar arasına soğuk plazma uygulanmış Plazma 3 deneyi sonucun oluştururken 200 mm uzunluğundaki elektrotun silindirlere sarıldıkları sırada sağ ve sol kısımlarından ölçülen direnç değerleri

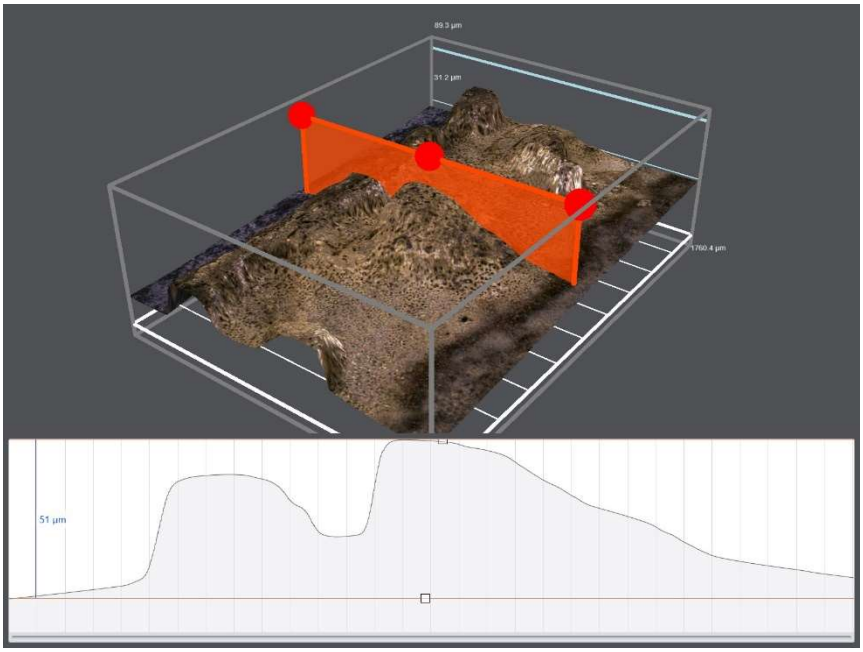
Plazma 3 Deneyi Elektrotu (25 W)			
Silindir Çapı (mm)	**Direnç 1 (ohm)**	**Direnç 3 (ohm)**	**Ortalama (ohm)**
Düz	6,404	6,227	6,316
40	6,988	7,012	7,000
35	7,228	7,345	7,287
30	7,528	7,438	7,483
25	8,205	8,352	8,279
20	9,990	11,012	10,501
15	11,712	11,581	11,647
10	11,448	11,821	11,635
7	11,628	11,956	11,792
5	11,802	12,112	11,957
3	12,803	13,104	12,954
Deney Sonu Düz	7,921	8,221	8,071

Şekil 4.47'de bükülme çapı deneylerinin daha rahat karşılaştırılabilmesi için ölçülen değerler grafik üzerinde verilmiştir. Plazmasız uygulama olan P1 deneyinin 3 mm çaplı silindire sarılması sonucunda düşük güçlü plazma uygulanmış P2 deneyine kıyasla yüksek direnç göstererek iletkenliği daha düşük çıkmıştır. Fakat geri bırakılıp düz halde tekrar ölçüldüğünde P1 ve P2 deneylerinde yaklaşık aynı değer çıkması elektrot bütünlüğünün 3 mm için daha fazla bozulmadığını gösterir. P1_Son, P2_Son ve P3_Son olarak grafikte verilen değerler deneyler bitiminde tekrar düz hale getirilen elektrottan alınan ölçümleri göstermektedir.



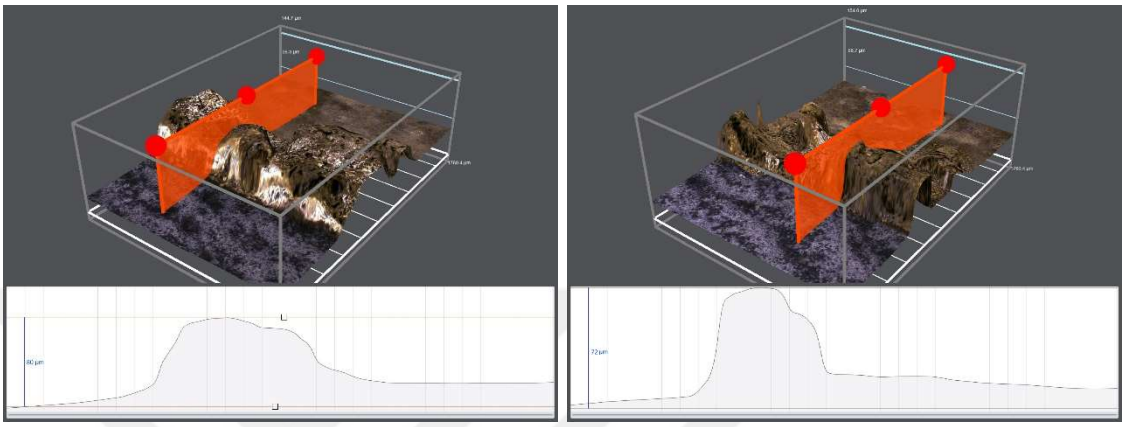
Şekil 4.47. Bükülme çapı deneylerinde okunan direnç değerleri

Şekil 4.48'de Plazma 1 deneyinin yüzey geometrisi verilmiştir. Şekil incelendiğinde kenarda 51 µm ulaşan bir yükselti piki görüldükten sonra elektrotun ortasına doğru gümüş yığılması 10 µm civarına düşmüştür. Bu durumda elektrotun ortasında direnç kaybına yol açmaktadır.



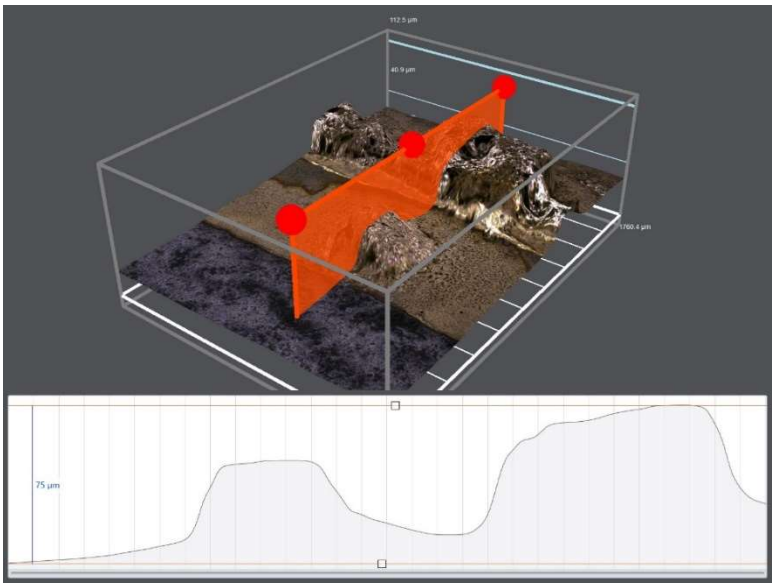
Şekil 4.48. Plazma 1 deneyi sonucu elektrot yüzey profili (0 W plazmasız)

Şekil 4.49'da 3,5 W plazma uygulanmış Plazma 2 deneyi sonucu elektrotun yüzey profili verilmiştir. Kenarda kısa bir alanda gümüş yığılmasından sonra yaklaşık 20 µm kalınlıklarına düşüş gözlemlenir. Plazmasız deneye göre gümüş sadece kenarda birikmemiş ve daha dengeli bir yayılım olduğu görülmektedir.



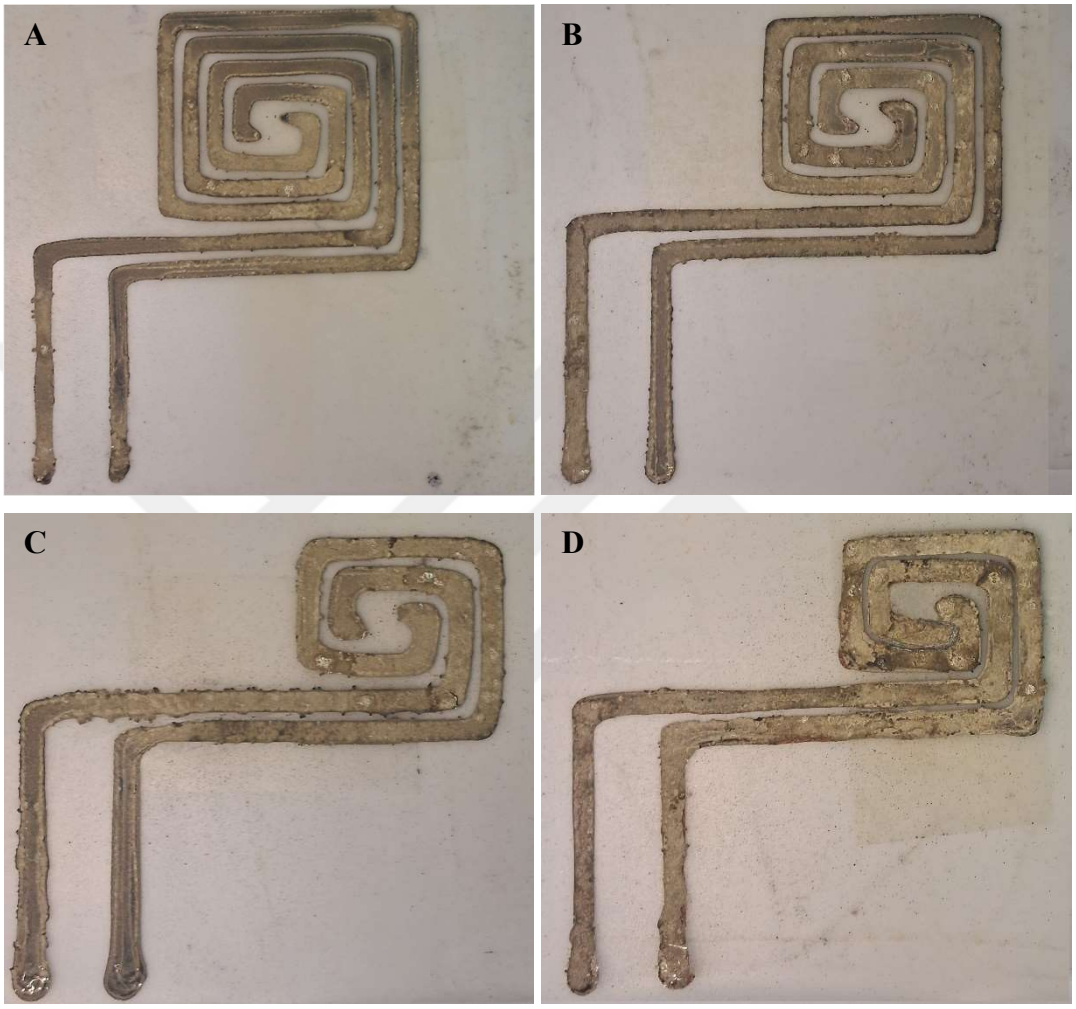
Şekil 4.49. Plazma 2 deneyi sonucu elektrot yüzey profili (3,5 W)

Şekil 4.50'de 25 W plazma uygulanmış Plazma 3 deneyi sonucu elektrotun yüzey profili verilmiştir. Yüzey profilinden mürekkebin kenarda biriken yığılmış gümüşü aşarak yeni bir set oluşturduğu görülmektedir. Mürekkep yüksek plazma gücü sebebiyle tam ıslatma moduna geçiş yaparak yayılma eğilimi gösterdiği söylenebilir. Yüzey profil geometrileri direnç ölçümleriyle uyum içerisindedir.



Şekil 4.50. Plazma 3 deneyi sonucu elektrot yüzey profili (25 W)

Şekil 4.51'de 4 hatlı, 3 hatlı, 2 hatlı ve 2 hatlı katmanlar arasına plazma uygulanmış kapasitör devreleri verilmiştir. 300 mm/dk hız ve %2,5 gümüş içeriğiyle 5 kat olacak şekilde serme yöntemiyle üretilmişlerdir.



Şekil 4.51. Kapasitör devresi denemesi **A)** 4 tur dönen devre **B)** 3 tur dönen devre **A)** 4 tur dönen devre **C)** 2 tur dönen devre **D)** 2 tur dönen katman arlarına soğuk plazma uygulanmış devre

Çizelge 4.16'da kapasitör devresi deneyinde oluşturulan hatların sağ, sol ve orta kısımlarından yapılan direnç ölçüm değerleri verilmiştir. L4 devresinin uzun hattın 400 mm (11 köşe) ve kısa hattı 315 mm'dir (9 köşe). L3 devresi deseninde uzun hat 300 mm (9 köşe), kısa hat 235 mm (7 köşe) uzunluğundadır. L2 devresi için ise uzun hat 220 mm (7 köşe) ve kısa hat 175 mm'dir (5 köşe). Katmanlar arasına soğuk plazma çekilen LP2

devresinin direnç değerleri L2 devresine kıyasla daha düşük gelmiştir. Şekiller kıyaslandığındaysa LP2 devresinin daha yayılmış bir hat oluşturduğu görülür.

Çizelge 4.16. Kapasitör devresinin elektrot hatlarının sol orta ve sağ taraflarından alınmış direnç değerleri

Numune Adı	Uzun Hat (Ω)			Kısa Hat (Ω)		
L4	5,8	6,3	5,9	4,4	5,2	4,3
L3	2,9	4,2	2,9	2,7	3,0	2,6
L2	2,4	2,8	2,4	1,7	3,0	1,5
LP2	1,9	2,0	2,0	1,9	1,9	1,9

Kapasitör (kondansatör) enerjiyi iki elektrot arasında elektrik alan oluşturarak depolayan bir devre elemanıdır. Depolamanın temel prensibi iki elektrot arasındaki elektrik akışının doğrudan geçişini engelleyen bir yalıtkan bariyerin bulunmasıdır. Kapasitans değeri plaka alanı ve dielektrik sabitinin artmasıyla artarken plakalar arası mesafenin artmasıyla azalır. PET havaya göre 3 kat yüksek dielektrik katsayısına sahiptir. Bu sebeple yan yana duran levhalar yerine üst üste binen plakalar daha yüksek kapasitans değerlerine ulaşacaktır (M. Hussain vd., 2024; Özada vd., 2024). Kapasitör devre içerisinde frekans ayarlama, radyo frekansı devrelerinde filtre ve anten eşlemesi, zamanlama devreleri, parazit azaltma, basınç, mesafe ve gaz algılama gibi çeşitli sensörler gibi çok çeşitli kullanım alanları vardır (Habboush vd., 2024; L. Y. Ma & Soin, 2022; McKerricher vd., 2015).

Kiliszkiewicz vd. (2023), yaptıkları çalışmada iç içe geçmiş elektrot (interdigit) şekli ile gümüş mürekkeple inkjet metodu ile kapasitör devresi oluşturmuşlardır. 4-6-8-10 parmak olmak üzere her bir parmağın uzunluğu 20 mm olmak üzere parmak sayısına bağlı 4 farklı uzunlukta elektrot oluşturmuşlardır. 1,5 mm kalınlığa sahip elektrotlarda 4 parmaklı yapı 1 pF değer elde ederken 10 parmaklı yapıda yaklaşık 2,6 pF değer elde etmişlerdir. Yaptığımız çalışmayla kıyasladığımızda yaklaşık 2 kat uzunluktaki L2 devresi 12 pF çıkmış ve uzunluklar eşitlenirse yaklaşık 2,49 kat yüksek kapasitans değeri vermiştir. Plazma uygulanmış devrede ise 3,73 kat daha yüksek kapasitans değeri (18 pF) vermiştir. İlgili çalışmadaki hat genişlikleri 1,5 mm iken yaptığımız çalışmada hat genişlikleri yaklaşık 3 mm'dir. Genişlik ve hat uzunluğu şartları düşünüldüğünde L2 devresi 1,245 kat plazmalı devre ise 1,865 kat fazla kapasitans değeri elde edildiği parmak şekilli

geometriden daha hassas ayarlanabileceği söylenebilir. İki çalışma tam bir karşılaştırmaya alınması doğru olmasa da plazma etkisinin olduğu görülebilir. İki farklı devre yolunun tam bir karşılaştırma için ileriki çalışmalarda eşit şartlarda üretilen devreler karşılaştırılabilir. Şekil 4.52'de elektrotların esnek kabiliyetini avantaja çevirebilmek için kapasitör devrelerin rulo yapılarak kapasitans değerlerinin artırılmaya çalışıldığı içi boş silindirler ve devrelerin rulo yapılarak içine konduğu durumları verilmiştir. Normal kapasitanslara göre devrenin avantajı ikinci bir plaka ve ayrı bir yalıtım katmanına ihtiyaç duymaz. Bu da fazla komponent sayısının düşmesini sağlar. Üst üste kıvrılarak gelen devre yalıtımlı alttaş sebebiyle doğal olarak kapasitans görevi görür.



Şekil 4.52. Kapasitör devrelerinin kapasitans miktarını artırmak için esnek elektrotlardan yararlanılarak rulo hale getirilmesi

Çizelge 4.17'de düz bir şekilde ve rulo hale getirilip silindir fikstürlere yerleştirilen devrelerin nF cinsinden kapasitans değerleri verilmiştir. Katmanlar arasına plazma uygulanmış LP2 devresi, L4 devresine göre neredeyse yol uzunlukları ve kullanılan gümüş miktarı olarak yarısı boyutlarında ola bile düz halde L4 devresinden daha iyi performans göstermiştir. Rulo haldeyken de değerler 0,027 nF olarak okunmuştur. Bu

durum LP2 hatlarının daha geniş olmasından ve gümüşün kahve lekesi yapmamış olmasından dolayı levha özelliğini koruması ve kapasitesini artırmasını yol açmıştır. Yine rulo hale geldiğinde ise soğuk plazmanın etkisi sayesinde daha önceki deneyde de kanıtlanmış olan daha düşük çaplarda daha az direnç düşü gözlemlenmesi sebebiyle rulo haldeyken de diğer devre numunelerine kıyasla iyi performans göstermiştir.

Çizelge 4.17. Kapasitör devresi oluşturma deneyinde elde edilen kapasitans değerleri

Numune Adı	Düz (nF)	Rulo (nF)
L4	0,017	0,027
L3	0,014	0,026
L2	0,012	0,024
LP2	0,018	0,027

5. SONUÇ

Bu çalışmada düşük maliyetler ile üretilmiş iletken mürekkep ile esnek yüzeylere baskı alarak elektronik devresi üretebilen bir eklemeli imalat sistemi tasarlanıp üretilerek bu cihazla oluşturulan esnek elektrotların mekanik ve elektronik performansları incelenmiştir. Elektrotların performansın geliştirilmesi için özgünlük olarak katmanlar arasına soğuk plazma uygulaması yapılması önerilmiştir. Bu çalışma kapsamında damlacık püskürtebilen çift piezolu bir damlacık üreteci, soğuk plazma cihazı, cihazda kullanılacak parçacıksız mürekkebin sentezlenmesi ve cihaz üzerindeki çalışan tüm ekipmanların kodları ve g-kodları oluşturulmuştur. Bunumla beraber dozaj pompası, santrifüj cihazı ve bilyalı öğütme gibi yardımcı ekipmanlarda tez kapsamında tasarlanıp üretilmiştir.

Nanoparçacıklı mürekkep üretimi tozun öğütülmesinden homojenizasyon edilmesine kadar birçok pahalı ekipmana veya pahalı malzemelerin kullanılmasına ihtiyaç duymaktadır. Bunumla beraber nanoparçacıklı mürekkeplerde nozul çapı nanoparçacık boyutuna göre sınırlanmaktadır. Ayrıca nozul ve sistem içerisindeki kanalların tıkanma riski daha yüksektir. Nanoparçacıklı metal tozunu uygun maliyetle elde etmek için metal tozunun bilyalı öğütülmesi tekniği seçildiğin de birçok parametre devreye girmektedir. Dönme hızı, bilya boyutları, bilya malzemesi, sıvı miktarı, kavanoz çapı ve malzemesi, toz miktarı, tozun boyutu ve üretim süresi gibi çok sayıda parametrelerin sonucunda istenilen boyda ve istenilen şekilde (küresel, yarı küresel gibi) tozun elde edilmesi gerekir. Mikro tozdan nano toz üretilmesi prosesi bir-iki günü alabilen uzun bir işlem haline dönüşebilir. Ayrıca ekstra bir ekipmanla üretilen tozun elenerek farklı boylarda sınıflandırılması ve depolanma ihtiyacı da doğacaktır. Uygun parametre ayarları tespit edilebildiği takdirde damlatılabilir aralıkta bir mürekkep olması gerekir. Nanoparçacıkların mürekkep içerisinde homojen dağıtılabilmesi için farklı kimyasalların ve ajanların mürekkep içeriğine dahil edilmesine ihtiyaç vardır. Bu kimyasallar uygun oranların dışında kullanıldığında çökelme, topaklaşma vb. iletken parçacığın sıvı içerisinde dağılım sorunları ortaya çıkar. Ayrıca bu kimyasallar kuruma ve sinterleme aşamasında kirlilik bırakmadan ortamdan uzaklaşabilmesi gerekir. Bu durumlar dikkate alındığında nanoparçacıklı iletken mürekkep üretme prosesi farklı pahalı ekipmanlara ve

farklı pahalı kimyasalların kullanılmasına bununla birlikte çok fazla parametrenin içerisine girdiği optimizasyon problemlerin çözülmesine ihtiyaç duyar.

İletken nanoparçacık katkılı mürekkebin üretilmesi proseslerinin karmaşık ve pahalı olması sebebiyle metal organik parçacıksız mürekkep üretimi daha az kontrol parametresi içeren bir yapıya sahiptir. Ön damla püskürtme çalışmaları su ile yapılmasından dolayı su bazlı bir parçacıksız mürekkep üretilmiştir. Su bazlı mürekkep birçok avantajıda beraberinde getirmiştir. Bu sayede farklı çözücü ortamlar ve farklı aşındırıcı kimyasalların kullanımı minimize edilmiştir. Ayrıca suyun malzemeler üzerindeki tepkileri çok çalışılan konular arasındadır. Parçacıksız mürekkebin diğer bir avantajı nozul tıkanma sorunlarını minimize etmesidir. Fakat bir günü aşan bir süre sistem içerisinde bekleyen metal organik parçacıksız mürekkepte şırınga haznesindeki metal malzemelerle tepkimeye girerek çökelme ve korozyona sebep olarak hat üzerinde belirli bölgelerde tıkanma oluşmasına yol açabilmektedir.

Mikro pompaların üretiminde farklı üretim metotları denenmiştir. Reçineli LCD tabanlı SLA yazıcı ve FDM yazıcı eklemeli imalat metotları olarak kullanılmıştır. FDM tabanlı yazıcı ile oluşturulan mikro pompalarda tolerans aralığı büyük ve üretim kararlılığı düşük olmasından kaynaklı üretilen tekrarlı parçalarda farklı sonuçlar alınmasına yol açmıştır. Ayrıca FDM yazıcı çıktılarında sıvıyı emme ve yüzeyden fazla sıvının kusması gibi basınç stabilizasyonunu bozan durumlarla karşılaşılmıştır. Hat üzerinde herhangi bir kaçak oluştuğunda damlanın oluşturulmasında problemler çıkmaktadır. Toleransları iyi olan reçineli yazıcıda ise üretim mantığından kaynaklanan iç kanalların kürlenmesi sorunu ile karşılaşılmıştır. Pompa yapısı kanallar boyunca parçalandığında da sızdırmazlık problemleri konusunda çok fazla kontrol noktası sisteme eklenmiş olur. Herhangi bir sızdırma anında sorunun nereden kaynaklandığı tespit edilemez. Eklemeli imalat yöntemleriyle kanal iç yapıları en yüksek fayda sağlayabilecek şekilde tasarlanabilmesi ön görülse de karşılaşılan problemler bu tip eklemeli imalat yöntemleriyle karmaşık kompleks iç mikro kanallı sistemlerin hızlı bir şekilde oluşturulamayacağını göstermiştir. Ayrıca reçineli UV kürleme metoduyla çalışan yazıcıda hassas kanalların oluşturulması için reçineye bağlı olarak bir dizi parametre optimizasyonuna ihtiyaç duyulur. Benzer durum FDM yazıcılar içinde geçerlidir. Uygun

parametreler bulunamadığı takdirde kanalların iç yapıları tasarıma uygun şekilde ve boyutlarda üretilmesi mümkün değildir. Ayrıca çok fazla kontrol değişkenine sahip kendinden çek valfli pompa tasarımından da vaz geçilmiştir. Bu sebeple pompaların kanal yapıları basit düzeye indirgenerek geleneksel imalat yöntemleriyle yalıtkan bir malzeme olan kestamitten üretilmiştir. Akışkan kontrollü dozaj pompası ile hassas sıvı akışı kontrolü ile sağlanması daha hızlı ve problemsiz bir metot olarak tespit edilmiştir.

Basıncın sabit tutulmasını ve debinin kontrollü bir şekilde nozul ağzında tutulması için bir takım peristaltik pompa çalışmaları yapılmıştır. İlk olarak hazır ürün olarak alınan peristaltik pompa düzeneği adım motoruna bağlanarak hassas bir şekilde kontrol edilmek istenmiştir. Fakat akış düzensizliğiyle karşılaşılmıştır. Bununla beraber FDM yazıcı aracılığıyla üretilen farklı peristaltik pompa tasarımlarında da benzer akış düzensizliği ve bazı durumlarda silikon hortumun yırtılması durumuyla karşılaşılmıştır. Bu sebeple trapez vidalı redüktörlü bir sistemle bir şırınga çok yüksek mikro adımlara da bölünerek hassas olarak kontrol edilmiştir. Şırınga dozaj pompasıyla akış düzensizliğinin önüne geçilmiştir. Nozul ucunda sürekli olarak istenilen menüsküs yapısı hassas bir şekilde oluşturulabilmiştir. Ayrıca şırınganın üst tarafından açılan bir hava alma haznesi sıvı dolumu sırasında ve hava alma işlemi sırasında büyük bir zaman kaybının önüne geçilmesini sağlamıştır.

Plazma düzeneğinin kararlaştırılmasında ilk olarak daha düşük voltajlarda çalışan kaymalı plazma ark deşarjı yöntemi denenmiştir. Seçilen değerlerde uygulanan kaymalı plazma ark deşarjı ark kaynağına yakınlığa bağlı olarak soğuk, ılık ve sıcak plazma uygulamalarını aynı sistemle tatbik edilebildiği görülmüştür. Bu yöntemde alttaşın ark kaynağına fazla yakınlaşması sonucunda alttaşın yüzeyin ısıya maruz kalarak deforme olduğu görülmüştür. İstenmeyen durumların önüne geçmek ve hataları minimize etmek için daha yüksek voltajlarda çalışan korona deşarj yöntemiyle soğuk plazma üretimi yapılmıştır. Argon gazı üflenerek plazmaya dönüştürülmüş ve yüzey işlemi olarak uygulanmıştır. Yüzeye olan etkileri daha kontrollü ve güvenilir olduğu görülmüştür.

Özgün tasarımı sayesinde üretilen eklemeli cihaz birkaç farklı yönteme kolayca uyarlanabilmektedir. Bunların arasında isteğe bağlı damla oluşturma, mikro serme ve

akustik piezo destekli mikro serme olmak üzere üç farklı yöntem çok hiçbir sistem değiştirilmeden kullanılabilmektedir. Hızlı nozul değişimi, hava alma ünitesini vakumlayarak hızlı dolum gibi ekstra kolaylıklar sağlanabilmektedir. Aynı ekipmanların ve dozajlama sisteminin kullanılması farklı yöntemlerin kıyaslanmasında minimum bozucu değişkenle değerlendirilmesini kolaylaştırmaktadır. Farklı bir özgün yön olarak çalışma kapsamında mikro serici ve isteğe bağlı damla püskürtme yöntemi karşılaştırılmıştır. Optimal yöntem olarak tespit edilen mikro serici yöntemi nihai testler için seçilmiştir. 5 katmanda en düşük ikinci direnç olan 0,427 ohm direnç değeri vermiştir. Mikro serici yönteminin seçilme sebebi hatların daha doğrusal ve dalgalanmadan oluşturulmasını daha az parametre ve kontrol ile sağlayabilmesidir. Ayrıca sıçratma problemi rakip yöntem olan damla püskürtme yöntemine göre neredeyse ortadan kalkmıştır.

Seçilen serme yöntemiyle 300 mm/dk hızla %2,5 gümüş içeriğiyle 200 mm uzunluğunda 5 katmandan oluşan 3 elektrot üretilmiştir. Bu elektrotların birine plazma uygulanmamış diğer ikisine düşük güçlü ve yüksek güçlü olmak üzere soğuk plazma uygulanmıştır. Düşük güçlü soğuk plazma (3,5 W) verilen elektrotta kahve lekesi ciddi oranda azalmış ve elektrot boyunca homojen dağılan gümüş molekülleri hat genişliği boyunca iletkenlik göstererek ciddi bir iyileşme göstermiştir. Yüksek güçlü plazmada ise mürekkeplerin yayılması artmış ve yollar oksitlenerek siyah bir görünüm almıştır. Direnç değerleri 2 kat yüksek çıkmıştır.

Plazma etkisiyle hat genişliği boyunca belirli miktarda homojen dağılan gümüş sayesinde tarafsız eksene uzaklık plazma uygulanmayana göre daha küçük kalmıştır. Bu durum da bükülme esnasında çekme kuvvetine maruz kalan dış kısımdaki kuvvetleri düşürmüştür. Bu durum daha ufak çaplara inildiğinde belirgin bir şekilde görülmektedir. Plazma uygulanmamış Plazma 1 deneyinde 3 mm çaplı silindire sarılan elektrot 7.867 Ω çıkmış iken düşük güçte plazma uygulanmış Plazma 2 deneyinde 6.388 Ω gibi daha düşük bir direnç değeri ile %18,8 daha düşük direnç gözlemlenmiştir. Plazma uygulanmayan deneyde iletken hat 50 mikron yükseklikte kenar hattı üzerinde birikmiştir. Orta hatlarda ise gümüş seviyesinin yüksekliği 10 µm civarında olup zaman zaman temasın kesildiği bölgeler mevcuttur. Bu durumda bükülme olduğunda 50 µm yüksekliğindeki kenar hattı

deforme olduğunda iletkenliği sağlayacak bütüncül bir tabakaya ulaşılamaz. 3,5 W plazma uygulanış Plazma 2 deneyinde ise ortalama hat yüksekliği 20 µm civarındadır. Kenar hattında bu deneyde de birikme görünse de kenar hattı bütünlüğünün bükülme esnasında bozulması durumunda iletkenliği bu 20 µm kalınlığındaki gümüş hattı sağlar. Plazmasız 50 µm ve plazma sayesinde 20 µm iletken hattı karşılaştırıldığında tarafsız eksene uzaklık azalması sebebiyle kuvvetlerin düşmesini sağlayarak katmanlar arasına uygulanan plazma bükülme testlerinde de iyi sonuç vererek iyileşme görülmesini sağlamıştır. Ayrıca plazmasız uygulamaya nazaran orta hatta güçlü bir iletkenlik mevcuttur. Plazmasız uygulamada yer yer iletkenliklerde kopmalar ve kΩ mertebelerinde yüksek direnç değerleri okunmuştur. Aynı zamanda yüzey pürüzlülüğünü artıran plazma uygulaması katmanların birbirine daha iyi nüfuz ederek hidrofilikliğin artması ile daha iyi kenetlenmesini ve bütün oluşturmasını artırmıştır. Plazmasız uygulamada olduğu gibi kenarlarda birikme ve orta kısımda gümüş miktarının az olması katmanların birbiri üstüne tüm hat genişliği boyunca iyi tutunamayıp nüfuz edemediğini gösterir.

Yapılan kapasitans devresi sonuçlarında ise katmanlar arasına çekilen plazma ciddi oranda iyi performans sergilemiştir. Nerdeyse iki katı uzunluğunda olan L4 devresine göre LP2 devresinin düz durumda kapasitansı daha yüksek çıkmıştır. Rulo hale getirildiğinde ise L4 devresiyle aynı kapasitans değerini vermiştir. Bu %44,75 oranında malzeme tasarrufu sağlanması anlamına gelmektedir.

Gelecekte planlanan çalışmalar damlacık izleme ünitesinin entegresi ve buradan alınacak verilere bağlı yapay zeka destekli parametrelerin belirlenmesi, parametrelerin etkisini araştırılması, serme tekniğinde daha ince nozullar kullanılarak kılcallık etkisinin etkin kullanılması, serme tekniğinin piezolar ile beraber kullanılarak akustik mikro serici yönteminin de kullanarak farklı teknikler arasında karşılaştırma yapılmasını ve uygulamalara yönelik devreler kurularak performanslarının ölçülmesi üzerine olacaktır.

KAYNAKLAR

Abhinav K, V., Rao R, V. K., Karthik, P. S., & Singh, S. P. (2015). Copper conductive inks: Synthesis and utilization in flexible electronics. Içinde *RSC Advances* (C. 5, Sayı 79, ss. 63985-64030). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/c5ra08205f

Abolore, R. S., Jaiswal, S., & Jaiswal, A. K. (2024). A comprehensive review of the application of cold plasma technology in lignocellulosic biomass pretreatment. Içinde *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. John Wiley and Sons Ltd. https://doi.org/10.1002/bbb.2706

Ahmed, J., Alazemi, A., Ponnumani, P., B., B. T., Soliman, M., Emmanuval, L., & Thomas, N. M. (2024). Transformation of quinoa seeds to nanoscale flour by ball milling: Influence of ball diameter and milling time on the particle sizing, microstructure, and rheology. *Journal of Food Engineering*, *379*. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2024.112127

Aliofkhazraei, M. (t.y.). *Handbook of Nanoparticles*.

Allied-Market-Research. (2022). *Wearable Technology Market by Device (Fitness, Smart Watches, Smart Glasses, Smart Clothing, Others), by Product Type (Wrist Wear, Eyewear, Hearables, Neckwear, Bodywear, Others), by Application (Lifestyle, Consumer Applications, Entertainment, Healthcare*.

Aroganam, G., Manivannan, N., & Harrison, D. (2019). Review on Wearable Technology Sensors Used in Consumer Sport Applications. *Sensors*, *19*(9), 1983. https://doi.org/10.3390/s19091983

Asadi Dereshgi, H., Dal, H., & Yildiz, M. Z. (2021). Piezoelectric micropumps: state of the art review. *Microsystem Technologies*, *27*(12), 4127-4155. https://doi.org/10.1007/s00542-020-05190-0

Balani, S. B., Ghaffar, S. H., Chougan, M., Pei, E., & Şahin, E. (2021). Processes and materials used for direct writing technologies: A review. *Results in Engineering*, *11*. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100257

Balantrapu, K., Lu, L., Halaciuga, I., & Goia, D. V. (2010). *Inkjet Printable Dispersions of Silver and Gold Nanoparticles*. http://meridian.allenpress.com/ism/article-pdf/2010/1/000912/2252772/isom-2010-tha5-paper1.pdf

Bárdos, L., & Baránková, H. (2010a). Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications. Içinde *Thin Solid Films* (C. 518, Sayı 23, ss. 6705-6713). https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.07.044

Bastola, A., He, Y., Im, J., Rivers, G., Wang, F., Worsley, R., Austin, J. S., Nelson-Dummett, O., Wildman, R. D., Hague, R., Tuck, C. J., & Turyanska, L. (2023). Formulation of functional materials for inkjet printing: A pathway towards fully 3D printed electronics. Içinde *Materials Today Electronics* (C. 6). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.mtelec.2023.100058

Biloiu, I. A., & Scime, E. E. (2010). Ion acceleration in Ar-Xe and Ar-He plasmas. I. Electron energy distribution functions and ion composition. *Physics of Plasmas*, *17*(11). https://doi.org/10.1063/1.3505822

Birania, S., Attkan, A. K., Kumar, S., Kumar, N., & Singh, V. K. (2022). Cold plasma in food processing and preservation: A review. Içinde *Journal of Food Process Engineering* (C. 45, Sayı 9). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1111/jfpe.14110

Bodén, R., Lehto, M., Simu, U., Thornell, G., Hjort, K., & Schweitz, J. Å. (2006). A polymeric paraffin actuated high-pressure micropump. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *127*(1), 88-93. https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.11.068

Boumeganane, A., Nadi, A., Cherkaoui, O., & Tahiri, M. (2022). Inkjet printing of silver conductive ink on textiles for wearable electronic applications. *Materials Today: Proceedings*, *58*, 1235-1241. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.469

Brilian, A. I., Soum, V., Park, S., Lee, S., Kim, J., Kwon, K., Kwon, O. S., & Shin, K. (2021). A simple route of printing explosive crystalized micro-patterns by using direct ink writing. *Micromachines*, *12*(2), 1-8. https://doi.org/10.3390/mi12020105

Buga, C., & C. Viana, J. (2022). Inkjet Printing of Functional Inks for Smart Products. Içinde *Production Engineering and Robust Control*. IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.104529

Cai, L., Zhang, S., Miao, J., Yu, Z., & Wang, C. (2016). Fully Printed Stretchable Thin-Film Transistors and Integrated Logic Circuits. *ACS Nano*, *10*(12), 11459-11468. https://doi.org/10.1021/acsnano.6b07190

Cai, L., Zhang, S., Zhang, Y., Li, J., Miao, J., Wang, Q., Yu, Z., & Wang, C. (2018). Direct Printing for Additive Patterning of Silver Nanowires for Stretchable Sensor and Display Applications. *Advanced Materials Technologies*, *3*(2). https://doi.org/10.1002/admt.201700232

Cao, L., Bai, X., Lin, Z., Zhang, P., Deng, S., Du, X., & Li, W. (2017). The preparation of Ag nanoparticle and ink used for inkjet printing of paper based conductive patterns. *Materials*, *10*(9). https://doi.org/10.3390/ma10091004

Carmelo Barreiros, R., Bonfim Gomes, V., Dreyer, P., Maria Pascoa, J., Oliveira, F., Asfora Sarubbo, L., & Moraes Rego, A. (t.y.). *Ionization of Noble Gases under the Effect of an Electric Field 3 for the Generation of Useful Energy*. https://ssrn.com/abstract=4075911

Ceron, S., Barba, D., & Dominguez, M. A. (2024). Solution-Processable and Eco-Friendly Functionalization of Conductive Silver Nanoparticles Inks for Printable Electronics. *Electronic Materials*, *5*(2), 45-55. https://doi.org/10.3390/electronicmat5020004

ChemSpider. (2025). https://www.chemspider.com/.

Chen, S., Li, Y., Jin, R., Guan, Y., Ni, H., Wan, Q., & Li, L. (2017). A systematic and effective research procedure for silver nanowire ink. *Journal of Alloys and Compounds*, *706*, 164-175. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.02.214

Chen, S., Qian, C., Cheng, W., Kan, J., Ji, J., Zhang, Z., & Wang, J. (2021). A low frequency driven piezoelectric pump with flexible valve. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *319*, 112567. https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112567

Chen, W., Jin, D., Cui, W., & Huang, S. (2020). Characteristics of gliding arc plasma and its application in swirl flame static instability control. *Processes*, *8*(6). https://doi.org/10.3390/PR8060684

Chen, X., Chen, Z., Gui, Z., Zhang, F., Zhang, W., Zhou, X., Huang, X., & Zhang, J. (2021). A novel valve-less piezoelectric micropump generating recirculating flow. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, *15*(1), 1473-1490. https://doi.org/10.1080/19942060.2021.1975573

Chen, Z., Chen, G., Obenchain, R., Zhang, R., Bai, F., Fang, T., Wang, H., Lu, Y., Wirz, R. E., & Gu, Z. (2022). Cold atmospheric plasma delivery for biomedical

applications. Içinde *Materials Today* (C. 54, ss. 153-188). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.03.001

Cheng, C., Liye, Z., & Zhan, R. J. (2006). Surface modification of polymer fibre by the new atmospheric pressure cold plasma jet. *Surface and Coatings Technology*, *200*(24), 6659-6665. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.09.033

Cheng, Y., & Lin, J. (2007). *Manufacture of three-dimensional valveless micropump*. *193*, 229-236. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.055

Chia, B. T., Liao, H. H., & Yang, Y. J. (2011). A novel thermo-pneumatic peristaltic micropump with low temperature elevation on working fluid. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *165*(1), 86-93. https://doi.org/10.1016/j.sna.2010.02.018

Chien Dang, M., Dung Dang, T. M., & Fribourg-Blanc, E. (2015). Silver nanoparticles ink synthesis for conductive patterns fabrication using inkjet printing technology. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, *6*(1). https://doi.org/10.1088/2043-6262/6/1/015003

Cho, Y. T., Jeong, Y., Kim, Y. J., Kwon, S., Lee, S. H., Kim, K. Y., Kang, D., & Lee, T. M. (2017). Printing speed and quality enhancement by controlling the surface energy of cliché in reverse offset printing. *Applied Sciences (Switzerland)*, *7*(12). https://doi.org/10.3390/app7121302

Cruz, S. (2015). *INKJET PRINTING TECHNOLOGY FOR FLEXIBLE PRESSURE SENSORS*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17067.31524

Çuvalcı, O., Varol, T., Akçay, S. B., Güler, O., & Çanakçı, A. (2023). Effect of ball mill time and wet pre-milling on the fabrication of Ti powders by recycling Ti machining chips by planetary milling. *Powder Technology*, *426*. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118637

Dawood, N. (2021). Surface modification of date palm leaves by cold plasma treatment. *Journal of King Saud University - Science*, *33*(5). https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101465

De Camargo, I. L., Lovo, J. F. P., Erbereli, R., & Fortulan, C. A. (2019). Influence of media geometry on wet grinding of a planetary ball mill. *Materials Research*, *22*(6). https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0432

Dhiman, S., Joshi, R. S., Singh, S., Gill, S. S., Singh, H., Kumar, R., & Kumar, V. (2021). A framework for effective and clean conversion of machining waste into metal powder feedstock for additive manufacturing. Içinde *Cleaner Engineering and Technology* (C. 4). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100151

Domonkos, M., Tichá, P., Trejbal, J., & Demo, P. (2021). Applications of cold atmospheric pressure plasma technology in medicine, agriculture and food industry. Içinde *Applied Sciences (Switzerland)* (C. 11, Sayı 11). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/app11114809

Dong, J., Cao, Y., Chen, Q., Wu, Y., Liu, R. G., Liu, W., Yang, Y., & Yang, Z. (2020). Performance of single piezoelectric vibrator micropump with check valve. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *31*(1), 117-126. https://doi.org/10.1177/1045389X19880024

Dong, J., Wang, Z., Zhao, X., Biesuz, M., Saunders, T., Zhang, Z., Hu, C., & Grasso, S. (2020). Contactless flash sintering based on cold plasma. *Scripta Materialia*, *175*, 20-23. https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.08.039

Dong, S., Guo, P., Chen, Y., Chen, G. yun, Ji, H., Ran, Y., Li, S. hong, & Chen, Y. (2018). Surface modification via atmospheric cold plasma (ACP): Improved functional

properties and characterization of zein film. *Industrial Crops and Products*, *115*, 124-133. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.01.080

Dong, Y., Bao, C., & Kim, W. S. (2018). Sustainable Additive Manufacturing of Printed Circuit Boards. *Joule*, *2*(4), 579-582. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.03.015

Dong, Y., Li, X., Liu, S., Zhu, Q., Li, J. G., & Sun, X. (2015). Facile synthesis of high silver content MOD ink by using silver oxalate precursor for inkjet printing applications. *Thin Solid Films*, *589*, 381-387. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.06.001

Durán, I. R., Vanslambrouck, S., Chevallier, P., Hoesli, C. A., & Laroche, G. (2020). Atmospheric pressure cold plasma versus wet-chemical surface treatments for carboxyl functionalization of polylactic acid: A first step toward covalent immobilization of bioactive molecules. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *189*. https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2020.110847

Fatyeyeva, K., Dahi, A., Chappey, C., Langevin, D., Valleton, J. M., Poncin-Epaillard, F., & Marais, S. (2014). Effect of cold plasma treatment on surface properties and gas permeability of polyimide films. *RSC Advances*, *4*(59), 31036-31046. https://doi.org/10.1039/c4ra03741c

Fernandes, I. J., Aroche, A. F., Schuck, A., Lamberty, P., Peter, C. R., Hasenkamp, W., & Rocha, T. L. A. C. (2020). Silver nanoparticle conductive inks: synthesis, characterization, and fabrication of inkjet-printed flexible electrodes. *Scientific Reports*, *10*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-020-65698-3

Fosso, N., de Barros, D. P., Krahenbuhl, J., & Schintke, S. (2017). Printing and characterizing plasmonic nanoparticles. *2017 19th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 1-4. https://doi.org/10.1109/ICTON.2017.8024805

Found, C. G. (1920). Ionization Potentials of Argon, Nitrogen, Carbon Monoxide, Helium, Hydrogen and Mercury and Iodine Vapors. *Physical Review*, *16*(1), 41-53. https://doi.org/10.1103/PhysRev.16.41

Freire, J. M., Domingues, M. M., Matos, J., Melo, M. N., Veiga, A. S., Santos, N. C., & Castanho, M. A. R. B. (2011). Using zeta-potential measurements to quantify peptide partition to lipid membranes. *European Biophysics Journal*, *40*(4), 481-487. https://doi.org/10.1007/s00249-010-0661-4

Fridman, A., Nester, S., Kennedy, L. A., Saveliev, A., & Mutaf-Yardimci, O. (1999). Gliding arc gas discharge. *Progress in Energy and Combustion Science*, *25*(2), 211-231. https://doi.org/10.1016/S0360-1285(98)00021-5

Friedrich, L., & Begley, M. (2020). Printing direction dependent microstructures in direct ink writing. *Additive Manufacturing*, *34*. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101192

García-Morales, N. G., Morales-Cruzado, B., Camacho-López, S., Romero-Méndez, R., Devia-Cruz, L. F., & Pérez-Gutiérrez, F. G. (2021). Numerical modeling of a micropump without mobile parts actuated by thermocavitation bubbles. *Microsystem Technologies*, *27*(3), 801-812. https://doi.org/10.1007/s00542-020-04998-0

Ge, Y. (2017). *Printed Charge Storage Capacitor*. Technischen Universität Dresden.

Gerlach, T., Schuenemann, M., & Wurmus, H. (1995). A new micropump principle of the reciprocating type using pyramidic micro flowchannels as passive valves.

Journal of Micromechanics and Microengineering, *5*(2), 199-201. https://doi.org/10.1088/0960-1317/5/2/039

Gonzalez-Macia, L., Morrin, A., Smyth, M. R., & Killard, A. J. (2010). Advanced printing and deposition methodologies for the fabrication of biosensors and biodevices. *Analyst*, *135*(5), 845-867. https://doi.org/10.1039/b916888e

Goodship, V., Stevels, A., & Huisman, J. (2019). Waste electrical and electronic equipment (WEEE) handbook. Içinde *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook*. https://doi.org/10.1016/C2016-0-03853-6

Graf, N. J., & Bowser, M. T. (2008). A soft-polymer piezoelectric bimorph cantilever-actuated peristaltic micropump. *Lab on a Chip*, *8*(10), 1664-1670. https://doi.org/10.1039/b805252b

Habboush, S., Rojas, S., Rodríguez, N., & Rivadeneyra, A. (2024). The Role of Interdigitated Electrodes in Printed and Flexible Electronics. Içinde *Sensors* (C. 24, Sayı 9). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). https://doi.org/10.3390/s24092717

Hamad, A., Archacki, A., & Mian, A. (2020). Characteristics of nanosilver ink (UTDAg) microdroplets and lines on polyimide during inkjet printing at high stage velocity. *Materials Advances*, *1*(1), 199-207. https://doi.org/10.1039/d0ma00048e

Hamad, A., Mian, A., & Khondaker, S. I. (2020). Direct-Write Inkjet Printing of Nanosilver Ink (UTDAg) on PEEK Substrate. *Journal of Manufacturing Processes*, *55*, 326-334. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.046

Harris, D. M., Liu, T., & Bush, J. W. M. (2015). A low-cost, precise piezoelectric droplet-on-demand generator. *Experiments in Fluids*, *56*(4). https://doi.org/10.1007/s00348-015-1950-6

He, L., Wu, X., Wang, Z., Zhao, D., Wen, J., & Tian, X. (2020). *A large opening and high flow rate piezoelectric pump withstraight arm wheeled check valve*.

He, X., Bian, R., Lin, N., Xu, W., Deng, Z., & Yang, S. (2019). A novel valveless piezoelectric micropump with a bluff-body based on Coanda effect. *Microsystem Technologies*, *25*(7), 2637-2647. https://doi.org/10.1007/s00542-018-4215-5

Hoath, S. D. (2016). *Fundamentals of Inkjet Printing* (S. D. Hoath, Ed.). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. https://doi.org/10.1002/9783527684724

Hon, K. K. B., Li, L., & Hutchings, I. M. (2008). Direct writing technology-Advances and developments. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, *57*(2), 601-620. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.006

Hosseinpour, M., Zendehnam, A., Hamidi Sangdehi, S. M., & Ghomi Marzdashti, H. (2021). Simulation of the improvement in the performance of a silver-based surface plasmon resonance biosensor using experimental results of cold plasma treatment of glass substrate. *Journal of Computational Science*, *54*. https://doi.org/10.1016/j.jocs.2021.101410

Htwe, Y. Z. N., Chow, W. S., Suriati, G., Thant, A. A., & Mariatti, M. (2019). Properties enhancement of graphene and chemical reduction silver nanoparticles conductive inks printed on polyvinyl alcohol (PVA) substrate. *Synthetic Metals*, *256*. https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2019.116120

Htwe, Y. Z. N., & Mariatti, M. (2021). Surfactant-assisted water-based graphene conductive inks for flexible electronic applications. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *125*, 402-412. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.06.022

Htwe, Y. Z. N., & Mariatti, M. (2022). Printed graphene and hybrid conductive inks for flexible, stretchable, and wearable electronics: Progress, opportunities, and challenges. Içinde *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* (C. 7, Sayı 2). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100435

Huang, Q., Shen, W., Xu, Q., Tan, R., & Song, W. (2014). Properties of polyacrylic acid-coated silver nanoparticle ink for inkjet printing conductive tracks on paper with high conductivity. *Materials Chemistry and Physics*, *147*(3), 550-556. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.05.030

Huang, W., Lai, L., Chen, X., Chen, Z., Huang, Z., Tang, M., Bao, Q., & Zhang, J. (2021). Influence of disc parameters on output performance of elastic valve piezoelectric pump. *Microsystem Technologies*, *27*(8), 3049-3057. https://doi.org/10.1007/s00542-020-05076-1

Hussain, M., Zahra, H., Abbas, S. M., & Zhu, Y. (2024). Flexible Dielectric Materials: Potential and Applications in Antennas and RF Sensors. Içinde *Advanced Electronic Materials*. John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/aelm.202400240

Hussain, N. (2022). *Liquid Metal Printing with Scanning Probe Lithography for Printed Electronics*. Karlsruher Instituts für Technologie.

Hutchings, I. M., & Martin, G. D. (2012). Inkjet Technology for Digital Fabrication. Içinde *Inkjet Technology for Digital Fabrication*. https://doi.org/10.1002/9781118452943

Ivaniševic, I., Kassal, P., Milinkovic, A., Rogina, A., & Milardovic, S. (2019). Combined chemical and thermal sintering for high conductivity inkjet-printed silver nanoink on flexible substrates. *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*, *33*(3), 377-384. https://doi.org/10.15255/CABEQ.2019.1585

Ibrahim, N., Zubir, S. A., Manaf, A. A., & Mustapha, M. (2023). Stability and conductivity of water-based colloidal silver nanoparticles conductive inks for sustainable printed electronics. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *153*. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2023.105202

Iverson, B. D., & Garimella, S. V. (2008). Recent advances in microscale pumping technologies: A review and evaluation. *Microfluidics and Nanofluidics*, *5*(2), 145-174. https://doi.org/10.1007/s10404-008-0266-8

Izzo, I., Accoto, D., Menciassi, A., Schmitt, L., & Dario, P. (2007). Modeling and experimental validation of a piezoelectric micropump with novel no-moving-part valves. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *133*(1), 128-140. https://doi.org/10.1016/j.sna.2006.01.049

Jafarpour, M., Nüesch, F., Heier, J., & Abdolhosseinzadeh, S. (2022). Functional Ink Formulation for Printing and Coating of Graphene and Other 2D Materials: Challenges and Solutions. *Small Science*, *2*(11). https://doi.org/10.1002/smsc.202200040

Jalajamony, H. M., Aliyana, A. K., De, S., Stylios, G., & Fernandez, R. E. (2024). Plasma-Aided Inkjet Printing of Silver Nanoparticle Conductive Structures on PDMS for Wearable Applications. *Conference Proceedings - IEEE SOUTHEASTCON*, 876-877. https://doi.org/10.1109/SoutheastCon52093.2024.10500263

Jargalsaikhan, B., Uranchimeg, K., Bor, A., Kim, K. S., & Choi, H. (2024). Particle morphology control for spherical powder fabrication using the ball milling process with DEM simulation. *Particuology*, *90*, 41-50. https://doi.org/10.1016/j.partic.2023.11.019

Jeong, S., Song, H. C., Lee, W. W., Choi, Y., Lee, S. S., & Ryu, B. H. (2010). Combined role of well-dispersed aqueous Ag ink and the molecular adhesive layer in inkjet printing the narrow and highly conductive Ag features on a glass substrate. *Journal of Physical Chemistry C*, *114*(50), 22277-22283. https://doi.org/10.1021/jp106994t

Jianjun, W., Jin, H., Chuqing, X., Hongxiao, G., Chaoyu, L., Qiang, Z., Jie, Z., Pengbing, Z., Yupeng, Y., Jinzhu, Z., Wang, G., & Ruiqi, C. (2023). Actuation waveform auto-design of drop-on-demand inkjet for ejection droplet without satellite. *Journal of Manufacturing Processes*, *102*, 910-920. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.021

JingHongYi-PCB. (2023, Ekim). *PCB Fabrication Process Flow Chart*. JingHongYi PCB (HK) Co. Limited. https://www.pcbelec.com/pcb-fabrication-process

Jones, T. D. A., Hourd, A. C., Liu, T. C., Jia, L. C., Lung, C. M., Zolotovskaya, S., Abdolvand, A., & Tai, C. Y. (2022). Plasma enhanced inkjet printing of particle-free silver ink on polyester fabric for electronic devices. *Micro and Nano Engineering*, *14*. https://doi.org/10.1016/j.mne.2021.100103

Kamyshny, A., Steinke, J., & Magdassi, S. (2011). Metal-based Inkjet Inks for Printed Electronics. Içinde *The Open Applied Physics Journal* (C. 4).

Kang, J., & Auner, G. W. (2011). Simulation and verification of a piezoelectrically actuated diaphragm for check valve micropump design. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *167*(2), 512-516. https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.01.012

Karaş, B., Beedasy, V., Leong, Z., Morley, N. A., Mumtaz, K., & Smith, P. J. (2021). Integrated fabrication of novel inkjet-printed silver nanoparticle sensors on carbon fiber reinforced nylon composites. *Micromachines*, *12*(10). https://doi.org/10.3390/mi12101185

Kartal, Y., & Daş, M. T. (2023). Algılayıcı ve biyomalzeme üretiminde eklemeli imalatın gelişimine genel bir bakış. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *38*(4), 2191-2203. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1075312

Katsigiannis, A. S., Bayliss, D. L., & Walsh, J. L. (2022). Cold plasma for the disinfection of industrial food-contact surfaces: An overview of current status and opportunities. Içinde *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* (C. 21, Sayı 2, ss. 1086-1124). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12885

Kehrer, M., Rottensteiner, A., Hartl, W., Duchoslav, J., Thomas, S., & Stifter, D. (2020). Cold atmospheric pressure plasma treatment for adhesion improvement on polypropylene surfaces. *Surface and Coatings Technology*, *403*. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126389

Khalate, A. A., Bombois, X., Scorletti, G., Babuška, R., Koekebakker, S., & De Zeeuw, W. (2012). A waveform design method for a piezo inkjet printhead based on robust feedforward control. *Journal of Microelectromechanical Systems*, *21*(6), 1365-1374. https://doi.org/10.1109/JMEMS.2012.2205899

Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, *12*(7), 908-931. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011

Kiliszkiewicz, M., Jasińska, L., & Dziedzic, A. (2023). The ink-jet printed flexible interdigital capacitors: manufacturing and ageing tests. *Flexible and Printed Electronics*, *8*(3). https://doi.org/10.1088/2058-8585/acf773

Kim, D., Han, J., Mauchauffé, R., Kim, J., & Moon, S. Y. (2022). Antithetic superhydrophobic/superhydrophilic surfaces formation by simple gas switching in

an atmospheric-pressure cold plasma treatment. *Materials Chemistry and Physics*, *277*. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.125482

Kim, J., Park, S., & Choe, W. (2021). Surface plasma with an inkjet-printed patterned electrode for low-temperature applications. *Scientific Reports*, *11*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-91720-3

Kim, K. N., Lee, S. M., Mishra, A., & Yeom, G. Y. (2016). Atmospheric pressure plasmas for surface modification of flexible and printed electronic devices: A review. Içinde *Thin Solid Films* (C. 598, ss. 315-334). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2015.05.035

Klar, V., Pearce, J. M., Kärki, P., & Kuosmanen, P. (2019). Ystruder: Open source multifunction extruder with sensing and monitoring capabilities. *HardwareX*, *6*, e00080. https://doi.org/10.1016/j.ohx.2019.e00080

Kosmala, A., Wright, R., Zhang, Q., & Kirby, P. (2011). Synthesis of silver nano particles and fabrication of aqueous Ag inks for inkjet printing. *Materials Chemistry and Physics*, *129*(3), 1075-1080. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.05.064

Kralj, M., Krivačić, S., Ivanišević, I., Zubak, M., Supina, A., Marciuš, M., Halasz, I., & Kassal, P. (2022). Conductive Inks Based on Melamine Intercalated Graphene Nanosheets for Inkjet Printed Flexible Electronics. *Nanomaterials*, *12*(17). https://doi.org/10.3390/nano12172936

Kwon, K. S. (2009a). Methods for detecting air bubble in piezo inkjet dispensers. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *153*(1), 50-56. https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.04.024

Kwon, K. S. (2009b). Waveform design methods for piezo inkjet dispensers based on measured meniscus motion. *Journal of Microelectromechanical Systems*, *18*(5), 1118-1125. https://doi.org/10.1109/JMEMS.2009.2026465

Kwon, K. S., Rahman, M. K., Phung, T. H., Hoath, S. D., Jeong, S., & Kim, J. S. (2020). Review of digital printing technologies for electronic materials. *Flexible and Printed Electronics*, *5*(4). https://doi.org/10.1088/2058-8585/abc8ca

Kwon, K.-S., Rahman, Md. K., Phung, T. H., Hoath, S., Jeong, S., & Kim, J. S. (2020). Review of digital printing technologies for electronic materials. *Flexible and Printed Electronics*. https://doi.org/10.1088/2058-8585/abc8ca

Laroque, D. A., Seó, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., & Carciofi, B. A. M. (2022). Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. Içinde *Journal of Food Engineering* (C. 312). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748

Lee, E. R. . (2003). *Microdrop generation*. CRC Press.

Li, H., Liu, J., Li, K., & Liu, Y. (2021). A review of recent studies on piezoelectric pumps and their applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *151*, 107393. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107393

Li, K., Wang, S., Zong, C., Liu, Y., & Song, X. (2021). Diodicity Optimization of Tesla-Type Check Valve Based on Surrogate Modeling Techniques. *Advances in Mechanical Design Proceedings of the 2021 International Conference on Mechanical Design (2021 ICMD)*, 1225-1242.

Li, Q., Zhang, J., Li, Q., Li, G., Tian, X., Luo, Z., Qiao, F., Wu, X., & Zhang, J. (2019). Review of printed electrodes for flexible devices. *Frontiers in Materials*, *5*(January), 1-14. https://doi.org/10.3389/fmats.2018.00077

Liang, G., Zhang, T., Chen, Y., Chen, L., & Shen, S. (2019). Two-phase heat transfer of multi-droplet impact on liquid film. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *139*, 832-847. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.055

Lim, E., Ng, B. T., Hung, Y. M., & Tan, M. K. (2022). Graphene-mediated suppression of Leidenfrost effect for droplets on an inclined surface. *International Journal of Thermal Sciences*, *174*. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107426

Lin, L., & Keidar, M. (2021). A map of control for cold atmospheric plasma jets: From physical mechanisms to optimizations. Içinde *Applied Physics Reviews* (C. 8, Sayı 1). American Institute of Physics Inc. https://doi.org/10.1063/5.0022534

Lin, Q., Yang, B., Xie, J., & Tai, Y. C. (2007). Dynamic simulation of a peristaltic micropump considering coupled fluid flow and structural motion. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, *17*(2), 220-228. https://doi.org/10.1088/0960-1317/17/2/006

Liu, X., Li, X., Wang, M., Cao, S., Wang, X., & Liu, G. (2022). A High-Performance Piezoelectric Micropump with Multi-Chamber in Series. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/app12094483

Lu, X., Liu, D., Xian, Y., Nie, L., Cao, Y., & He, G. (2021). Cold atmospheric-pressure air plasma jet: Physics and opportunities. Içinde *Physics of Plasmas* (C. 28, Sayı 10). American Institute of Physics Inc. https://doi.org/10.1063/5.0067478

Lyu, J., Lider, A., & Kudiiarov, V. (2019). Using ball milling for modification of the hydrogenation/dehydrogenation process in magnesium-based hydrogen storage materials: An overview. Içinde *Metals* (C. 9, Sayı 7). MDPI AG. https://doi.org/10.3390/met9070768

Ma, C., Nikiforov, A., Hegemann, D., De Geyter, N., Morent, R., & Ostrikov, K. (Ken). (2023). Plasma-controlled surface wettability: recent advances and future applications. *International Materials Reviews*, *68*(1), 82-119. https://doi.org/10.1080/09506608.2022.2047420

Ma, H. K., Luo, W. F., & Lin, J. Y. (2015). Development of a piezoelectric micropump with novel separable design for medical applications. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *236*, 57-66. https://doi.org/10.1016/j.sna.2015.10.010

Ma, L. Y., & Soin, N. (2022). Recent Progress in Printed Physical Sensing Electronics for Wearable Health-Monitoring Devices: A Review. Içinde *IEEE Sensors Journal* (C. 22, Sayı 5, ss. 3844-3859). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3142328

Ma, T., Sun, S., Li, B., & Chu, J. (2019). Piezoelectric peristaltic micropump integrated on a microfluidic chip. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *292*, 90-96. https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.04.005

Mahajan, A., Hyun, W. J., Walker, S. B., Lewis, J. A., Francis, L. F., & Frisbie, C. D. (2015). High-resolution, high-aspect ratio conductive wires embedded in plastic substrates. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *7*(3), 1841-1847. https://doi.org/10.1021/am507539a

Maleki, H., & Bertola, V. (2020). Recent advances and prospects of inkjet printing in heterogeneous catalysis. *Catalysis Science and Technology*, *10*(10), 3140-3159. https://doi.org/10.1039/d0cy00040j

Martínez Montejano, R. C., Castillo Escandón, C. M., Espinoza López, V. E., Campos Cantón, I., Neira Velázquez, M. G., & Soria Arguello, G. (2019). Construction of a

power electronic source for cold plasma generation. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, *20*(4), 1-12. https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.047

Matter, F., Luna, A. L., & Niederberger, M. (2020). From colloidal dispersions to aerogels: How to master nanoparticle gelation. *Nano Today*, *30*, 100827. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2019.100827

Mavuri, A., Mayes, A. G., & Alexander, M. S. (2019). Inkjet printing of polyacrylic acid-coated silver nanoparticle Ink onto Paper with Sub-100 Micron Pixel Size. *Materials*, *12*(14). https://doi.org/10.3390/ma12142277

Mazare, A., Anghel, A., Surdu-Bob, C., Totea, G., Demetrescu, I., & Ionita, D. (2018). Silver doped diamond-like carbon antibacterial and corrosion resistance coatings on titanium. *Thin Solid Films*, *657*(April), 16-23. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.04.036

McKerricher, G., Perez, J. G., & Shamim, A. (2015). Fully inkjet printed RF inductors and capacitors using polymer dielectric and silver conductive ink with through vias. *IEEE Transactions on Electron Devices*, *62*(3), 1002-1009. https://doi.org/10.1109/TED.2015.2396004

Merche, D., Vandencasteele, N., & Reniers, F. (2012). Atmospheric plasmas for thin film deposition: A critical review. Içinde *Thin Solid Films* (C. 520, Sayı 13, ss. 4219-4236). https://doi.org/10.1016/j.tsf.2012.01.026

Mikkonen, R., Puistola, P., Jönkkäri, I., & Mäntysalo, M. (2020). Inkjet Printable Polydimethylsiloxane for All-Inkjet-Printed Multilayered Soft Electrical Applications. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *12*(10), 11990-11997. https://doi.org/10.1021/acsami.9b19632

Misra, N. N., Schlüter, O., & Cullen, P. J. (2016). *Cold Plasma in Food and Agriculture: Fundamentals and Applications* (1st bs). Academic Press. https://doi.org/10.1016/C2014-0-00009-3

Mohassieb, S. A., Kirah, K., Dörsam, E., Khalil, A. S. G., & El-Hennawy, H. M. (2017). Effect of silver nanoparticle ink drop spacing on the characteristics of coplanar waveguide monopole antennas printed on flexible substrates. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, *11*(11), 1572-1577. https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0078

Mohith, S., Karanth, P. N., & Kulkarni, S. M. (2019). Recent trends in mechanical micropumps and their applications: A review. *Mechatronics*, *60*(November 2018), 34-55. https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.04.009

Monika, K., Chakraborty, C., Roy, S., Sujith, R., & Datta, S. P. (2021). A numerical analysis on multi-stage Tesla valve based cold plate for cooling of pouch type Li-ion batteries. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *177*, 121560. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121560

Mosadegh, B. (2010). Design and Fabrication of Microfluidic Integrated Circuits using Normally-Closed Elastomeric Valves. *Evaluation*, *March 2015*.

Mostafaei, A., Elliott, A. M., Barnes, J. E., Li, F., Tan, W., Cramer, C. L., Nandwana, P., & Chmielus, M. (2021). Binder jet 3D printing—Process parameters, materials, properties, modeling, and challenges. *Progress in Materials Science*, *119*(May), 100707. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100707

Nastuta, A. V., & Gerling, T. (2022). Cold Atmospheric Pressure Plasma Jet Operated in Ar and He: From Basic Plasma Properties to Vacuum Ultraviolet, Electric Field and

Safety Thresholds Measurements in Plasma Medicine. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(2). https://doi.org/10.3390/app12020644

Noor, I.-. (2021). *Waste Heat Driven Membrane Distillation for Industrial Wastewater Treatment* (Sayı March).

Oktavianty, O., Haruyama, S., Ishii, Y., Kyoutani, T., Darmawan, Z., Novareza, O., & Sirait, M. (2021). Evaluation of the standard deviation of droplet speed on grey-scale technique of DoD inkjet printer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1034*(1), 012121. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1034/1/012121

Oktavianty, O., Ishii, Y., Haruyama, S., Kyoutani, T., Darmawan, Z., & Swara, S. E. (2021). Controlling droplet behaviour and quality of DoD inkjet printer by designing actuation waveform for multi-drop method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1034*(1), 012091. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1034/1/012091

Oktavianty, O., Kyotani, T., Haruyama, S., & Kaminishi, K. (2019). New actuation waveform design of DoD inkjet printer for single and multi-drop ejection method. *Additive Manufacturing*, *25*(December 2018), 522-531. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.008

Oliveira, A. E. F., Pereira, A. C., de Resende, M. A. C., & Ferreira, L. F. (2022). Synthesis of a silver nanoparticle ink for fabrication of reference electrodes. *Talanta Open*, *5*. https://doi.org/10.1016/j.talo.2022.100085

Olsson, A. (1998). *Valve-less Diffuser Micropumps*.

Otto, C., Zahn, S., Rost, F., Zahn, P., Jaros, D., & Rohm, H. (2011). Physical Methods for Cleaning and Disinfection of Surfaces. Içinde *Food Engineering Reviews* (C. 3, Sayı 3-4, ss. 171-188). https://doi.org/10.1007/s12393-011-9038-4

Ozkan, A., Yekeler, M., & Calkaya, M. (2009). Kinetics of fine wet grinding of zeolite in a steel ball mill in comparison to dry grinding. *International Journal of Mineral Processing*, *90*(1-4), 67-73. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2008.10.006

Ozkan, E., Elginoz, N., & Germirli Babuna, F. (2018). Life cycle assessment of a printed circuit board manufacturing plant in Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, *25*(27), 26801-26808. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0280-z

Özada, Ç., Ünal, M., & Yazıcı, M. (2024). Supercapacitor: Fundamentals and materials. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *39*(2), 1315-1331. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1141220

Pandiyan, N., Murugesan, B., Arumugam, M., Sonamuthu, J., Samayanan, S., & Mahalingam, S. (2019). Ionic liquid - A greener templating agent with Justicia adhatoda plant extract assisted green synthesis of morphologically improved Ag-Au/ZnO nanostructure and it's antibacterial and anticancer activities. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *198*(July), 111559. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2019.111559

Park, J., & Öztürk, A. (2014). Mekanik Bilyalı Öğütme Yöntemiyle Gümüş Yüklenmiş TiO 2 Tozlarının Fotokatalitik Özellikleri. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *14*(3), 239-247. https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid/issue/1605/20030#article_cite

Paul, G., Das, P. K., & Manna, I. (2020). Nanoparticle deposition from nanofluid droplets during Leidenfrost phenomenon and consequent rise in transition temperature. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *148*. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119110

Peng, T., Guo, Q., Yang, J., Xiao, J., Wang, H., Lou, Y., & Liang, X. (2019). A high-flow, self-filling piezoelectric pump driven by hybrid connected multiple chambers with umbrella-shaped valves. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *301*(August), 126961. https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126961

Peng, Y. xing, Ni, X., Zhu, Z. cai, Yu, Z. fa, Yin, Z. xin, Li, T. qing, Liu, S. yong, Zhao, L. la, & Xu, J. (2017). Friction and wear of liner and grinding ball in iron ore ball mill. *Tribology International*, *115*, 506-517. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.017

Perelaer, J., Smith, P. J., Mager, D., Soltman, D., Volkman, S. K., Subramanian, V., Korvink, J. G., & Schubert, U. S. (2010). Printed electronics: The challenges involved in printing devices, interconnects, and contacts based on inorganic materials. *Journal of Materials Chemistry*, *20*(39), 8446-8453. https://doi.org/10.1039/c0jm00264j

Plog, J., Jiang, Y., Pan, Y., & Yarin, A. L. (2021). Electrostatically-assisted direct ink writing for additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, *39*. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101644

Pohshna, C., & Mailapalli, D. R. (2023). Modeling the particle size of nanomaterials synthesized in a planetary ball mill. *OpenNano*, *14*. https://doi.org/10.1016/j.onano.2023.100191

Poletti, G., Orsini, F., Raffaele-Addamo, A., Riccardi, C., & Selli, E. (2003). Cold plasma treatment of PET fabrics: AFM surface morphology characterisation. *Applied Surface Science*, *219*(3-4), 311-316. https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00703-7

Poplavko, Y., & Yakymenko, Y. (2020). Functional Dielectrics for Electronics. Içinde *Functional Dielectrics for Electronics*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2018-0-04492-8

Pub Chem. (2025). https://www.chemspider.com/.

Qin, Y. (2015). Micromanufacturing Engineering and Technology. Içinde *William Andrew* (C. 34). Elsevier. https://doi.org/10.1016/C2013-0-19351-8

Rafiee, M., Farahani, R. D., & Therriault, D. (2020). Multi-Material 3D and 4D Printing: A Survey. Içinde *Advanced Science* (C. 7, Sayı 12). John Wiley and Sons Inc. https://doi.org/10.1002/advs.201902307

Rehmani, M. A. A., & Arif, K. M. (2021). High resolution electrohydrodynamic printing of conductive ink with an aligned aperture coaxial printhead. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *115*(9-10), 2785-2800. https://doi.org/10.1007/s00170-021-07075-6

Reinhold, I., Voit, W., Rawson, I., Martin, K., Pope, D., Farnsworth, S., Zapka, W., & Munson, C. (2013, Ekim). Novel Developments in Photonic Sintering of Inkjet Printed Functional Inks. *29th International Conference on Digital Printing Technologies (NIP29) / Digital Fabrication 2013*. www.imaging.org

Rezaei, H., Matin, A. A., & Mohammadnejad, M. (2024). Cold atmospheric plasma treated 3D printed polylactic acid film; application in thin film solid phase microextraction of anticancer drugs. *Talanta*, *266*. https://doi.org/10.1016/j.talanta.2023.125064

Rigo, B., Bateman, A., Lee, J., Kim, H., Lee, Y., Romero, L., Jang, Y. C., Herbert, R., & Yeo, W. H. (2023). Soft implantable printed bioelectronic system for wireless

continuous monitoring of restenosis. *Biosensors and Bioelectronics*, *241*. https://doi.org/10.1016/j.bios.2023.115650

Rodriguez, V. A., Ribas, L., Kwade, A., & Tavares, L. M. (2023). Mechanistic modeling and simulation of a wet planetary ball mill. *Powder Technology*, *429*. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.118901

Rohit, A. (2017). *Optimization and Characterization of a Capillary Contact Micro-Plotter for Printed Electronic Devices* [Master Tezi]. Russ College of Engineering and Technology of Ohio University.

Roshanghias, A., Krivec, M., & Baumgart, M. (2017). Sintering strategies for inkjet printed metallic traces in 3D printed electronics. *Flexible and Printed Electronics*, *2*(4). https://doi.org/10.1088/2058-8585/aa8ed8

Rustamova, E. G., Kagirina, M. S., Gridnev, A. A., Mukhametova, G. M., Gulin, A. A., & Gubin, S. P. (2022). Synthesis of Conductive Silver Ink with a Low Sintering Temperature for Inkjet Printing Applications. *Radioelektronika, Nanosistemy, Informacionnye Tehnologii*, *14*(4), 427-436E. https://doi.org/10.17725/rensit.2022.14.427

Saepurahman, & Hashaikeh, R. (2018). Insight into ball milling for size reduction and nanoparticles production of H-Y zeolite. *Materials Chemistry and Physics*, *220*, 322-330. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.08.080

Samos-Puerto, A., Rodríguez-Gattorno, G., & Ruiz-Gómez, M. A. (2019). Fine tuning of inkjet printability parameters for NiO nanofilms fabrication. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *583*(September), 123959. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123959

Santos, K. H., Ferreira, J. A., Osiro, D., de Carvalho, R. A., Alberto Colnago, L., Alves Júnior, C., & Maria de Jesus Agnolon Pallone, E. (2020). Influence of the cold plasma treatment on the Al2O3/ZrO2 nanocomposites surfaces. *Applied Surface Science*, *531*. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147206

Schoner, C., Jahn, S. F., Jakob, A., Blaudeck, T., Lang, H., & Baumann, R. R. (2011). Concepts of metal-organic decomposition (MOD) silver inks for structured metallization by inkjet printing. *MRS Proceedings*, *1285*, mrsf10-1285-d03-09-f06-09-g07-09. https://doi.org/10.1557/opl.2011.772

Seipel, S., Yu, J., & Nierstrasz, V. A. (2020). Effect of physical parameters and temperature on the piezo-electric jetting behaviour of UV-curable photochromic inks. *Scientific Reports*, *10*(1), 1-10. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75449-z

Shah, M. A., Lee, D. G., Lee, B. Y., & Hur, S. (2021). Classifications and Applications of Inkjet Printing Technology: A Review. *IEEE Access*, *9*, 140079-140102. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119219

Shah, M. A., Lee, D. G., Lee, B. Y., Kim, N. W., An, H., & Hur, S. (2020). Actuating voltage waveform optimization of piezoelectric inkjet printhead for suppression of residual vibrations. *Micromachines*, *11*(10). https://doi.org/10.3390/mi11100900

Shahrim, N. A., Mohd Hafiz, N. N., Ahmad, Z., Azman, A. W., Buys, Y. F., & Sarifuddin, N. (2022). Ink based on poly(3,4-ethylene dioxythiophene), poly(sulfonostyrene) and silver nanoparticles (PEDOT/PSS/SNP) blends for fabrics printing. *Polimery/Polymers*, *67*(6), 249-254. https://doi.org/10.14314/polimery.2022.6.2

Shaikh, M., Liu, X., Amini, K., Steinle, T., & Biegert, J. (2021). High density molecular jets of complex neutral organic molecules with Tesla valves. *Review of Scientific Instruments*, *92*(10), 104103. https://doi.org/10.1063/5.0060904

Shamsudin, S. N. A., Jusoh, M. S., Rosli, A. G. M., Ismail, M. S., & Hj Din, M. S. (2021). Quality Improvement in Flexible Printed Circuit Board (FPCB) Using DMAIC Methodology: An Investigation in Semiconductor Industry. *Journal of Physics: Conference Series*, *2129*(1). https://doi.org/10.1088/1742-6596/2129/1/012021

Shen, Q., Zhang, L., Ji, R., Saetang, V., & Qi, H. (2025). Nonlinear Waveform Optimization for Enhanced Ink Droplet Formation in Material Jetting. *Micromachines*, *16*(4), 445. https://doi.org/10.3390/mi16040445

Shi, T., Shao, M., Zhang, H., Yang, Q., & Shen, X. (2011). Surface modification of porous poly(tetrafluoroethylene) film via cold plasma treatment. *Applied Surface Science*, *258*(4), 1474-1479. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.09.110

Shih, C. C., Burnette, M., Staack, D., Wang, J., & Tai, B. L. (2019). Effects of cold plasma treatment on interlayer bonding strength in FFF process. *Additive Manufacturing*, *25*, 104-111. https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.005

Simonenko, N. P., Fisenko, N. A., Fedorov, F. S., Simonenko, T. L., Mokrushin, A. S., Simonenko, E. P., Korotcenkov, G., Sysoev, V. V., Sevastyanov, V. G., & Kuznetsov, N. T. (2022). Printing Technologies as an Emerging Approach in Gas Sensors: Survey of Literature. İçinde *Sensors* (C. 22, Sayı 9). MDPI. https://doi.org/10.3390/s22093473

Smith, M., Choi, Y. S., Boughey, C., & Kar-Narayan, S. (2017). Controlling and assessing the quality of aerosol jet printed features for large area and flexible electronics. *Flexible and Printed Electronics*, *2*(1). https://doi.org/10.1088/2058-8585/aa5af9

Stempien, Z., Rybicki, E., Rybicki, T., & Lesnikowski, J. (2015). Inkjet-printing deposition of silver electro-conductive layers on textile substrates at low sintering temperature by using an aqueous silver ions-containing ink for textronic applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *224*, 714-725. https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.10.074

Stoyanov, S., Tourloukis, G., Tilford, T., & Bailey, C. (2016). Modelling methodologies for assessment of 3D inkjet-printed electronics. *2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems, EuroSimE 2016*, *44*(0), 1-8. https://doi.org/10.1109/EuroSimE.2016.7463323

Stüwe, D., Mager, D., Biro, D., & Korvink, J. G. (2015). Inkjet technology for crystalline silicon photovoltaics. *Advanced Materials*, *27*(4), 599-626. https://doi.org/10.1002/adma.201403631

Sun, J., Sun, Y., Jia, H., Bi, H., Chen, L., Que, M., Xiong, Y., Han, L., & Sun, L. (2022). A novel pre-deposition assisted strategy for inkjet printing graphene-based flexible pressure sensor with enhanced performance. *Carbon*, *196*, 85-91. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.04.021

Tahmasebipour, M., & Paknahad, A. A. (2019). Unidirectional and bidirectional valveless electromagnetic micropump with PDMS-Fe3O4 nanocomposite magnetic membrane. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, *29*(7). https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab1dbe

Tao, R., Ning, H., Chen, J., Zou, J., Fang, Z., Yang, C., Zhou, Y., Zhang, J., Yao, R., & Peng, J. (2018). Inkjet Printed Electrodes in Thin Film Transistors. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, *6*, 774-790. https://doi.org/10.1109/JEDS.2018.2852288

Thomas, S. K., & Muruganandam, T. M. (2018). A review of acoustic compressors and pumps from fluidics perspective. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *283*, 42-53. https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.09.031

Trenkle, F., Haeberle, S., & Zengerle, R. (2011). Normally-closed peristaltic micropump with re-usable actuator and disposable fluidic chip. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *154*(2), 137-141. https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.12.069

Ummartyotin, S., Bunnak, N., Juntaro, J., Sain, M., & Manuspiya, H. (2012). Synthesis of colloidal silver nanoparticles for printed electronics. *Comptes Rendus Chimie*, *15*(6), 539-544. https://doi.org/10.1016/j.crci.2012.03.006

Vaithilingam, J., Saleh, E., Körner, L., Wildman, R. D., Hague, R. J. M., Leach, R. K., & Tuck, C. J. (2018). 3-Dimensional inkjet printing of macro structures from silver nanoparticles. *Materials and Design*, *139*, 81-88. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.10.070

Van Der Bos, A., Segers, T., Jeurissen, R., Van Den Berg, M., Reinten, H., Wijshoff, H., Versluis, M., & Lohse, D. (2011). Infrared imaging and acoustic sizing of a bubble inside a micro-electro-mechanical system piezo ink channel. *Journal of Applied Physics*, *110*(3). https://doi.org/10.1063/1.3606567

Velmurugan, P., Mohanavel, V., Sekar, P., Vijayanand, S., Chinnathambi, A., Govindasamy, C., & Sivakumar, S. (2022). Influence of dissolved oxygen on the synthesis of Ag-Au mono and bimetallic nanostructure using Cudrania tricuspidata leaf extract and its broad-spectrum antibacterial activity. *Materials Letters*, *310*, 131471. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.131471

Venkatesh, N. (2018). Metallic Nanoparticle: A Review. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, *4*(2), 3765-3775. https://doi.org/10.26717/bjstr.2018.04.0001011

Verma, P., Saha, R., & Chaira, D. (2018). Waste steel scrap to nanostructured powder and superior compact through powder metallurgy: Powder generation, processing and characterization. *Powder Technology*, *326*, 159-167. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.061

Vida, J., Solak, S., Shao, Y., Homola, T., List-Kratochvil, E., & Hermerschmidt, F. (2025). Sintering of inkjet-printed silver nanoparticles by large-area atmospheric pressure nitrogen plasma. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, *131*(2). https://doi.org/10.1007/s00339-024-08206-y

von Woedtke, T., Reuter, S., Masur, K., & Weltmann, K. D. (2013). Plasmas for medicine. Içinde *Physics Reports* (C. 530, Sayı 4, ss. 291-320). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.physrep.2013.05.005

Vyas, R., Lakafosis, V., Lee, H., Shaker, G., Yang, L., Orecchini, G., Traille, A., Tentzeris, M. M., & Roselli, L. (2011). Inkjet printed, self powered, wireless sensors for environmental, gas, and authentication-based sensing. *IEEE Sensors Journal*, *11*(12), 3139-3152. https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2166996

Wang, D. H., Tang, L. K., Peng, Y. H., & Yu, H. Q. (2019). Principle and structure of a printed circuit board process–based piezoelectric microfluidic pump integrated into printed circuit board. Içinde *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* (C. 30, Sayı 17, ss. 2595-2604). https://doi.org/10.1177/1045389X19869519

Wang, H., & Chen, X. (2022). Optimization of micromixer based on an improved Tesla valve-typed structure. Içinde *Journal of the Brazilian Society of Mechanical*

Sciences and Engineering (C. 44, Sayı 4). https://doi.org/10.1007/s40430-022-03454-6

Wang, J., Yang, Z., Liu, Y., Shen, Y., Chen, S., & Yu, J. (2018). The effect of surface wettability on the performance of a piezoelectric membrane pump. *AIP Advances*, *8*(4). https://doi.org/10.1063/1.5017993

Wang, S., Wu, X., Lu, J., Luo, Z., Xie, H., Zhang, X., Lin, K., & Wang, Y. (2022). Inkjet-Printed Silver Nanowire Ink for Flexible Transparent Conductive Film Applications. *Nanomaterials*, *12*(5). https://doi.org/10.3390/nano12050842

Wang, X., Guo, W., Zhu, Y., Liang, X., Wang, F., & Peng, P. (2018). Electrical and mechanical properties of ink printed composite electrodes on plastic substrates. *Applied Sciences (Switzerland)*, *8*(11). https://doi.org/10.3390/app8112101

Wang, Y. H., Du, D. X., Xie, H., Zhang, X. B., Lin, K. W., Wang, K., & Fu, E. (2021). Printability and electrical conductivity of silver nanoparticle-based conductive inks for inkjet printing. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, *32*(1), 496-508. https://doi.org/10.1007/s10854-020-04828-z

Wang, Y., Hong, Y., Zhou, G., He, W., Gao, Z., Wang, S., Wang, C., Chen, Y., Weng, Z., & Wang, Y. (2019). Compatible Ag+ Complex-Assisted Ultrafine Copper Pattern Deposition on Poly(ethylene terephtalate) Film with Micro Inkjet Printing. *ACS Applied Materials and Interfaces*, *11*(47), 44811-44819. https://doi.org/10.1021/acsami.9b11690

Wang, Y., Uesugi, K., & Morishima, K. (2019). A Simple Micro Check Valve Using Patterned Hydrogel Valve Core. *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*, *2019-Janua*(January), 347-349. https://doi.org/10.1109/MEMSYS.2019.8870633

Wang, Y., Wu, X., Wang, K., Lin, K., Xie, H., Zhang, X., & Li, J. (2021). Novel insights into inkjet printed silver nanowires flexible transparent conductive films. *International Journal of Molecular Sciences*, *22*(14). https://doi.org/10.3390/ijms22147719

Wiklund, J., Karakoç, A., Palko, T., Yiğitler, H., Ruttik, K., Jäntti, R., & Paltakari, J. (2021). A Review on Printed Electronics: Fabrication Methods, Inks, Substrates, Applications and Environmental Impacts. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, *5*(3), 89. https://doi.org/10.3390/jmmp5030089

Winter, J., Brandenburg, R., & Weltmann, K. D. (2015). Atmospheric pressure plasma jets: An overview of devices and new directions. *Plasma Sources Science and Technology*, *24*(6). https://doi.org/10.1088/0963-0252/24/6/064001

Woias, P. (2005). Micropumps—past, progress and future prospects. *Sensors and Actuators B: Chemical*, *105*(1), 28-38. https://doi.org/10.1016/j.snb.2004.02.033

Wu, W. (2019). Stretchable electronics: functional materials, fabrication strategies and applications. *Science and Technology of Advanced Materials*, *20*(1), 187-224. https://doi.org/10.1080/14686996.2018.1549460

Wu, X., He, L., Hou, Y., Tian, X., & Zhao, X. (2021). Advances in passive check valve piezoelectric pumps. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *323*, 112647. https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.112647

Wünscher, S., Abbel, R., Perelaer, J., & Schubert, U. S. (2014). Progress of alternative sintering approaches of inkjet-printed metal inks and their application for manufacturing of flexible electronic devices. Içinde *Journal of Materials Chemistry*

C (C. 2, Sayı 48, ss. 10232-10261). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/c4tc01820f

Xu, Y., Yan, W., Cao, T., & Guo, L. (2014). Study on the valveless micropumps with saw-tooth microchannels. *IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA*, 1251-1254. https://doi.org/10.1109/ICCA.2014.6871102

Yamahata, C., Lacharme, F., Burri, Y., & Gijs, M. A. M. (2005). A ball valve micropump in glass fabricated by powder blasting. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, *110*(1), 1-7. https://doi.org/10.1016/j.snb.2005.01.005

Yan, K., Li, J., Pan, L., & Shi, Y. (2020). Inkjet printing for flexible and wearable electronics. Içinde *APL Materials* (C. 8, Sayı 12). American Institute of Physics Inc. https://doi.org/10.1063/5.0031669

Yan, Q., Yin, Y., Sun, W., & Fu, J. (2021). Advances in valveless piezoelectric pumps. *Applied Sciences (Switzerland)*, *11*(15). https://doi.org/10.3390/app11157061

Yang, H., Tsai, T. H., & Hu, C. C. (2008). Portable valve-less peristaltic micropump design and fabrication. *DTIP of MEMS and MOEMS - Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS*, 273-278. https://doi.org/10.1109/DTIP.2008.4752999

Yang, J., Zheng, F., & Derby, B. (2021). Stability of Lines with Zero Receding Contact Angle Produced by Inkjet Printing at Small Drop Volume. *Langmuir*, *37*(1), 26-34. https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01928

Yang, W., List-Kratochvil, E. J. W., & Wang, C. (2019). Metal particle-free inks for printed flexible electronics. Içinde *Journal of Materials Chemistry C* (C. 7, Sayı 48, ss. 15098-15117). Royal Society of Chemistry. https://doi.org/10.1039/c9tc05463d

Yang, W., Mathies, F., Unger, E. L., Hermerschmidt, F., & List-Kratochvil, E. J. W. (2020). One-pot synthesis of a stable and cost-effective silver particle-free ink for inkjet-printed flexible electronics. *Journal of Materials Chemistry C*, *8*(46), 16443-16451. https://doi.org/10.1039/d0tc03864d

Yao, Y., Xie, G., Hou, Y. Q., Li, R. X., Luo, W. H., Peng, R. Z., & Yu, Z. L. (2014). Noisy-power dissipation and efficiency in NiO/Fe2O3 wet grinding by planetary ball mill. *Oral Oncology*, *50*(10), 2695-2703. https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63400-2

Yeming, S., & Junyao, W. (2019). Digitally-controlled driving power supply for dual-active-valve piezoelectric pump. *Microsystem Technologies*, *25*(4), 1257-1265. https://doi.org/10.1007/s00542-018-4101-1

Yontar, A. A., Sofuoğlu, D., Değirmenci, H., Biçer, Ş., & Ayaz, T. (2021). Investigation of Flow Characteristics for a Multi-Stage Tesla Valve At Laminar and Turbulent Flow Conditions. *Journal of Scientific Reports-A*, *47*, 47-67.

Yu, J., Jin, S. H., Raju, K., Lee, Y., & Lee, H. K. (2021). Analysis of individual and interaction effects of processing parameters on wet grinding performance in ball milling of alumina ceramics using statistical methods. *Ceramics International*, *47*(22), 31202-31213. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.07.296

Zainal, M. N. F., Redzuan, N., & Misnal, M. F. I. (2015). Brief review: Cold plasma. *Jurnal Teknologi*, *74*(10), 57-61. https://doi.org/10.11113/jt.v74.4834

Zeng, G., Xu, M., Mou, J., Hua, C., & Fan, C. (2023). Application of Tesla Valve's Obstruction Characteristics to Reverse Fluid in Fish Migration. *Water (Switzerland)*, *15*(1). https://doi.org/10.3390/w15010040

Zhang, F. L., Zhu, M., & Wang, C. Y. (2008). Parameters optimization in the planetary ball milling of nanostructured tungsten carbide/cobalt powder. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, *26*(4), 329-333. https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2007.08.005

Zhang, J. H., Wang, Y., & Huang, J. (2017). Advances in Valveless Piezoelectric Pump with Cone-shaped Tubes. *Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition)*, *30*(4), 766-781. https://doi.org/10.1007/s10033-017-0151-z

Zhao, X., Zhao, D., & Guo, Q. (2020). A theoretical and experimental study of a piezoelectric pump with two elastic chambers. *Sensors (Switzerland)*, *20*(20), 1-21. https://doi.org/10.3390/s20205867

Zheng, Y., Li, S., Shi, W., & Yu, J. (2014). *Spray-coated nanoscale conductive patterns based on in situ sintered silver nanoparticle inks*. http://www.nanoscalereslett.com/content/9/1/145

Zhu, Z., Gong, Z., Qu, P., Li, Z., Rasaki, S. A., Liu, Z., Wang, P., Liu, C., Lao, C., & Chen, Z. (2021). Additive manufacturing of thin electrolyte layers via inkjet printing of highly-stable ceramic inks. *Journal of Advanced Ceramics*, *10*(2), 279-290. https://doi.org/10.1007/s40145-020-0439-9

EKLER

EK 1 Persitaltik Pompanın Kontrolünü Sağlayan Kod Bluğu

EK 2 Şırınga Dozaj Pompasının Arduino Kodu

EK 3 Bilyalı Öğütme Düzeneğinin Motorunu Döndüren Kod Bloğu

EK 4 Sırasıyla 1. Katmandan 20. Katmana Kadar Basılan Numunelerin G-kod Bloğu

EK 1. Persitaltik Pompanın Kontrolünü Sağlayan Kod Bluğu

```
#include <Stepper.h>
const int stepsPerRevolution = 100;  //devir başına step
// düşürünce yavaşlıyor / sürücüdeki adım yüksek olmalı
// adım kütüphanesine göre 8-11 arası pinler kullanılacak:
Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9);
void setup() {
  // 60 rpm deki hız: direkt hız verisi burada doğrusal orantı mevcut
  myStepper.setSpeed(545);
  // initialize the serial port:
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  // step one revolution  in one direction:
  // Serial.println("clockwise");
  myStepper.step(275);  //myStepper.step(12800); tam tur çeviriyor
  // myStepper.step(-1);
 // delay(8);
  //  myStepper.step(250);  //myStepper.step(12800); tam tur çeviriyor
  // delay(1);
 //myStepper.step(325);
 // myStepper.step(-1);
 //delay(500);
}
```

EK 2. Şırınga Dozaj Pompasının Arduino Kodu

```
#include <Stepper.h>
const int buttonpin = 2;
const int havaalma = 5;
const int basim = 1;
const int stepsPerRevolution = 400;  // devir başına adım sayısı
// motor düşürünce yavaşlıyor / sürücüdeki adım yüksek olmalı
Stepper myStepper(stepsPerRevolution, 8, 9);
void setup() {
  // set the speed at 60 rpm: direkt hız verisi burada doğrusal orantı mevcut
  myStepper.setSpeed(400);  //setspeed 106 ile basıyoruz steprevolution 400 (su için)
  pinMode(buttonpin, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  //if (digitalRead(buttonpin) == HIGH) {
    //  myStepper.step(1);
    //  myStepper.setSpeed(400);
 //koşul doğruysa burada yazılanları yap
 //} else {
  // myStepper.step(-1);
  // myStepper.setSpeed(176);
 //koşul yanlışsa burada yazılanları yap
 //}
  if (digitalRead(buttonpin) == HIGH && digitalRead(havaalma) == HIGH ) {
     myStepper.step(1); // yukarı çıkıyor 800 ile
     myStepper.setSpeed(800);
} else if (digitalRead(buttonpin) == LOW && digitalRead(havaalma) == HIGH ) {
   myStepper.step(-1); //aşağıya basıyor hızlı 800 ile
   myStepper.setSpeed(898);
} else if (digitalRead(buttonpin) == HIGH && digitalRead(havaalma) == LOW) {
```

```
    myStepper.step(1);// yukarı çıkıyor 400 ile
    myStepper.setSpeed(400);
} else if  (digitalRead(buttonpin) == LOW && digitalRead(havaalma) == LOW) {
  myStepper.step(-1); //aşağıya basıyor
  myStepper.setSpeed(725); //106
}}
 // step one revolution  in one direction:
 // Serial.println("clockwise");
// myStepper.step(i);  //myStepper.step(12800); tam tur çeviriyor
 // myStepper.step(-1); -1 ileri +1 geri
 //delay(3050);
  // myStepper.step(3000);  //myStepper.step(12800); tam tur çeviriyor
 // delay(1);
//myStepper.step(325);
// myStepper.step(-1);
//delay(500);
//}
```

EK 3. Bilyalı Öğütme Düzeneğinin Motorunu Döndüren Kod Bloğu

```
#define dirPin 9
#define stepPin 8
//#define dirPin 2
//#define stepPin 3
//#define stepsPerRevolution 400
int a = 680;  // dm542 200 de düzgün ve hızlı çeviriyor  / 160 ta iyi çeviriyor /220 iyi çeviriyor
//820 ses var, çalışan değerler 150 - 157 - 162 - 480 - 680, (680=110rpm, 480=150rpm olarak ölçülmüştür)
void setup() {
  // Declare pins as output:
  pinMode(stepPin, OUTPUT);
  pinMode(dirPin, OUTPUT);
}
void loop() {
  // Set the spinning direction clockwise:
  digitalWrite(dirPin, HIGH);
  // Spin the stepper motor 1 revolution slowly:
  for (int i = 0; i < stepsPerRevolution; i++) {
    // These four lines result in 1 step:
    digitalWrite(stepPin, HIGH);
    delayMicroseconds(a);
    digitalWrite(stepPin, LOW);
    delayMicroseconds(a);
  }}
```

EK 4. 1. Katmandan 20. Katmana Kadar Basılan Numunelerin G-kod Bloğu

```
G28 ; Eve git
;G1 Z15 F500
M107 ; Fanları kapat
G90 ; Mutlak pozisyon
M82 ; Extruder in absolute mode
;M104 T0 S0
G1 Z4.9 F500
G92 Z0 E0 ; Reset extruder position
;M109 T0 S0
;Katman sayısı: 1
;Katman:0
M107
G1 F2400 E-4.00000
;G1 F500 Z1.000
G1 F2400 E0.000
G0 F500 Z4.000
G0 F5000 X0 Y160.000
G0 F5000 X0 Y200
G0 F5000 X10 Y200
G0 F5000 X10 Y160
G0 F5000 X30 Y160.000
G1 F500 Z0.000

G1 F150 X60 Y160.000 E1;1
;G0 F7000 X60 Y170.000
G3 F15000 X60 Y170.000 R5
;G2 F15000 X60 Y170.000 R5
G1 F150 X30 Y170.000 E2;2
;G0 F7000 X30 Y180.000
G2 F15000 X30 Y180.000 R5
;G3 F15000 X30 Y180.000 R5
G1 F150 X60 Y180.000 E3;3
G3 F15000 X60 Y190.000 R5
;G2 F15000 X60 Y190.000 R5
;G0 F7000 X60 Y190.000
G1 F150 X30 Y190.000 E4;4
G2 F15000 X30 Y200.000 R5
;G3 F15000 X30 Y200.000 R5
;G0 F7000 X30 Y200.000
G1 F150 X60 Y200.000 E5;5
G3 F15000 X60 Y210.000 R5
;G2 F15000 X60 Y210.000 R5
;G0 F7000 X60 Y210.000
G1 F150 X30 Y210.000 E6;6
G2 F15000 X30 Y220.000 R5
;G3 F15000 X30 Y220.000 R5
;G0 F7000 X30 Y220.000
G1 F150 X60 Y220.000 E7;7
;G0 F7000 X60 Y230.000
G3 F15000 X60 Y230.000 R5
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; 2 ye Don 2
G0 F15000 X70 Y360.000 ; 2 ye Don 2
G0 F5000 X70 Y180.000 ; 2 ye Don 2
G2 F15000 X60 Y170.000 R10 ; 2 ye Don 2
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X30 Y170.000 E2;2
;G0 F7000 X30 Y180.000
G2 F15000 X30 Y180.000 R5
;G3 F15000 X30 Y180.000 R5
G1 F150 X60 Y180.000 E3;3
G3 F15000 X60 Y190.000 R5
;G2 F15000 X60 Y190.000 R5
;G0 F7000 X60 Y190.000
G1 F150 X30 Y190.000 E4;4
G2 F15000 X30 Y200.000 R5
;G3 F15000 X30 Y200.000 R5
;G0 F7000 X30 Y200.000
G1 F150 X60 Y200.000 E5;5
G3 F15000 X60 Y210.000 R5
;G2 F15000 X60 Y210.000 R5
;G0 F7000 X60 Y210.000
G1 F150 X30 Y210.000 E6;6
G2 F15000 X30 Y220.000 R5
```

```
;G3 F15000 X30 Y220.000 R5
;G0 F7000 X30 Y220.000
G1 F150 X60 Y220.000 E7;7
;G0 F7000 X60 Y230.000
G3 F15000 X60 Y230.000 R5
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G0 F500 Z4.000
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S10 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 3 ye Don 3
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 3 ye Don 3
G0 F5000 X20 Y190.000 ; 3 ye Don 3
G3 F15000 X30 Y180.000 R10 ; 3 ye Don 3
;_____
G1 F500 Z0.000
G1 F150 X60 Y180.000 E3;3
G3 F15000 X60 Y190.000 R5
;G2 F15000 X60 Y190.000 R5
;G0 F7000 X60 Y190.000
G1 F150 X30 Y190.000 E4;4
G2 F15000 X30 Y200.000 R5
;G3 F15000 X30 Y200.000 R5
;G0 F7000 X30 Y200.000
G1 F150 X60 Y200.000 E5;5
G3 F15000 X60 Y210.000 R5
;G2 F15000 X60 Y210.000 R5
;G0 F7000 X60 Y210.000
G1 F150 X30 Y210.000 E6;6
G2 F15000 X30 Y220.000 R5
;G3 F15000 X30 Y220.000 R5
;G0 F7000 X30 Y220.000
G1 F150 X60 Y220.000 E7;7
;G0 F7000 X60 Y230.000
G3 F15000 X60 Y230.000 R5
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S20 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
;G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; 4 ye Don 4
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ; 4 ye Don 4
```

```
G0 F5000 X70 Y200.000 ; 4 ye Don 4
G2 F15000 X60 Y190.000 R10 ; 4 ye Don 4
;_____
G1 F500 Z0.000
G1 F150 X30 Y190.000 E4;4
G2 F15000 X30 Y200.000 R5
;G3 F15000 X30 Y200.000 R5
;G0 F7000 X30 Y200.000
G1 F150 X60 Y200.000 E5;5
G3 F15000 X60 Y210.000 R5
;G2 F15000 X60 Y210.000 R5
;G0 F7000 X60 Y210.000
G1 F150 X30 Y210.000 E6;6
G2 F15000 X30 Y220.000 R5
;G3 F15000 X30 Y220.000 R5
;G0 F7000 X30 Y220.000
G1 F150 X60 Y220.000 E7;7
;G0 F7000 X60 Y230.000
G3 F15000 X60 Y230.000 R5
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S30 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 5 ye Don 5
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 5 ye Don 5
G0 F5000 X20 Y210.000 ; 5 ye Don 5
G3 F15000 X30 Y200.000 R10 ; 5 ye Don 5
;_____
G1 F500 Z0.000
G1 F150 X60 Y200.000 E5;5
G3 F15000 X60 Y210.000 R5
;G2 F15000 X60 Y210.000 R5
;G0 F7000 X60 Y210.000
G1 F150 X30 Y210.000 E6;6
G2 F15000 X30 Y220.000 R5
;G3 F15000 X30 Y220.000 R5
;G0 F7000 X30 Y220.000
G1 F150 X60 Y220.000 E7;7
;G0 F7000 X60 Y230.000
G3 F15000 X60 Y230.000 R5
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S40 ; Bekle Kurusun
```

```
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
;G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; 6 ye Don 6
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ; 6 ye Don 6
G0 F5000 X70 Y220.000 ; 6 ye Don 6
G2 F15000 X60 Y210.000 R10 ; 6 ye Don 6
;_____
G1 F500 Z0.000
G1 F150 X30 Y210.000 E6;6
G2 F15000 X30 Y220.000 R5
;G3 F15000 X30 Y220.000 R5
;G0 F7000 X30 Y220.000
G1 F150 X60 Y220.000 E7;7
;G0 F7000 X60 Y230.000
G3 F15000 X60 Y230.000 R5
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S50 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 7 ye Don 7
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 7 ye Don 7
G0 F5000 X20 Y230.000 ; 7 ye Don 7
G3 F15000 X30 Y220.000 R10 ; 7 ye Don 7
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X60 Y220.000 E7;7
;G0 F7000 X60 Y230.000
G3 F15000 X60 Y230.000 R5
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S60 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
;G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; 8 ye Don 8
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ; 8 ye Don 8
G0 F5000 X70 Y240.000 ; 8 ye Don 8
G2 F15000 X60 Y230.000 R10 ; 8 ye Don 8
;_____
G1 F500 Z0.000;
```

```
G1 F150 X30 Y230.000 E8;8
;G0 F7000 X30 Y240.000
G2 F15000 X30 Y240.000 R5
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S70 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 9 ye Don 9
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 9 ye Don 9
G0 F5000 X20 Y250.000 ; 9 ye Don 9
G3 F15000 X30 Y240.000 R10 ; 9 ye Don 9
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X60 Y240.000 E9;9
G3 F15000 X60 Y250.000 R5
;G0 F7000 X60 Y250.000
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S80 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
;G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; 10 ye Don 10
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ;
;G0 F15000 X70 Y360.000 ; 10 ye Don 10
G0 F5000 X70 Y260.000 ; 10 ye Don 10
G2 F15000 X60 Y250.000 R10 ; 10 ye Don 10
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X30 Y250.000 E10;10
G2 F15000 X30 Y260.000 R5
;G0 F7000 X30 Y260.000
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
```

```
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S90 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 11 ye Don 11
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 11 ye Don 11
G0 F5000 X20 Y270.000 ; 11 ye Don 11
G3 F15000 X30 Y260.000 R10 ; 11 ye Don 11
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X60 Y260.000 E11;11
G3 F15000 X60 Y270.000 R5
;G0 F7000 X60 Y270.000
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S100 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
;G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; 12 ye Don 12
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ; 12 ye Don 12
G0 F5000 X70 Y280.000 ; 12 ye Don 12
G2 F15000 X60 Y270.000 R10 ; 12 ye Don 12
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X30 Y270.000 E12;12
G2 F15000 X30 Y280.000 R5
;G0 F7000 X30 Y280.000
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S110 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 13 ye Don 13
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 13 ye Don 13
G0 F5000 X20 Y290.000 ; 13 ye Don 13
G3 F15000 X30 Y280.000 R10 ; 13 ye Don 13
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X60 Y280.000 E13;13
G3 F15000 X60 Y290.000 R5
;G0 F7000 X60 Y290.000
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S120 ; Bekle Kurusun
```

```
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ;
;G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; 14 ye Don 14
;G0 F15000 X70 Y360.000 ; 14 ye Don 14
G0 F5000 X70 Y300.000 ; 14 ye Don 14
G2 F15000 X60 Y290.000 R10 ; 14 ye Don 14
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X30 Y290.000 E14;14
G2 F15000 X30 Y300.000 R5
;G0 F7000 X30 Y300.000
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S130 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 15 ye Don 15
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 15 ye Don 15
G0 F5000 X20 Y310.000 ; 15 ye Don 15
G3 F15000 X30 Y300.000 R10 ; 15 ye Don 15
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X60 Y300.000 E15;15
G3 F15000 X60 Y310.000 R5
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S140 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ;16 ye Don 16
;G0 F15000 X70 Y360.000 ; 16 ye Don 16
G0 F5000 X70 Y320.000 ; 16 ye Don 16
G2 F15000 X60 Y310.000 R10 ; 16 ye Don 16
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X30 Y310.000 E16;16
G2 F15000 X30 Y320.000 R5
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S150 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
_
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 17 ye Don 17
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 17 ye Don 17
G0 F5000 X20 Y330.000 ; 17 ye Don 17
G3 F15000 X30 Y320.000 R10 ; 17 ye Don 17
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X60 Y320.000 E17;17
G3 F15000 X60 Y330.000 R5
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S160 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X80 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ; 18 ye Don 18
;G0 F15000 X70 Y360.000 ; 18 ye Don 18
G0 F5000 X70 Y340.000 ; 18 ye Don 18
G2 F15000 X60 Y330.000 R10 ; 18 ye Don 18
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X30 Y330.000 E18;18
```

```
G2 F15000 X30 Y340.000 R5
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S170 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X30 Y360
;_____
;_____
G3 F15000 X20 Y350.000 R10 ; 19 ye Don 19
;G0 F15000 X20 Y360.000 ; 19 ye Don 19
G0 F15000 X20 Y350.000 ; 19 ye Don 19
G3 F15000 X30 Y340.000 R10 ; 19 ye Don 19
;_____
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X60 Y340.000 E19;19
G3 F15000 X60 Y350.000 R5
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
G4 S180 ; Bekle Kurusun
G0 F500 X120 Z4.000
G0 F5000 X70 Y360
;_____
;_____
;G3 F15000 X70 Y350.000 R10 ; 20 ye Don 20
;G0 F15000 X70 Y360.000 ; 20 ye Don 20
G0 F15000 X70 Y360.000 ; 20 ye Don 20
G2 F15000 X60 Y350.000 R10 ; 20 ye Don 20
;_____
_
G1 F500 Z0.000;
G1 F150 X30 Y350.000 E20;20
G1 F500 Z4.000;
;_____
G2 F15000 X30 Y360.000 R5 ; Parka git
G0 F5000 X230 Y360 Z30; Parka git
;_____
M107 ;
G91 ;
G90 ;
G92 E0 ; E değerini sıfırlama
M84 ; Motorları kapatma
```