



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



# **Biyomedikal Uygulamaları İçin Taşınabilir Elektroegirme Sprey Tabancasının Tasarımı, Üretimi ve Performansı**

Ceylin Eda KARACAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**

Doç.Dr. Nazmi EKREN

İSTANBUL, 2019



**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



# **Biyomedikal Uygulamaları İçin Taşınabilir Elektroegirme Sprey Tabancasının Tasarımı, Üretimi ve Performansı**

Ceylin Eda KARACAN  
(523116015)

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği  
Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN**  
Doç.Dr. Nazmi EKREN

**İSTANBUL, 2019**

**MARMARA ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Öğrencisi Ceylin Eda KARACAN'ın “**Biyomedikal Uygulamaları İçin Taşınabilir Elektroegirme Sprey Tabancısının Tasarımı, Üretimi ve Performansı**” başlıklı tez çalışması, 26/08/2019 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

**Jüri Üyeleri**

Doç.Dr. Nazmi EKREN (Danışman)

Marmara Üniversitesi .....(İMZA).....

Doç.Dr. Oğuzhan GÜNDÜZ (Üye)

Marmara Üniversitesi .....(İMZA).....

Doç.Dr. Cem Bülent ÜSTÜNDAĞ (Üye)

Yıldız Teknik Üniversitesi .....(İMZA).....

**ONAY**

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 4/9.2019 tarih ve 2019/18-02 sayılı kararı ile Ceylin Eda KARACAN'ın Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Elektronik Mühendisliği(Türkçe) Programında Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

  
**Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü**  
**Prof. Dr. Bülent EKİCİ**

## **TEŞEKKÜR**

Bu tez çalıőmasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç.Dr. Nazmi Ekren'e ve tım desteklerinden dolayı aileme sonsuz teşekkür ederim. Ayrıca bu tez alıőması FEN-C-YLP- 101018-0539 numaralı BAPKO Projesi kapsamında tamamlanmış olup desteklerinden dolayı BAPKO ekibine teőekkürlerimi arz ederim.

**Ađustos 2019**

**Ceylin Eda KARACAN**



# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER .....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	v
SEMBOLLER.....	vi
KISALTMALAR .....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
TABLO LİSTESİ.....	xi
<b>1.GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2.NANOLİF ÜRETİM YÖNTEMLERİ .....</b>	<b>5</b>
2.1 Fibrilasyon Tekniği ile Nanoliflerin Elde Edilme Süreci .....	5
2.2 Meltblown İşlemi ile Nanolif Elde Edilme Süreci .....	5
2.3 Spunbond İşlemi ile Nanolif Elde Edilme Süreci .....	9
2.4 Bikomponent Lifler Yoluyla Nanolif Üretimi .....	12
<b>3.ELEKTRO EĞİRME İŞLEMİNİN TARİHSEL SÜREÇTEKİ GELİŞİMİ.....</b>	<b>16</b>
<b>4.ELEKTRO EĞİRME İŞLEMİ İLE NANOLİF ÜRETİM SÜRECİ .....</b>	<b>26</b>
4.1 Elektro Eğirme İşlemi.....	26
4.1.1 Damlacık oluşumu .....	28
4.1.2 Taylor konisi oluşumu .....	29
4.1.3 Elektro eğirme jetinin oluşumu .....	30
4.1.4 Kararlı bölgede jetin uzaması.....	31
4.1.5 Kararsız bölgenin oluşumu .....	31
4.1.6 Lif formunda katılma.....	35
4.2 Elektro Eğirme İşlemine Etkileyen Parametreler .....	36
<b>5. BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI İÇİN TAŞINABİLİR ELEKTRO EĞİRME SPREY TABANCASININ TASARIMI .....</b>	<b>38</b>
5.1 Taşınabilir Elektro Eğirme Sprey Tabancasının Tasarımı için Seçilen Elektronik Donanımlar .....	38
5.1.1 Dc motor .....	38
5.1.2 Kontrol kartı .....	39
5.1.3 Oled ekran .....	39

5.1.4 Güç kaynağı.....	41
5.1.5 Yüksek gerilim güç kaynağı.....	41
5.1.6 Gerilim düşürücü izolasyon trafosu.....	44
5.1.7 Köprü diyot .....	44
5.1.8 Lm2596 .....	45
5.1.9 Çiftli potansiyometre.....	45
5.2 Tasarlanan Taşınabilir Elektro Eğirme Sprey Tabancasının Çalışma Prensibi ..	46
5.2.1 DC motorun kontrol edildiği elektronik mekanizma .....	46
5.2.2 Yüksek Gerilim Değerinin Kontrol Edildiği Elektronik Mekanizma.....	51
5.3 Sistemin Yazılımı.....	53
5.4 Elektro Eğirme Tabancasının Mekanik Tasarımı .....	72
<b>6.ÜRETİLEN SİSTEMDE GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEMELER.....</b>	<b>75</b>
<b>7.SONUÇLAR ve ÖNERİLER .....</b>	<b>79</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>80</b>

## ÖZET

### **BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI İÇİN TAŞINABİLİR ELEKTROEĞİRME SPREY TABANCISININ TASARIMI, ÜRETİMİ VE PERFORMANSI**

Günümüzde nanoteknoloji ve nanoteknoloji ile ilgili yapılan çalışmalar, farklı mühendislik dalları ve disiplinleri içerisinde barındırdığı için havacılık ve uzay araştırmaları sektöründen savunma sektörüne, elektrik, enerji ve bilgisayar teknolojilerinden tıp, sağlık ve tarım gibi birçok sektörü etkilemektedir. Birçok teknolojik alanda karşımıza çıkan nanolif üretimi de geliştirilmekte olan çalışmalar arasında yer almaktadır. Nanolif üretimi için geliştirilen yöntemlerle birlikte lifler, nano boyutlara kontrollü bir şekilde indirgenebilmektedir. Elde edilecek ürünün özellikleri etkili ve kalıcı olarak değiştirilip istenilen özellikler nano boyutlarda elde edilebilmektedir. Günümüzde nanolif üretimi için kullanılan en yaygın ve kullanışlı yöntem elektro eğirme yöntemidir. Bu yöntem ile elektrostatik kuvvet yardımıyla polimer esaslı eriyikten istenilen tüm özellikleri sağlayabilen ve aynı zamanda lif inceliği kontrol altında tutulabilen nano boyutlarda lif elde edilebilmektedir.

Nanolifler aynı zamanda insan derisindeki yara ve yanıkların tedavisinde yara örtücü olarak da kullanılabilir. Bu yüzden elektro eğirme methodu ile elde edilen liflerin yara örtüsü olarak kullanılması birçok müdahale anında etkili sonuçlar doğurabilir. İnce liflerin yaralı yüzey üzerine doğrudan spreyleyerek müdahale edilmesi yaraların iyileşmesine yardımcı olur ve tedavi sonrasında iz kalmamasına neden olur. Bu amaçla bu projede elektro eğirme spreynin tasarlanması, üretilmesi ve performansı ele alınacak olup elektro eğirme cihazı taşınabilir hale getirilerek yaralı yüzeye müdahale anını ve yüzeyin iyileşme süresini kısaltmak amaçlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Elektroegirme, spreynin tabancası, nanolif, yara örtücü

## **ABSTRACT**

### **DESIGN, CONSTRUCTION AND PERFORMANCE OF A PORTABLE ELECTROSPINNING SPRAY GUN FOR BIOMEDICAL APPLICATIONS**

At the present time, Nanotechnology and nanotechnology related studies have influenced many sectors such as from the aviation and space research sectors to the defense sector, from electricity, energy and computer technology to medicine, health and agriculture because it contains different engineering branches and disciplines. Nanofiber production faced in numerous technological fields has also taken part in the studies being developed. With the methods developed for nanofiber production, fibers can be reduced to nanosizes in a controlled manner. The properties of the product to be obtained can be changed effectively and permanently and the desired properties can be obtained in nano-size. Nowadays, the most common and practical method used for nanofiber production is electrospinning method. With this method, fiber can be obtained in nanosizes which can provide all the needed properties from the polymer based melt by means of electrostatic force and at the same time the fibre fineness can be controlled.

Nanofibers can also be used as a wound dresser in the treatment of wounds and burns in human skin. Therefore, the use of the fibers obtained by the electrospinning method as wound dressing can have effective results at the moment of many intervention. Intervention by directly spraying into the wound surface of fine fiber helps the healing of wounds and causes no traces after treatment. For this purpose, the design, construction and performance of the electrospinning spray gun will be dealt with in this project and it is aimed to shorten the time of healing injured surface and the moment of intervention by making the electrospinning device portable.

**Keywords:** Electrospinning, spray gun, nanofiber, wound dresser

## SEMBOLLER

**a:** Damlacığın Çapı

**$\epsilon_0$ :** Serbest Uzayın İletkenlik Sabiti

**$F_E$ :** Elektrik Kuvveti

**$F_g$ :** Yerçekimi Kuvveti

**$F_\gamma$ :** Yüzey Gerilim Kuvvetleri

**$F_g$ :** Yer Çekimi Kuvveti

**$\gamma$ :** Damlacığın Sahip Olduğu Yüzey Gerilimi

**H:** Elektrotlar Arasındaki Mesafe

**L:** İğne Ucunun Uzunluğu

**R:** Kılcal Ucun İç Yarıçapı

**r:** Yer Çekimi Sabiti

**$r_0$ :** Damlacığın Yarıçapı

**$\rho$ :** Sıvı Yoğunluğu

**$V_c$ :** Kritik Gerilim Değeri

**T:** Yüzey Gerilimi

**q:** Damlacıktaki Mevcut Yüğü

## **KISALTMALAR**

**CALTECH:** The California Institute of Technology

**DMF:** Dimetilformamid

**kV:** Kilovolt

**mm:** Milimetre

**µm:** Mikrometre

**nm:** Nanometre

**PAN:** Poliakrilonitril

**PET:** Bir Polyester Türü

**PSI:** Pounds Per Square Inch

**RPM:** Revolutions Per Minute

**INS:** Islands-In-The-Sea

# ŞEKİL LİSTESİ

## SAYFANO

Şekil 1.1 Nanometre cinsinden bazı küçük malzemelerin boyutları.....	1
Şekil 1.2 Nanomalzemelerin sınıflandırılması a) 0D küreler ve kristaller b) 1D nano lifler, nano teller ve nano çubuklar c) 2D nano filmler, nano katmanlar ve ağlar c) 3D nano malzemeler.....	3
Şekil 2.1 Meltblowing tekniğinin lif üretim akış şeması.....	6
Şekil 2.2 Tipik meltblown kalıbı .....	7
Şekil 2.3 Nanolif ağların sürekli üretimi.....	7
Şekil 2.4 PP(A) ve PLA(B) Termoplastik polimerleri ile üretilen mikronaltı meltblowing lif ağlarının sem görüntüleri.....	7
Şekil 2.5 Hills Inc. firmasının meltblowing yöntemi ile ürettiği lifler.....	8
Şekil 2.6 Laboratuvar tipi meltblown makinaları.....	8
Şekil 2.7 Spunbond prosesinin akış şeması.....	10
Şekil 2.8 Spunbond prosesinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 2.9 Spunbond tekniğiyle üretilen kumaşların kullanım alanları.....	12
Şekil 2.10 Dongguan Kehuan Mechanical Equipment Co., Ltd.'ye Ait Ticari PET Spunbond Nonwoven hattı.....	12
Şekil 2.11 Bikomponent liflerin eriyikten çekim hattının şemasal gösterimi.....	13
Şekil 2.12 Hills Inc. firmasının ürettiği bikomponent lifler.....	13
Şekil 2.13 Bikomponent lif çeşitleri.....	14
Şekil 2.14 INS lifi.....	15
Şekil 2.15 Hills şirketinin ticari bikomponent lif makineleri.....	15
Şekil 3.1 Williem Gilbert elektrostatik kuvvetlerin sıvılar üzerindeki etkisini gösteren deneyi.....	16
Şekil 3.2 a. Cooley'in indirekt elektrostatik yükleme tekniği b. Eş eksenli, hava akımlı ve döner emitör (damlatıcı) .....	17
Şekil 3.3 Zeleny'in tasarladığı deney düzeneği.....	18
Şekil 3.4 Formhals'ın patentini aldığı ilk elektro eğirme deney düzeneği.....	19
Şekil 3.5 Formhals'ın 1943'te patentini aldığı elektro eğirme deney düzeneği.....	20
Şekil 3.6 Taylor deney düzeneği.....	22
Şekil 3.7 Baumgarten elektro eğirme deney düzeneği.....	23

<b>Şekil 3.8</b> How'ın kullandığı elektro eğirme deney düzeneği.....	24
<b>Şekil 3.9</b> Nanodev marka başlangıç seviyesi elektroeğirme cihazı.....	25
<b>Şekil 4.1</b> Elektro eğirme yönteminde lif oluşumu a) Dikey sistem b) Yatay sistem.....	27
<b>Şekil 4.2</b> Elektro eğirme işleminin şematik olarak gösterimi (a) Polimer çözeltisi, (b) Yüksek voltaj güç kaynağı, (c) İğne ucunda damlacığın aldığı koni formu, (d)Jetin maruz kaldığı kararsızlık bölgesi, (e) Toplayıcıda biriken nanolifli yüzey.....	28
<b>Şekil 4.3</b> Taylor koni oluşumunun şematik gösterimi: a.) Polimer çözeltisinde elektrik alandan dolayı yüzey yüklerinin indüklenmesi b.) Asılı duran damlacığın uzaması. c.) Asılı damlacığın elektriksel yüklerin birbirini itmesinden dolayı Taylor Konisi biçimine dönüşmesi ve sonrasındaki jet başlangıcı.....	30
<b>Şekil 4.4</b> Yüklü damlacıktan çözücünün buharlaşması sonucu oluşan iyon fışkırması..	31
<b>Şekil 4.5</b> Jette görülen kararsızlık türleri a.) Ragleigh kararsızlığı b.) Simetrik eksenli elektrik alan akımlanması c.) Whipping kararsızlığı ile sonuçlanan bükülme kararsızlığı d.) Whipping kararsızlığı.....	32
<b>Şekil 4.6</b> Elektro eğrilmiş jetin hareketi.....	33
<b>Şekil 4.7</b> Sudaki Etilen Oksidin jet akışları a) Görünür yayılma (düşük hızlı fotoğraflama) b) Tek, dallara ayrılmamış lifin sarmal whipping hareketi (yüksek hızlı fotoğraflama) c) Eğirme sırasında sarmalların birleşmesiyle oluşan asetondaki polikaprolaktanun (PCL) şerit oluşumu. ....	34
<b>Şekil 4.8</b> Elektro eğirme yönteminde Whipping kararsızlığı.....	35
<b>Şekil 4.9</b> Elektro eğirme işleminin aşama aşama gösterilmesi.....	36
<b>Şekil 5.1</b> Bühler motor marka 24 V DC motor.....	38
<b>Şekil 5.2</b> GEMATE kontrol kartı ön ve arka yüz.....	39
<b>Şekil 5.3</b> OLED grafik ekran ön ve arka yüz.....	40
<b>Şekil 5.4</b> 24 V 2,5 A'lik adaptör.....	41
<b>Şekil 5.5</b> Maksimum 30 KV'a kadar çıkış verebilen yüksek gerilim güç kaynağı.....	42
<b>Şekil 5.6</b> HV modülünün bağlantı diyagramı.....	43
<b>Şekil 5.7</b> Kapalı tip alçaltıcı gerilim trafosu.....	44
<b>Şekil 5.8</b> Köprü diyot bağlantısı.....	45
<b>Şekil 5.9</b> LM2596 gerilim regülatörü devresinin ön ve arka yüzü.....	45
<b>Şekil 5.10</b> 10 K değerinde çiftli potansiyometre.....	46
<b>Şekil 5.11</b> Başlatma tuşu ve geri limit tuşunun devre şeması.....	47
<b>Şekil 5.12</b> Kontrol kartına yerleştirilen programlama tuşları.....	48
<b>Şekil 5.13</b> Tuş takımlarının fiziksel görünümleri.....	49

Şekil 5.14 Motorun yön kontrolünün yapıldığı devre şeması.....	50
Şekil 5.15 24 voltu 5 volta dönüştüren regüle devresi.....	51
Şekil 5.16 ATMEGA16A mikrodenetleyici ve Oled grafik ekran.....	51
Şekil 5.17 Yüksek gerilim güç kaynağı devre şeması.....	52
Şekil 5.18 Yüksek gerilimin kontrolü için analog çıkış.....	52
Şekil 5.19 Yüksek gerilim devresinin fiziksel bağlantısı.....	53
Şekil 5.20 Cihaz donanımının çalışmasını gösteren diyagram.....	71
Şekil 5.21 Cihazın 3D görüntüleri.....	72
Şekil 5.22 Enjekte edilecek sıvıların birleştiği parça.....	73
Şekil 5.23 Cihaz kabzasının parçaları.....	73
Şekil 5.24 Cihazın iç görünümü.....	74
Şekil 6.1 Elektro eğirme işlem denemeleri a.) Ağırlıkça %80 PMSQ çözelti solüsyonu b.) Çözeltinin cihaza entegre edilmesi c.) Elektro eğirme işleminin lamel üzerine denenmesi d.) Telefon Kamerası ile görüntülenen elektro eğirme işlemi e.) Elektro eğirme işleminin eldiven üzerine uygulanması ile oluşan nano lif ağı.....	75
Şekil 6.2 PCL çözeltisinden elde edilen bir nano lifli yüzeyin optik mikroskoptaki görüntüsü.....	76
Şekil 6.3 SEM görüntülemesine hazır numuneler.....	76
Şekil 6.4 PCL çözelti solüsyonundan elde edilen nanolifli yüzeyin SEM görüntüleri a.) 100 kat yakınlaştırma ile görüntüleme b.) 250 kat yakınlaştırma ile görüntüleme c.) 500 kat yakınlaştırma ile görüntüleme.....	77
Şekil 6.5 PMSQ çözeltisinden elde edilen bir nano lifli yüzeyin optik mikroskoptaki görüntüleri.....	77
Şekil 6.6 PMSQ çözelti solüsyonundan elde edilen nanolifli yüzeyin SEM görüntüleri a.) 100 kat yakınlaştırma ile görüntüleme b.) 250 kat yakınlaştırma ile görüntüleme c.) 500 kat yakınlaştırma ile görüntüleme d.) 2000 kat yakınlaştırma ile görüntüleme.....	78

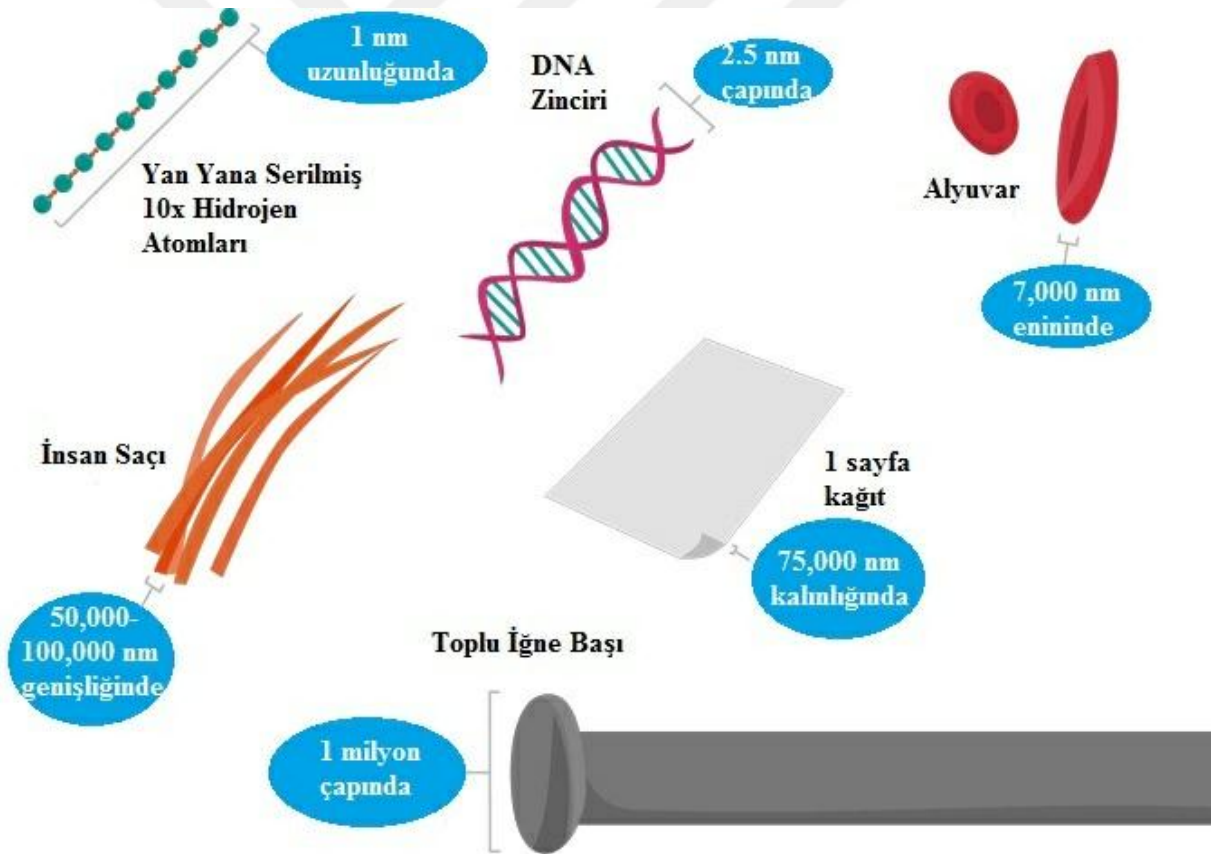
## TABLO LİSTESİ

	SAYFA NO
<b>Tablo 4.1</b> Elektro eğirme yöntemini etkileyen faktörler.....	37
<b>Tablo 5.1</b> OLED grafik ekran modülünün pin isimleri ve fonksiyonları.....	40
<b>Tablo 5.2</b> Yüksek gerilim güç kaynağının bazı teknik özellikler.....	43



## 1. GİRİŞ

Nanoteknoloji, 1 ve 100 nm arasındaki boyutlarda maddenin anlaşılmasını ve kontrol edilmesini ifade etmektedir [1]. Nanoteknoloji, nano ölçekte maddenin görüntülenmesi, ölçülmesi, modellenmesi ve işlenmesi süreçlerini içermektedir. Gaz, sıvı ve katı gibi maddeler nano ölçekte yığın malzemelerden ve tek atom ya da moleküllerden önemli ölçüde farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler sergileyebilirler. Bir nanometre, metrenin milyarda biridir [2,3,4]. Yan yana dizilmiş 10 hidrojen atomu bir nanometre civarında, bir DNA zincirinin çapı 2.5 nm, bir alyuvar yaklaşık 7,000 nm enine sahipken bir insan saçının çapı 50,000 ile 100,000 nanometre arasında, bir sayfa yaklaşık 75,000 nanometre kalınlığındadır [5] (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 Nanometre cinsinden bazı küçük malzemelerin boyutları [5]

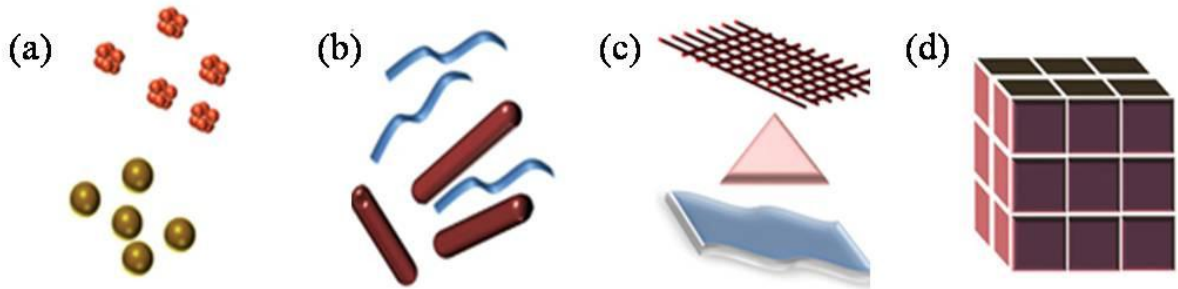
İnsanlık tarihi boyunca var olan nano parçacıklara olan ilgi Sanayi devrimi sırasında çarpıcı bir şekilde artış göstermiştir. Bu yüzden nano parçacıklar ile yapılan çalışmalar

yeni değildir. Nanometre kavramı ilk kez, 1925 yılında Kimya dalında Nobel Ödülü kazanan Richard Zsigmondy tarafından ortaya atılmıştır. Mikroskop kullanarak altın koloitler gibi parçacıkların boyutunu ölçen ilk kişi olan Richard Zsigmondy, parçacık büyüklüğünü tanımlamak için açık bir şekilde nanometre terimini kullandı [6].

Nanoteknoloji kavramı ise ilk kez 29 Aralık 1959'da Caltech'teki Amerikan Fizik Topluluğu toplantısında fizikçi Richard Feynman'ın "There's Plenty of Room at the Bottom" (Aşağıda Daha Çok Yer Var) adlı konuşmasıyla ortaya atılmıştır [7]. Feynman konuşmasında atomların teker teker doğrudan kontrol edilebilme olasılığını güçlü bir yaklaşım olarak değerlendirdiğini belirtti. Aynı zamanda atomları isteğe göre düzenleyebilen ve mekanik kontrol ile kimyasal sentez yapabilen çok küçük makinelerin prensip olarak yapılabileceği fikrini ortaya attı. Feynman' a göre bunun için iki zorluk vardı, bunlardan ilki bir kenarı 0,4 mm olan bir küpün içine sığabilecek kadar çok küçük bir motorun yapılması ikincisi ise bir kitabın sayfasındaki bilgileri alıp doğrusal ölçekte 1/20000 kadar daha küçük bir alana yerleştirmek için harfleri küçültmenin yolunu bulmaktı. [8]. Feynman'ın konuşmasındaki kavramlar ve zorluklar o zamanlar için ne kadar soyutlayıcı olarak görülse de Feynman'ın varsayımları ve fikirleri daha sonraki yıllarda doğruluğunu kanıtlamıştır [6, 8]. Bu yüzden modern nanoteknoloji Richard Feynman'ın buluşu olarak görülmektedir [6]. Nanoteknoloji terimi ise ilk kez 1974 yılında Japon bilim adamı Norio Taniguchi tarafından nanometre düzeylerinde meydana gelen yarı iletken süreçlerini tarif etmek için kullanıldı. Norio Taniguchi, nanoteknolojiyi bir atom ya da molekül tarafından malzemenin ayrıştırılması, birleştirilmesi ve bozunum süreci olarak ifade etmiştir [6,9]. 1981 yılında Binnig ve Rohrer tarafından keşfedilen Tarama Tünelleme Mikroskobu nanoteknolojinin gelişmesinde önemli bir rol oynamıştır [10].

Günümüzde nanoteknoloji kavramı, gen tedavisi veya ilaç uygulamaları için biyomühendislik ve biyotıp uygulamalarının yanı sıra elektromekanik sistemler, malzeme bilimi, fizik, kimya, elektronik alanlarını içeren disiplinler arası bir yaklaşım haline gelmiştir [8]. Bu yüzden nanoteknoloji bilgi teknolojisi, ulusal güvenlik, tıp, ulaşım, enerji, gıda güvenliği ve çevre bilimi gibi birçok teknoloji ve endüstri sektöründe kendisine yer bulmuştur [1].

Nano bilimin ve nano teknolojinin temel taşı olan nano malzemeler, nano ölçekte (yaklaşık olarak 1 ile 100 nm arasında değişen boyutlarda) herhangi bir dış boyutu olan ya da iç yapıya veya yüzey yapısına sahip olan malzeme olarak tanımlanmaktadır [11, 12]. Nano malzemeler, çok küçük boyutlarda üretilen ve kullanılan kimyasal maddeler ya da malzemeler olarak da ifade edilebilir [13]. Nano malzemeler küçük boyutları ve uygulamalar için önemli faydalar sağlayabilen oldukça yüksek yüzey alanları ile özgün mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmaktadır [14]. Meydana çıkan bu özellikleri ile nano malzemeler, elektronik, tıp ve diğer birçok branşta önemli etkiler oluşturabilecek bir potansiyele sahiptir [11]. Örneğin kanser hücreleri gibi vücuttaki belirli organ veya hücreleri hedef alabilen ve tedavinin tesirini arttırabilen tıbbi ilaçlar tasarlanabilir ve aynı zamanda nano malzemeler çimento, kumaş ve başka malzemelere eklenerek onların daha güçlü ve daha hafif olmaları sağlanabilir [15]. Bilim adamları, nanometre ölçeğinde maddenin kontrolünü sağlayarak yararlı malzemeler, aygıtlar ve sistemler ortaya çıkarmaktadırlar aynı zamanda malzemede nano ölçekte gelişen yeni özellikleri ve olayları incelemektedirler [14]. Şekil 1.2' de gösterildiği gibi nano malzemeler, boyutsuz (nano partikül, nano kristal, nano dotlar...), tek boyutlu (nano lifler, nano tüpler, nanoteller), iki boyutlu (nanofilmler) ve üç boyutlu nano malzemeler (nanometre boyutunda eş eksenli tanelerden oluşan nano evreli malzemeler) olarak sınıflandırılabilir [11, 16, 17, 18].



**Şekil 1.2** Nanomalzemelerin sınıflandırılması a) 0D küreler ve kristaller b) 1D nano lifler, nano teller ve nano çubuklar c) 2D nano filmler, nano katmanlar ve ağlar d) 3D nano malzemeler [11]

Geniş çapta birçok olası uygulama alanlarına sahip olan nano malzemeler olarak kabul edilen nanolifler, nano malzemelerin diğer türleri arasında ön plana çıkmaktadır. Nano liflerin en dikkat çekici özellikleri arasında sıra dışı yüksek yüzey alanına ve yüzey

alanı-hacim oranına sahip olmaları ve aynı zamanda gözenekler arası göze çarpan bağlanabilirlikleri ile çok iyi yüksek gözenekli ağlar oluşturma yetenekleri sıralanabilir. Bu da onları birçok eksenel kuvvete karşı sağlam ve cazip bir seçenek haline getirmektedir [19]. Nano liflerin yüksek yüzey alanlarına sahip gözenekli yapıları geleneksel sert gözenekli yapıların aksine gözenek boyutunun ve şeklinin değişebileceği dinamik bir sistem olarak ortaya çıkmaktadır [20]. Bu özellikleri ile nano lifler oldukça hassas sensörler, mikro ve nano sürücüler, yapay doku mühendisliği yapı iskeleleri, koruyucu ve akıllı kaplama ve çok fonksiyonlu kompozitler gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir [14].

Fibrilasyon, Meltblown tekniği, spunbond tekniği, bikomponent ve elektroğirme yöntemi olmak üzere birçok nanolif üretim yöntemi bulunmaktadır. Ancak elektroğirme yöntemi diğer yöntemlere kıyasla düşük maliyete ve yüksek üretim oranına sahip olduğu için günümüzde en çok tercih edilen nano lif üretim tekniği olmuştur [20].

## 2. NANOLİF ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Nanolifler bikomponent liflerinden nano lif eldesi, fibrilasyon, meltblown, spunbond ve elektroğirme gibi çeşitli yöntemlerle üretilebilmektedir. Bu bölümde nano lif elde etmek için kullanılan tekniklere yer verilecek elektroğirme işlemi ayrı bir başlık altında incelenecektir.

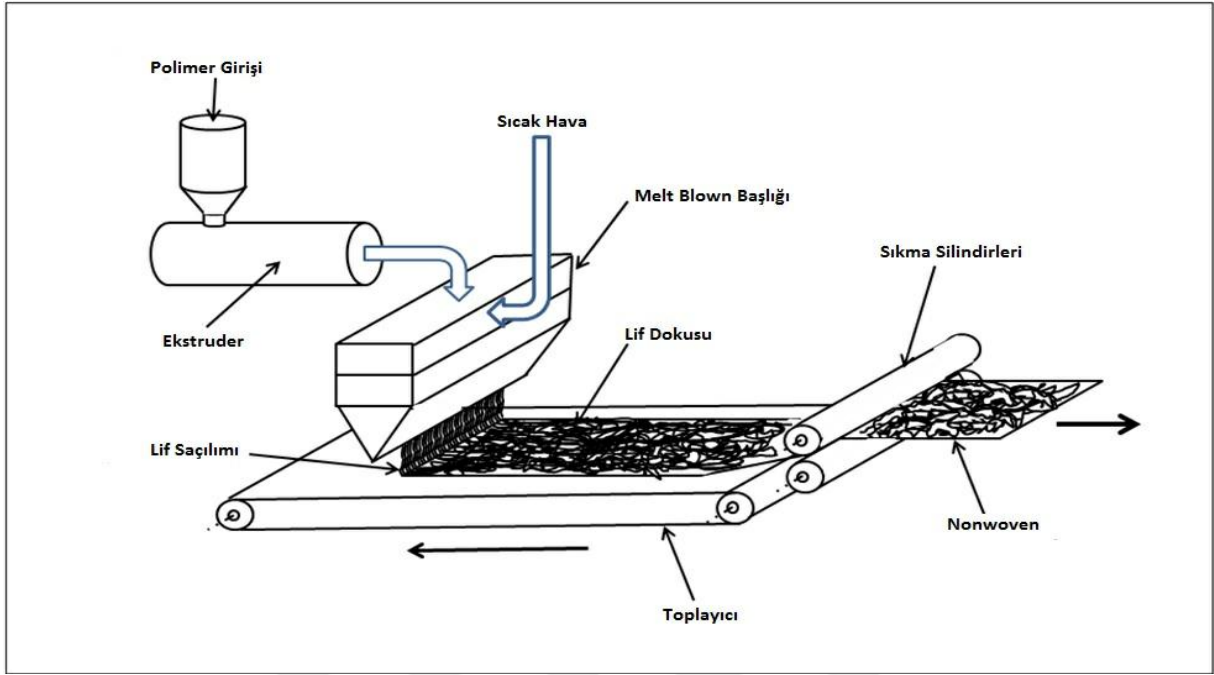
### 2.1 Fibrilasyon Tekniği ile Nanoliflerin Elde Edilme Süreci

Doğrusal zincir yapısına sahip selülozik liflerin nano boyutlarda ince lifçikler biçiminde fibrilasyonu işlemidir [21]. Bu teknik polimer yapıların çeşitli çözeltilerde çözündürülmesi, jelleştirilmesi, farklı çözücüler kullanılarak üretilmesi, dondurulması, nano gözenekli köpük oluşturacak şekilde kurutulması ve öğütülmesi gibi birçok aşamadan meydana gelmektedir [21, 22]. Dolayısı ile bu proses zaman alıcı bir yöntemdir [22]. Bu teknik ile elde edilen lifler ince, hidrofil, mikro gözenekli yapıdadırlar ve oluşan liflerde orta düzeyde mukavemet özelliği görülmesine rağmen lif çaplarında önemli değişiklikler gözlemlenmektedir [23, 21]. Bu yöntemle selülozik lif 1 mikrondan daha küçük çapa sahip lifçiklere bölünmesine rağmen SEM karakterizasyonunda birbirleri ile bütünleşmiş yüzeyler halinde görülmektedir [22, 23]. Üretilen lifler mikrobiyolojik alandaki uygulamalara olanak sağlayan filtrelerin üretilmesinde ve kâğıt yapımında kullanılmaktadır [23, 24].

### 2.2 Meltblown İşlemi ile Nanolif Eldesi

Meltblown tekniği büyük miktarlarda küçük çapa sahip lif üretmek için tercih edilen yöntemlerden biri olmakla birlikte bu teknik teorik olarak 0.5 ile 30 µm çaplarında lif üretiminin olanaklı olduğunu gösterse de pratik olarak 2 ile 7 µm arasında çaplarda lif üretimine olanak tanır [21]. Meltblown tekniğinin lif üretim akış şeması Şekil 2.1'de gösterilmektedir. Hazırlanan polimer ekstruderde eritilmekte ve devamında Melt Blown başlığına iletilmektedir. Kalıp kanadının üst ve alt kısımlarından çıkan yakınsak sıcak hava akımları, ekstrüzyona uğramış polimer akımlarını hızlı bir şekilde inceltmektedir. Aşırı ince liflerin oluşumu için bu hızlı sıcak hava akımları uygulanmaktadır.

Sonrasında inceltilmiş lifler yüksek hızlı hava yardımıyla toplayıcı banda düşürülür ve ince lifli kendiliğinden sıkı nonwoven meltblown doku oluşur [25].



Şekil 2.1 Meltblowing tekniğinin lif üretim akış şeması [25]

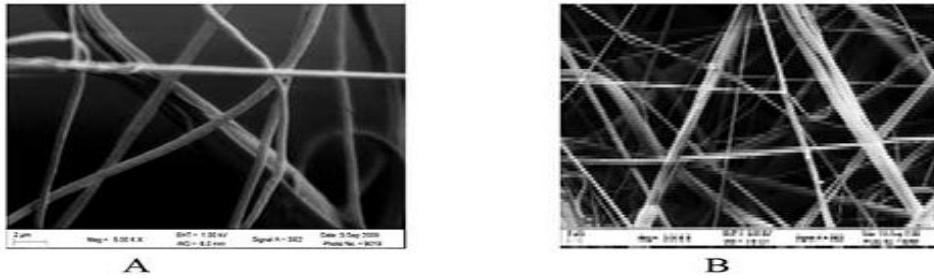
Meltblown prosesi, ticari proste ortalama çapı 1 mikron olan liflerin üretilmesine olanak tanıdığı için bu proses daha çok mikro lif üretimi üzerine kullanılması yaygındır. Bununla birlikte bu yöntemin mikron altı lif üretiminde kullanılması için yoğun bir çaba devam etmektedir. Daha küçük deliklere ve daha çok sayıda deliğe sahip olan modüler kalıpların tasarlanması ve geliştirilmesi üzerine son çalışmalar, mikron altı liflerin uygun maliyetli üretilmesini mümkün kılmaktadır. Modüler kalıplardan biri yığın plakalardan oluşurken plakalardan biri doğrusal delikli ve her iki taraftan havalandırma işlemine izin veren hava bıçaklarına sahip olan tipik bir Meltblown kalıbının aksine eriyik polimer için bir girişe ve ısıtılmış hava girişlerine sahiptir (Şekil 2.2 ve Şekil 2.3). Plakalar, malzemenin içinden aktığı bir yol oluşturmak için kanalları sınırlayacak şekilde ayarlanmıştır. Plakalardan biri polimerin ekstrüde edilebildiği bir düze deliği görevi gören çıkış noktasına sahiptir. Modüler kalıp delik başına düşük verimlilikte çalışır ve bu nedenle elyaf ekstrüzyonu için düşük erime basınçlarını kullanır. Erimiş polimer, mikron altı lif üretmek için modüler kalıpların deliğinden oldukça düşük akış hızlarında ekstrüde edilir [26].



**Şekil 2.2** Tipik Meltblown kalıbı[26] **Şekil 2.3** Nanolif ağların sürekli üretimi [26]

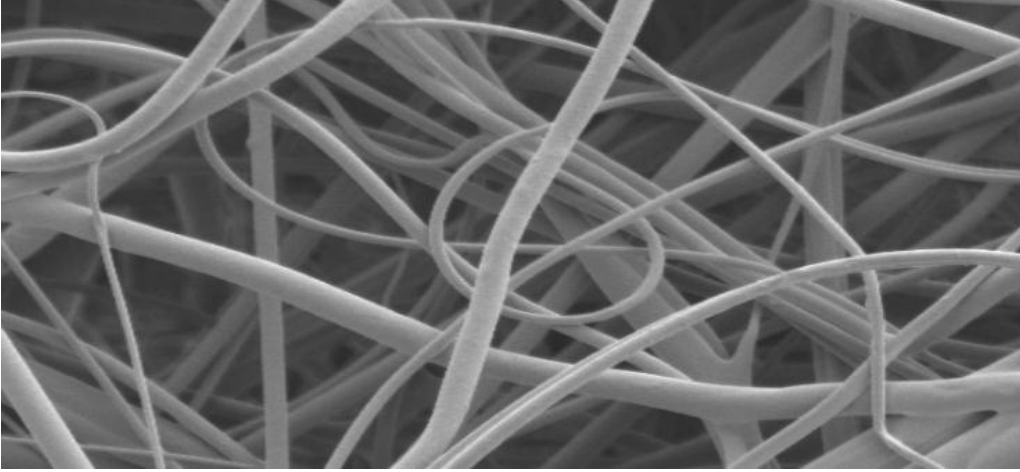
Buna rağmen bu yöntemin nanolif üretiminde de kullanılması üzerine birçok kapsamlı gizli araştırmalar devam etmektedir. Bir Kore firması olan Nano Tecnic tarafından üretilen nanolif filtre materyalinin elektro üretim tekniğinden ziyade değiştirilmiş bir Meltblown tekniği ile üretildiğine inanılıyor [23, 27].

Polipropilen (PP), polietilen tereftalat (PET), polibütlen tereftalat (PBT) ve polilaktik asit (PLA) gibi bazı termoplastik polimerler, tek düze dokular üretmek için ticari boyutta başarılı bir şekilde işlenmektedir. Modüler meltblowing kalıpları kullanılarak üretilen mikron altı liflerin çapları 50nm ile 1000 nm arasındayken ortalama çapları 400-600 nm'dir. (Şekil 2.4). Bu yüzden değiştirilmiş Meltblowing prosesi endüstriyel ölçekte termoplastik polimerlerden mikron altı lifler üretmek için yenilikçi ve özgün bir yaklaşım olacaktır. Lif çap aralığı tipik meltblowing mikrolifleri ile karşılaştırıldığında çok daha dardır. Ayrıca kontrollü proses koşullarında ipliksiz, atışsız ya da lif kırımına uğramadan oluşan mikron altı lif dokuları, elektroğirme yöntemiyle mümkün olan üretim hızından birkaç kat daha hızlı bir şekilde üretilebilir [26]



**Şekil 2.4** PP(A) ve PLA(B) termoplastik polimerleri ile üretilen mikronaltı meltblowing lif ağlarının SEM görüntüleri [26]

Hills Inc. Firması tarafından yürütülen araştırmalarla nanolif elde etmek için kullanılan meltblowing tekniği geliştirilmektedir. Hills, 1500 psi de kullanılabilir ve inç başına 100 delik düşen kalıplarıyla kendilerine özgü bir tasarım kullanmaktadırlar. Bu sistemde düze (spin pack) paketlerinin birim uzunluğuna düşen toplam üretim hızı klasik meltblowing tekniği ile aynı olurken ortalama melt blown lif boyutu büyük ölçüde azaltılmış ve aynı zamanda lif boyutunun değişim aralığı da daraltılmıştır. Şekil 2.5’de Hills Inc. Firması’nın meltblowing yöntemi ile ürettiği lifler ve Şekil 2.6’da laboratuvar tipi Meltblown makineleri gösterilmektedir.



**Şekil 2.5** Hills Inc. firmasının Meltblowing yöntemi ile ürettiği lifler [28]

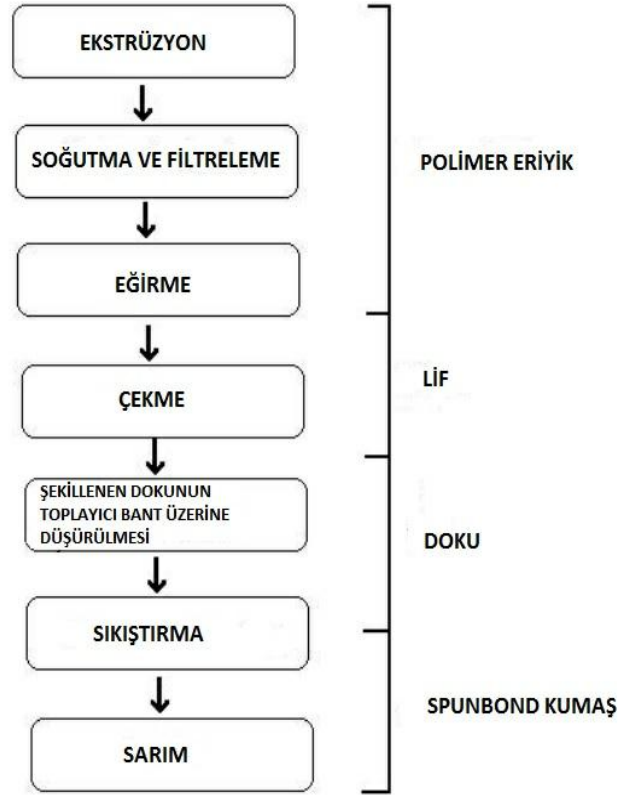


**Şekil 2.6** Laboratuvar tipi Meltblown makinaları [28]

### 2.3 Spunbond Yöntemi

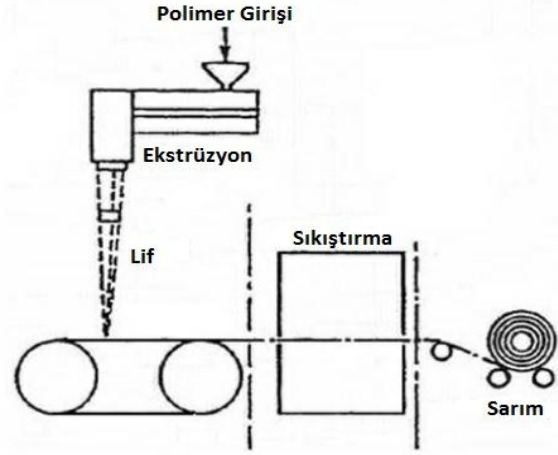
Teknik olarak meltblowing yöntemi ile benzerlik gösteren spunbond tekniği birbirlerinden lifleri inceltmek için kullanılan hava hacim miktarının ve sıcaklığın farklı olmasıyla ayrılmaktadır. Bu farklılıklar ile oluşan liflerin fiziksel özellikleri de değişkenlik göstermektedir. Meltblowing yönteminde kullanılan hava miktarı yüksek dozda olduğu için uygulanan bu hava akımı ile lifler çekilmekte ve inceltilmektedir. Ancak spunbond tekniğinde çekme işlemi (germe) polimer soğuyup katılaştıktan sonra uygulandığı için bu teknikte üretilen lifler meltblowing ile üretilenlere göre daha kalın olmaktadır [23].

Spunbond kumaşlar, ekstrüzyon işleminden geçmiş ve eğrilmiş lifleri toplayıcı bir bant üzerine tekdüze rasgele şekilde biriktirerek ve ardından lifleri sıkıştırarak üretilir (Şekil 2.7). Lifler, dokuların bant üzerine düşürülmesi işlemi boyunca hava jetleri ve elektrostatik yükler tarafından ayrılır. Toplayıcı yüzey, hava akımının kontrolsüz bir şekilde liflerin sapmasına ve taşınmasına engel olmak için deliklidir. Sıkıştırma, polimeri kısmen eritmek ve lifleri birbirleriyle kaynaştırmak için ısıtılmış silindirden geçirerek ya da sıcak iğneler uygulayarak dokuya mukavemet ve bütünlük kazandırır. Moleküler yönelmesi erime noktasını artırdığı için çok iyi çekilmemiş lifler termal bağlayıcı lifler olarak kullanılabilir. Polietilen veya düzensiz etilen-propilen kopolimerleri düşük erime noktalı sıkıştırma kümeleri olarak kullanılır. Spunbond ürünleri halı döşemelerinde, jeotekstil malzemelerde ve tek kullanımlık tıbbi / hijyen ürünlerinde kullanılmaktadır [29].



**Şekil 2.7** Spunbond prosesinin akış şeması [30]

Spunbond teknolojisinde, yaklaşık 15-35 mikrometre çapında ince lifler oluşturmak için genellikle termoplastik lif oluşturan polimer ekstrude edilir. Şekil 2.8' de spunbond prosesinin şematik gösterimi verilmiştir. Yukarıda bahsedildiği gibi Spunbond teknolojisi en basit şekilde ifade edilecek olursa eğirme, çekme, doku (ağ) oluşumu ve sıkıştırma işlemlerinden oluşur. Eğirme işlemi çoğunlukla, eriyikten çekim işlemi vasıtasıyla sentetik lif malzemelerinin üretimine karşılık gelmektedir. Çekme işleminde, lifler sıkışmış bir şekilde çekilir. Doku oluşumu işlemi de bir nonwoven doku oluşturur. Sıkıştırma işlemi ağırlıklı olarak, ısı sıkıştırma silindirlerinden meydana gelir. Proseslerin (İşlemlerin) sırası aşağıdaki gibidir: polimer hazırlama ---> polimer takviyesi, eritme, taşıma ve filtreleme ---> Ekstrüzyon ---> Söndürme ---> Çekme ---> Dokunun Bant Üzerine Düşürülmesi ---> Sıkıştırma [31].



**Şekil 2.8** Spunbond prosesinin şematik gösterimi [29]

Nonwoven kumaşların üretilmesinde kullanılan yaygın bir yöntem olan spunbond tekniği ile oluşan ürünlerin piyasadaki kullanım alanları oldukça geniştir [29]. Tek kullanımlık ameliyat önlüğü, galoş ve sterilizasyon ambalajlama gibi tıbbi uygulamalarda nefes alabilirlik, sıvı penetrasyonuna dayanım, steril edilebilirliği ve bakteri geçirmezliği gibi özellikleriyle yer bulmaktadır [32]. Otomobil endüstrisinde spunbond dokular, otomobil paspasları, iç kapı döşemeleri ve koltuk kılıfları gibi birçok alanda kullanılmaktadır [33]. Filtrasyon endüstrisinde sıvı filtrasyonu, gaz trübün filtreler, teknik ve analitik filtreler gibi birçok alanda kullanılmaktadır [34] İnşaat sektöründe erozyon kontrolü, demiryolu yatak stabilizasyonu ve çatı uygulamaları gibi birçok alanda kimyasal ve fiziksel kararlılığı, yüksek dayanıklılığı ve kontrol edilebilir yapısal özellikleri sayesinde spunbond kumaşların kullanımları giderek artmaktadır [32].

Dünya çapında birçok şirket spunbond nonwoven teknolojisiyle uğraşmaktadır. Türkiye’de spunbond ve meltblown kumaş üreten ilk şirket olan Mogul ve spunbond teknolojisini kullanarak nonwoven kumaş üretimi yapan PETSABOND gibi firmalar otomotiv sektöründen inşaat sektörüne, havacılık uygulamalarından tıbbi uygulamalara, filtrasyon endüstrisinden tarım sektörüne kadar birçok sektörde kendilerine yer bulmuşlardır (Şekil 2.9). Şekil 2.10’da ticari PET Spunbond nonwoven hattı gösterilmektedir.



Şekil 2.9 Spunbond tekniğiyle üretilen kumaşların kullanım alanları [34]

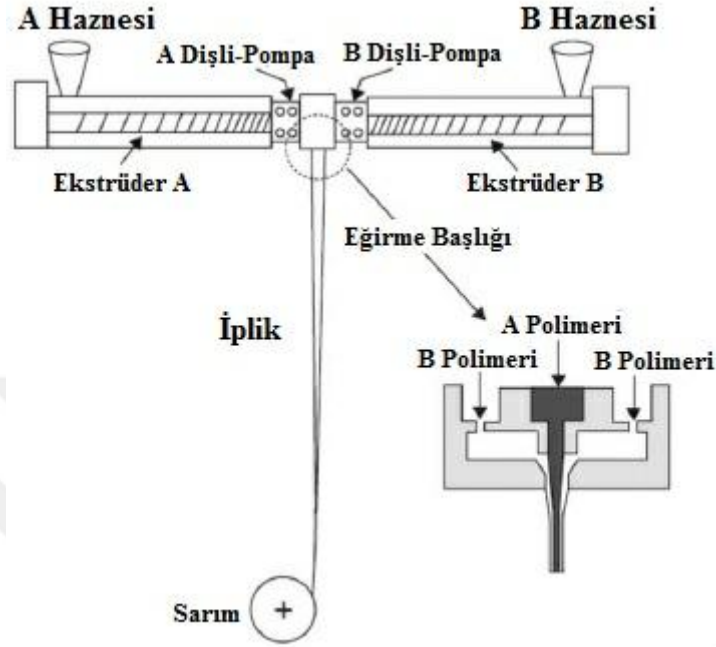


Şekil 2.10 Dongguan Kehuan Mechanical Equipment Co., Ltd.'ye ait ticari PET Spunbond nonwoven hattı [35]

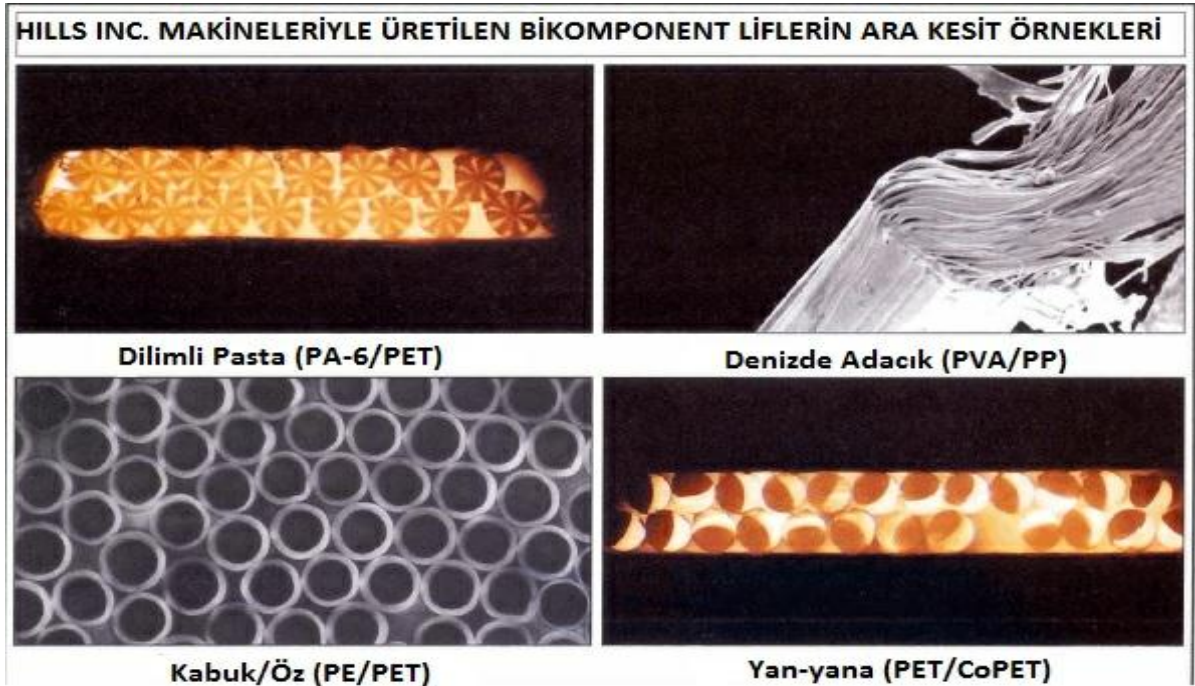
#### 2.4 Bikomponent Lifler Yoluyla Nanolif Üretimi

Bu teknikte iki farklı polimer iki ayrı ekstrüderden ayrı ayrı geçerek eritilir ve basınç uygulanır ve hemen ardından düze çıkışında birleşerek düze deliğinden birlikte akıtılır [36]. Şekil 2.11' de görüldüğü gibi bu teknik çift bileşenli liflerin ayrıştırılması veya çözünebilmesi esasına dayanır [27]. Bikomponent lifler kesit şekillerine göre






















sınıflandırıldığında genel olarak yan-yana, dilimli pasta, öz/kabuk ve denizde adacık bicomponent lifler şeklinde ayrılırlar [37]. Şekil 2.12’te Hills Firmasının ürettiği farklı şekillerdeki bikomponent lifler ve Şekil 2.13’te bikomponent lif çeşitleri gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Bikomponent liflerin eriyikten çekim hattının şemasal gösterimi [36]

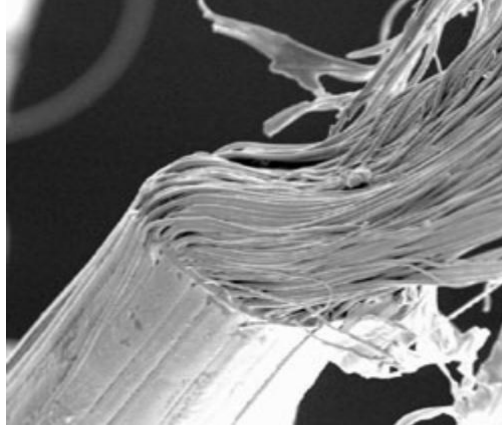


Şekil 2.12 Hills Inc. firmasının ürettiği bikomponent lifler [28]

Aile Grubu	BİKOMPONENT LİFLER FARKLI BİÇİMLERİ						
Öz / Kabuk	 50/50	 20/80	 Dış Merkezli	 Trilob	 İletken		
Yan-yana	 50/50	 20/80	 Birleşik Viskozite	 ABA	 Birleşik Viskozitele	 Trilob veya diğerleri	 İletken
Uçlu	 Trilob	 Çapraz					
Mikro-Denye	 Dilimli Pasta	 Denizde Adacıklar			 Şeritli		
Bileşik Lifler	 Renkli	 Denyeler, Komponentler	 Çapraz Kesitler		 Bikomponent		

Şekil 2.13 Bikomponent lif çeşitleri [28]

Çok bileşenli lifler yeni bir kavram olmamasına rağmen mikro ve nano boyutlu liflerin ekonomik üretimini sağlayan teknolojisi giderek üzerinde çalışılan bir konu haline gelmektedir. Çok bileşenli yaklaşımlardan en çok araştırılan model ise klasik eğirme prosesiyle üretilen denizde adacıklar biçimindeki bikomponent liflerdir (INS). Şekil 2.14'te Hills Firması'nın ürettiği 600 adacıklı bir lif gösterilmiştir. Üretim hızı yaklaşık olarak delik başına 0,5 gram/dak'dır. Adacık polimeri için polipropilen, polyester ve naylon kullanılmış olup çözünebilir polimer olarak deniz polimeri kullanılmıştır. Deniz polimerinin çözünmesinin ardından oluşan nanolifler yaklaşık 300 nm çapındadır. Elektroegirme ve meltblowing tekniklerinin aksine bu teknikle üretilen nanoliflerin çap aralığı oldukça dardır [28]. Şekil 2.15' de Hills firmasının bikomponent liflerin herhangi bir arakesitini ürettiği bikomponent lif makineleri gösterilmiştir.



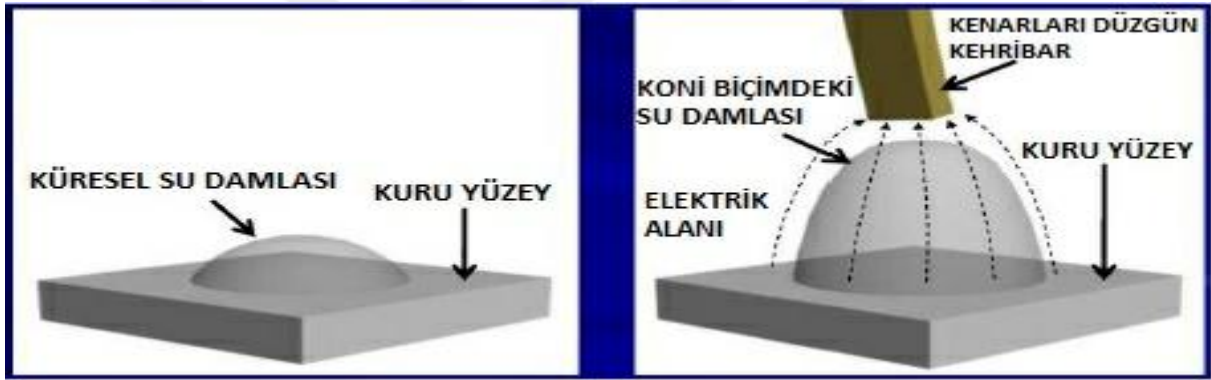
**Şekil 2.14** INS lifi [28]



**Şekil 2.15** Hills şirketinin ticari bikomponent lif makineleri [28]

### 3. ELEKTRO EĞİRME İŞLEMİNİN TARİHSEL SÜREÇTEKİ GELİŞİMİ

Elektro eğirme yönteminin temel mantığı olarak kabul edilen elektrostatik kuvvetler tarafından sıvıların etkilendiği olgusu 17. yy'da İngiliz hekim, fizikçi ve filozof olan William Gilbert tarafından ortaya koyulmuştur [38]. William Gilbert, "De Magnete" adlı eserinde bu olguya yer vermiş ve kuru bir yüzeyde duran küresel su damlasına, uygun uzaklıkta elektrik yüklü bir kehribar parçası tutulduğunda kehribar parçasının kendisine en yakın kısımları çektiğini ve su damlasını koni biçiminde yaklaştırdığını gözlemlemiştir [39] (Şekil 3.1). Elektrostatik kuvvetlerin etkisiyle yaşanan sıvı şeklindeki bu konik değişim daha sonradan Taylor konisi olarak adlandırılacak kavramın ilk bulgusu olarak değerlendirilebilir [40].



**Şekil 3.1** William Gilbert elektrostatik kuvvetlerin sıvılar üzerindeki etkisini gösteren deneyi

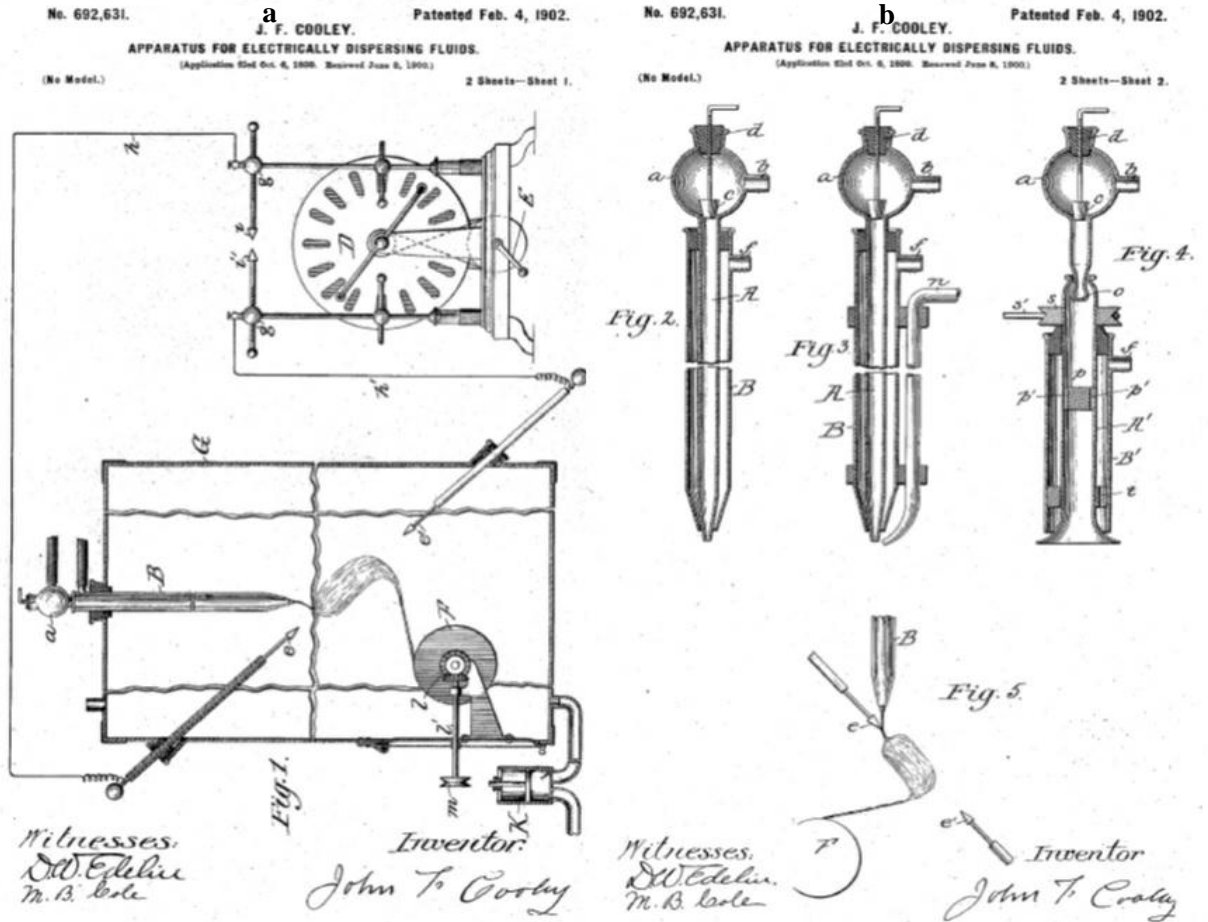
Önemli gazların yoğunluklarıyla ilgili araştırmaları ve bu çalışmalarla bağlantılı olarak William Ramsay ile yürüttükleri çalışmaları sonucu argon soy gazını keşfetmelerinden dolayı 1904 Nobel Fizik Ödülünü alan Lord Rayleigh (John William Strutt) 19.yy'da, elektrikle yüklü sıvı damlacıklarındaki düzensizlik halini inceledi ve elektrostatik kuvvetin yüzey gerilimi ile dengelendiğinde sıvının ince düzeler halinde akmaya başladığına dikkat çekmiştir [40, 41]. Aynı zamanda belli bir boyuttaki damlacığın akmasına sebep olacak teorik bir yük hesaplamıştır [38]. Elektrostatik kuvvetin yüzey gerilimini yendiğinde ince düzeler halinde akmaya başlaması için gerekli maksimum yükün denklemi şu şekildedir:

$$q^2 = 64\pi\epsilon_0 \gamma a^3$$

(3.1)

Burada  $q$ : damlacıktaki mevcut yükü,  $\epsilon_0$ : serbest uzayın iletkenlik sabiti,  $\gamma$  : damlacığın sahip olduğu yüzey gerilimi,  $a$ : damlacığın çapını ifade etmektedir [42].

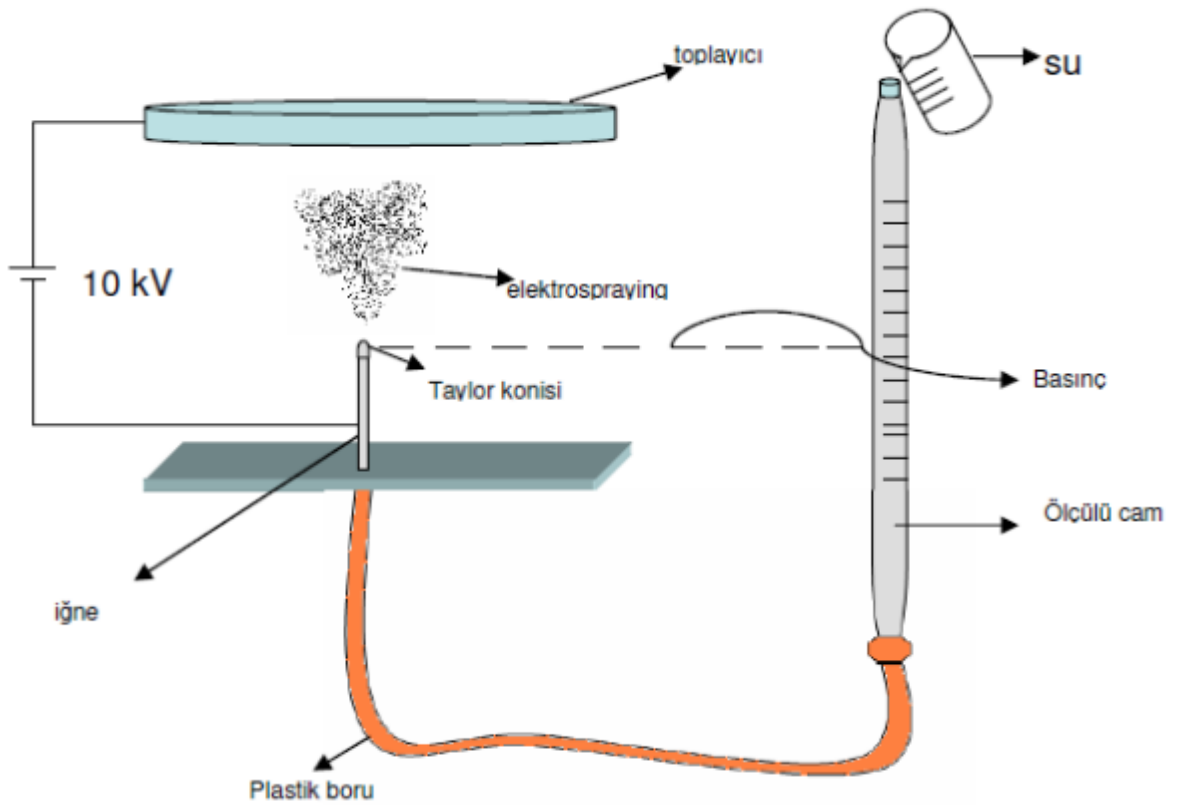
Amerikalı mucit John Francis Cooley, 1900 yılında ilk modern elektroğirme patentini aldı. Onun çalışmaları, elektrostatik kuvvetlere maruz kalan sıvıların performansının matematiksel olarak modellenmesine yol açtı [40]. Cooley, dört çeşit endirekt yüklü (dolaylı olarak yüklenmiş) eğirme başlığı tasarladı. Bu tasarım klasik başlık, eş eksensli başlık, hava akımlı model ve döner emitöre sahip düzeyi içermektedir [38] (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 a. Cooley'in endirekt elektrostatik yükleme tekniği b. Eş eksensli, hava akımlı ve döner emitör (damlacıcı) [43]

Elektrik yükünü ölçmek için elektroskop icat eden Fizikçi John Zeleny, 1907 ve 1920 yılları arasında katı ve sıvı yüzeylerde oluşan elektriksel boşalmalar üzerine bir dizi makale yayınlamıştır [38]. 1914'lü yıllarda sıvı yüzeylerde meydana gelen yük boşalmalarını incelemeye başladı [44]. Kılcal tüp ucundaki yarım küre biçimindeki damlacığın yüksek gerilim altındaki sapma (eğrilme) eğilimini fark etti. Aynı zamanda Kılcal tüpten çıkan sıvı damlacıklarının akışını gözlemleyerek bu ince akışı ( $4 \mu\text{m}$ ) fotoğraflamıştır [45, 46]. Elektromotor kuvvetinin uygulanması ve damlacık ucunda meydana gelen reaksiyon arasındaki gecikmeye dikkat çekti [47]. Zeleny bu çalışmalarını farklı sıvılarla tekrarlamış olup alkole göre yüzey gerilimi daha yüksek olan suyun damlacıktan ince jet halinde akabilmesi için gereken voltaj değerinin alkole göre daha yüksek olduğunu fark etmiştir [48].

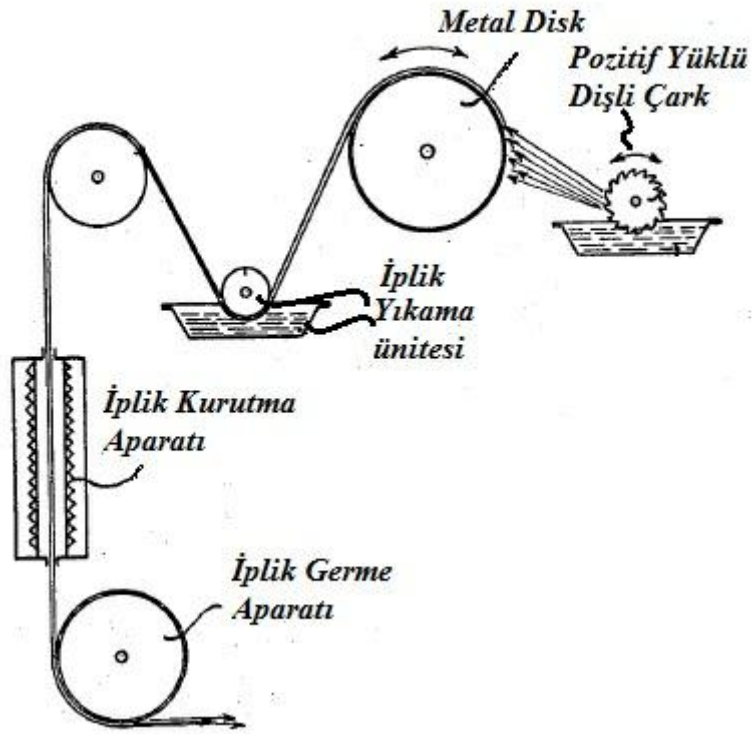
Zeleny'nin üzerinde çalıştığı deney düzeneğinin basit bir gösterimi Şekil 3.3'te verilmektedir [21].



Şekil 3.3 Zeleny'nin tasarladığı deney düzeneği [21]

1931 ve 1944 yılları arasında Anton Formhals, Amerika, Fransa, Birleşik Krallık ve Almanya gibi ülkelerde aldığı 22'yi aşkın patent sayesinde elektroēirme yönteminin

gelişimine önemli katkılar sağlamıştır [38]. Formhals, elektrik yükleri kullanarak ürettiği liflerin üretim süreci ve tasarımı ile ilgili ilk patentini 1934 yılında almıştır [49]. Şekil 3.4'te gösterilen deney düzeneği polimer çözeltisinin içine konulmuş pozitif yüklü dişli çark, toplayıcı görevi yapan negatif yüklü metal disk, yıkama, kurutma ve germe ünitelerinden aynı zamanda şekilde gösterilmeyen iplik büküm ünitelerinden oluşmaktadır [50]. Formhals, ilk patentinde çözücü olarak aseton kullanarak selüloz asetat liflerini eğirme işlemine tabi tuttuğunu bildirmiştir. Formhals'ın uyguladığı eğirme yönteminin kusurları mevcuttu. Eğirme bölgeleri ile toplama bölgeleri arasındaki mesafenin kısa olması eğirme işlemi sonucu oluşan liflerin tamamıyla kuru olmasını zorlaştırıyor ve toplayıcıda birikmiş doku yapısının daha az olmasına yol açıyordu [51].

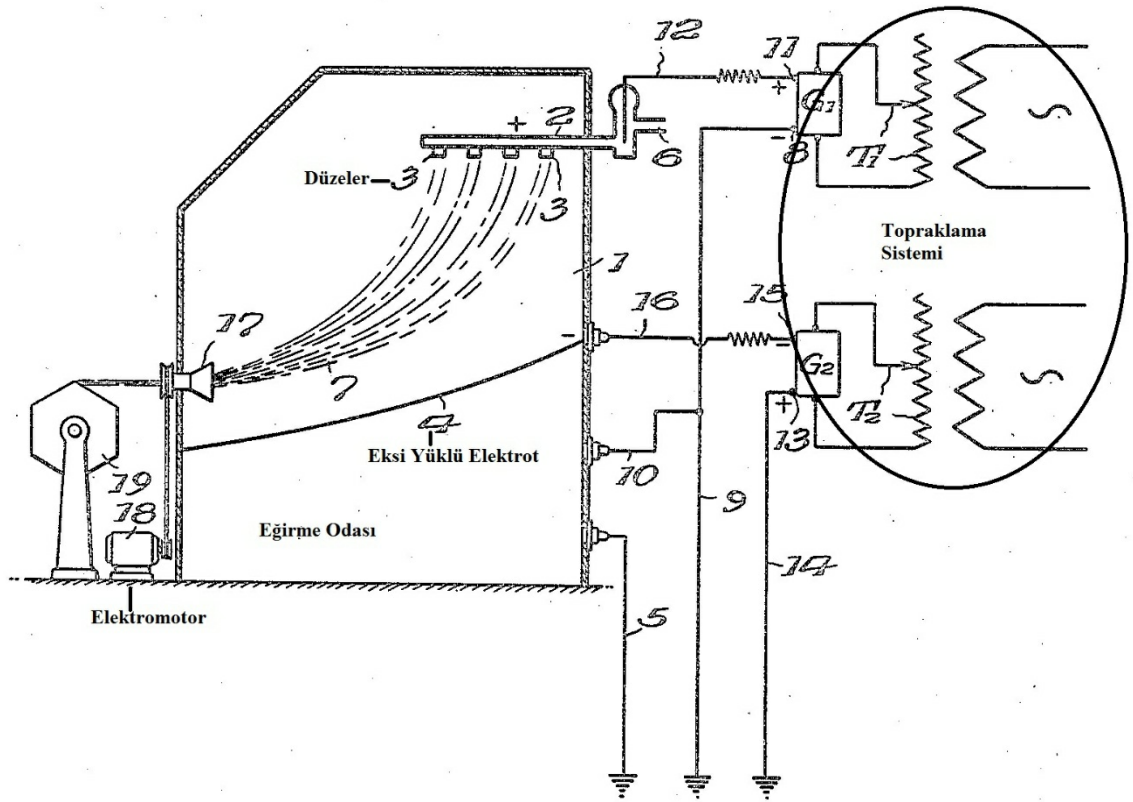


**Şekil 3.4** Formhals'ın patentini aldığı ilk elektro eğirme deney düzeneği [61]

Formhals, 1939 yılında aldığı bir sonraki patentinde yukarıda bahsedilen sorunları gidermek için önceki yaklaşımını geliştirmiştir. Geliştirilmiş proseste Formhals, toplayıcı ve besleme sistemi arasındaki mesafeyi elektro eğirme işlemine uğrayan liflerin kuruması için daha fazla zaman tanıyacak şekilde tasarlamıştır [51]. Bu tasarım, toplayıcı ve besleme sistemi arasına konulmuş hareket edebilir çatallı kalkan sayesinde

besleme sistemi ile toplayıcı arasındaki mesafe ayarlanarak hem liflerin kuruması için zaman kazandırmakta hem de liflerin yönlenmesini sağlamaktadır [50].

Formhals 1943 yılındaki patentinde farklı bir yaklaşım daha kullanmış ve kullanılan elektrik alan yoğunluğu artırıldığında liflerin bu alan etkisiyle püskürtme olayına maruz kaldıklarını belirtmiştir [52]. Geliştirilen bu düzenekte lifler karşı elektroda varmadan denge haline gelmekte ve nötr bölge oluşturmaktadırlar. Daha sonrasında denge haline gelen lifler elektrik alan tarafından çekilerek rotora benzeyen toplayıcı sayesinde bu lif bandına büküm verilmektedir. [50] Formhals'ın 1943'te patentini aldığı elektro eğirme sistemi Şekil 3.5'de gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Formhals'ın 1943'te patentini aldığı elektro eğirme deney düzeneği [52]

RMS Titiğin batmasının ardından kuzey Atlantik buzdağlarının taslağını çıkartarak çalışma hayatına başlayan Geoffrey Ingram Taylor, 1. Dünya Savaşı'nda paraşütlerin çalışma mekanizmasını geliştirme üzerine çalıştı, CQR küçük tekne çapasının icadında

ve süpersonik uçakların gelişiminde yer aldı. Daha sonraki süreçte ise 1964 ve 1969 yılları arasında elektrik alan etkisiyle sıvı damlacıklarının oluşturduğu koninin şeklini matematiksel olarak modelleyerek elektro eğirme yönteminin kuramsal temeline önemli bir katkı sağlamıştır [38]. Elektro eğirme işlemi sırasında meydana gelen jet oluşumlarının şekillenme aşamaları üzerine yapılan temel çalışmalar 1960’larda Taylor tarafından başlatılmıştır. 1969 yılında Taylor, elektrik alan uyguladığında polimer damlasının koni biçimini aldığını ve jetlerin koninin uçlarından çıktığını gözlemledi [53]. Daha sonraki yıllarda jetlerin bu konik şekli ‘Taylor Konisi’ olarak adlandırılmıştır. Farklı yoğunluklu sıvıların detaylı incelenmesi ile Taylor, elektrostatik kuvvet ile polimerin yüzey gerilimini dengelemek için 49,3 derecelik bir yarı dikey açının gerekli olduğunu tespit etmiştir. Jetin aldığı konik şekil, lif oluşum aşamalarında jet eksenini boyunca uzunlamasına bileşkeye sahip hız değişimlerinin başlangıcı olduğu için önemlidir [54].

Taylor; kararlı sıvı damlacığının kritik gerilim değerinin ( $V_c$ ) etkisiyle maksimum kararsızlık halinin elde edildiğini göstermiş ve bu kritik gerilim değerinin denklemini geliştirmiştir [55, 56]. Bu kritik değer, viskoz damlacığın yarımküre şeklinin bozulduğu jet oluşumu öncesinde koni şeklini aldığı değerdir [21]. Yaptığı çalışmada Taylor, çözeltiye ait viskozitenin, dielektrik katsayısının, iletkenlik ve uçuculuk özelliklerinin elektro eğirme yönteminin temel parametreleri olduğunu ifade etmiştir [57].

$$V_c^2 = 4(H^2 \div L^2) \times (\ln \ln (2L \div R) - 1,5) \times (1,3\pi RT) \times (0,09) \quad (3.2)$$

Burada;

H: elektrotlar arasındaki mesafe (cm),

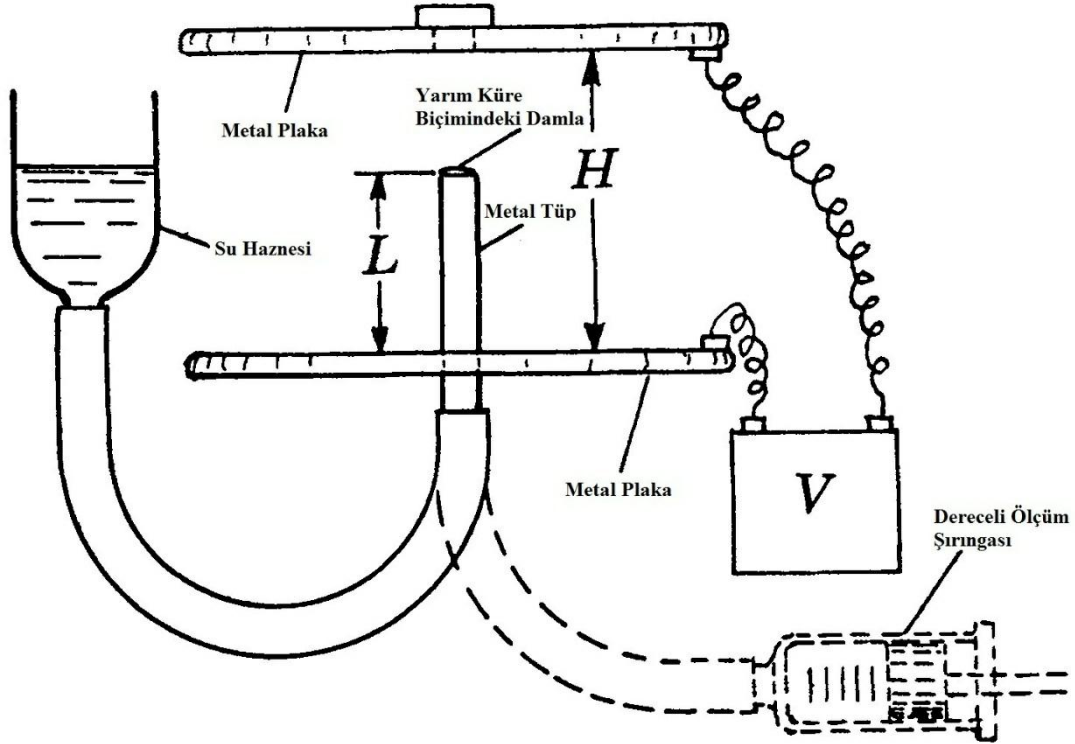
L: iğne ucunun uzunluğu (cm),

R: kılcal ucun iç yarıçapı (cm) ve

T: yüzey gerilimi (dyne/cm) dir.

Şekil 3.6’ da Taylor’un geliştirmiş olduğu sistem gösterilmektedir. Bu sistem iki paralel metal plaka, yüksek gerilim kaynağı, polimer çözeltilinin konulduğu hazne gibi

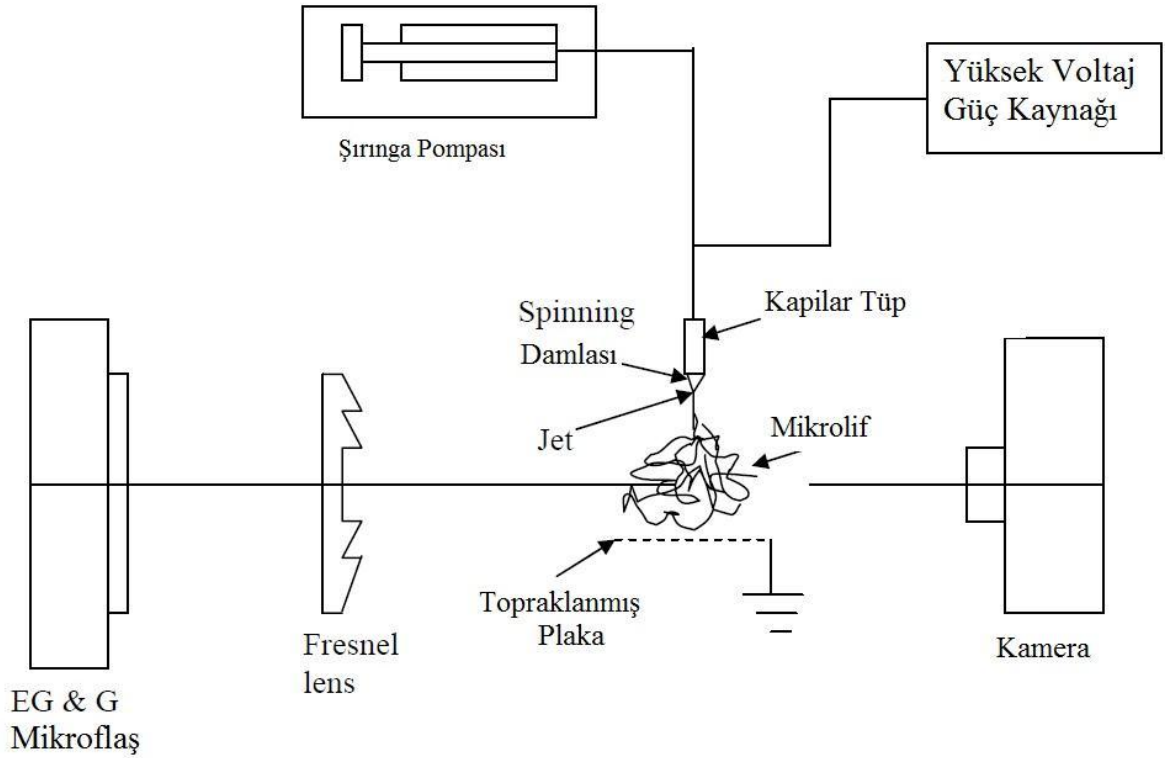
kısımlardan oluşmaktadır. Yüksek gerilim kaynağı ile gerilim değeri artırılarak metal uçtaki yarım küre biçimindeki polimer damlacığı yükselir, kritik gerilim değerinde Taylor konisi halini alır ve sonrasında kararsızlaşarak jet şeklinde karşı plakaya ulaşır [56].



Şekil 3.6 Taylor deney düzeneği [53]

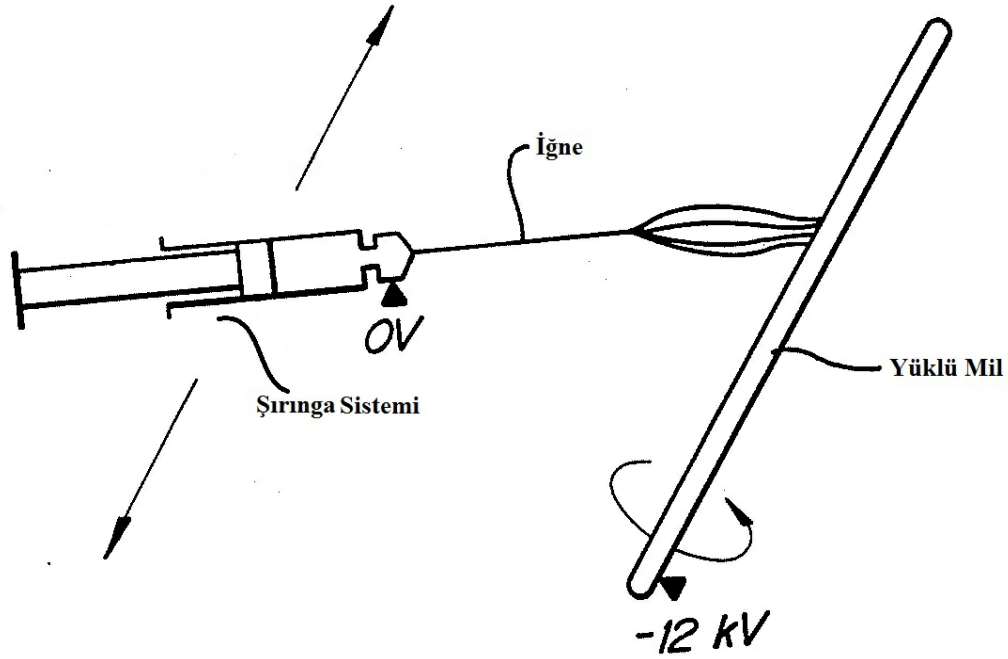
İlerleyen yıllarda araştırmacılar, liflerin yapısal özellikleri ile elektroğirme işlem parametreleri arasındaki ilişkiyi inceleyerek çoğunlukla nanoliflerin yapısal morfolojisi üzerine çalışmalarda bulundular [51]. 1971 yılında Peter Karl Baumgarten, çözelti viskozitesinin, ortam gazının, gerilim değerinin ve jet yarı çapının lif çapı ve jet uzunluğu üzerindeki etkisini araştırırken, jet akışı oluşumu sırasında elektro eğrilmiş lifleri fotoğraflayan yeni bir yöntem geliştirmiştir [38] (Şekil 3.7). Baumgarten elektroğirme işlemini 'Elektro eğirme işlemi sisli bir küme olarak gözükmesine rağmen mikro saniye düzeyindeki flaşlı fotoğraflar, bir seferde sadece tek bir lifin eğrildiğini ve liflerin elektriksel topraklamaya isabet eden birçok spiral oluşturduğunu ortaya koymaktadır.' şeklinde ifade etmiştir. Baumgarten elektro eğirme yöntemiyle ürettiği akrilik mikro liflerin çaplarının 500 nm ile 1100 nm arasında değiştiğini ifade

etmiştir [58]. Baumgarten, bir PAN ve DMF çözeltisinin eğrile-bilirlik sınırlarını inceledi ve çözeltinin viskozitesi lif çapı arasında spesifik bir bağ olduğunu gözlemledi. Uygulanan elektrik alandaki ilk artıştan sonra oluşan jet çap değerinin minimuma ulaştığını ve elektrik alan değerinin giderek artırılmasıyla jet çapının daha büyük olduğunu gösterdi [51]. Bunun sebebi olarak, elektrik alan değerinin artmasının elektrostatik kuvvetleri arttırdığını ve bunun sonucunda kapilar tüp ucundan daha fazla çözelti çekilerek polimer besleme oranını artması görülmüştür [59].



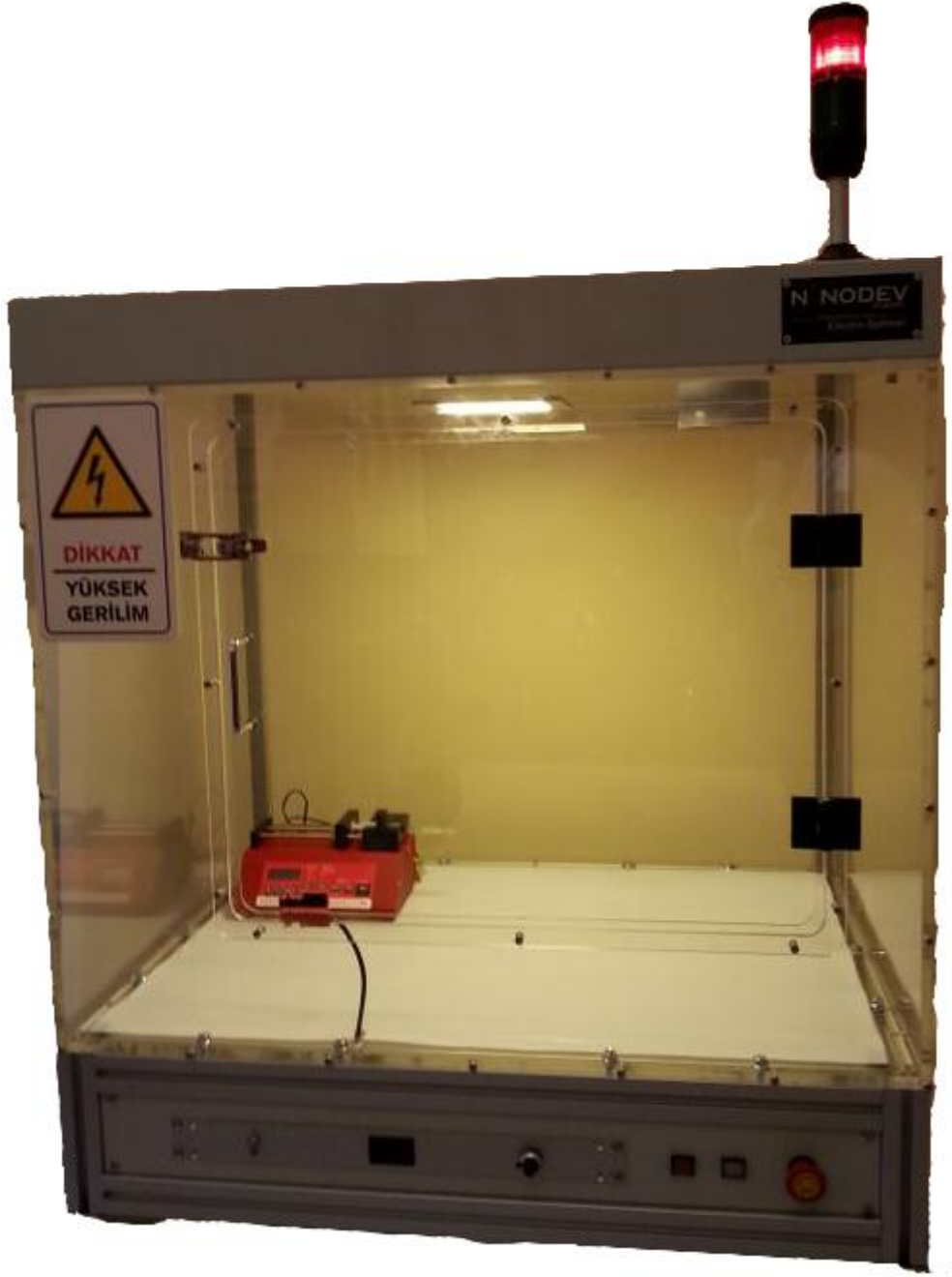
**Şekil 3.7** Baumgarten elektroegirme deney düzeneği [56]

1985 yılında How, tasarladığı elektro egirme düzeneği ile poliüretan gibi organik polimerik malzemeden sentetik damar üretimini gerçekleştirmiştir. Şekil 3.8'de gösterilen How'm patentini aldığı elektro egirme prosesi silindir şeklindeki milin bir ekseninde döndürülmesi, milin elektrostatik olarak yüklenmesi, organik polimer malzemenin mile göre yönelmesi ve milin dönme hızının kontrol edilmesi gibi işlemlerden oluşmaktadır. Silindirik mile -12 kV uygulanabilir ve milin dönme hızı 0 ile 25000 rpm arasında değişkenlik gösterebilmektedir ancak tercihen 2000 rpm ile 20000 rpm arasındaki dönüş hızları kullanılmıştır [60].



Şekil 3.8 How'ın kullandığı elektroğirme deney düzeneği [60]

1990'lu yılların başında Doshi ve Reneker'in çalışmalarıyla birlikte nanolifler üzerine araştırmalar büyük bir ivme kazanmıştır. Doshi ve Reneker polimer çözeltisinin yoğunluğunu ve elektro eğirme işlemi sırasında uygulanan elektrik potansiyelini değiştirerek PEO nanoliflerinin gösterdiği özellikleri incelediler [61]. Aynı zamanda elektroğirme yöntemiyle daha ince nano liflerin üretilebileceğine ve sürekli üretimin yapılabileceğine dikkat çekmişlerdir. Elektroğirme yöntemiyle birçok organik polimerden nanoliflerin üretilebileceğini göstermişlerdir [62]. Bu yıllardan sonra araştırma gruplarının yanı sıra birçok kurum elektro eğrilmiş nanolifler üzerine araştırma-geliştirme çalışmaları yapmıştır. Şekil 3.9'da günümüzde ticari olarak kullanılan yüksek gerilim kaynağı 1-25 kV aralığında kullanılabilen ve aynı zamanda akış hızı, eğirme uzaklığı ve toplama alanı ayarlanabilen NANODEV marka elektro-ğirme cihazı gösterilmiştir [63].



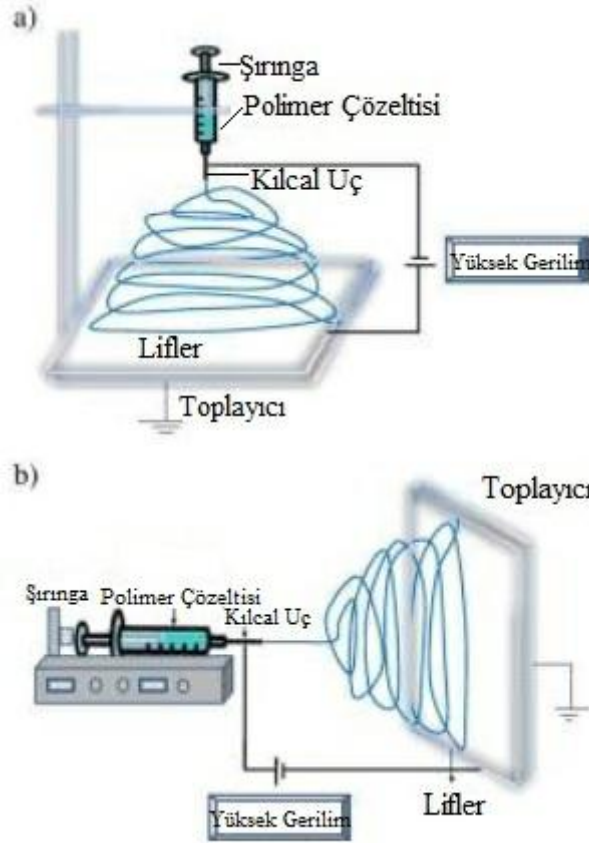
Şekil 3.9 Nanodev marka başlangıç seviyesi elektroegirme cihazı [63]

## 4. ELEKTRO EĞİRME İŞLEMİ İLE NANOLİF ÜRETİM SÜRECİ

### 4.1 Elektro Eğirme İşlemi

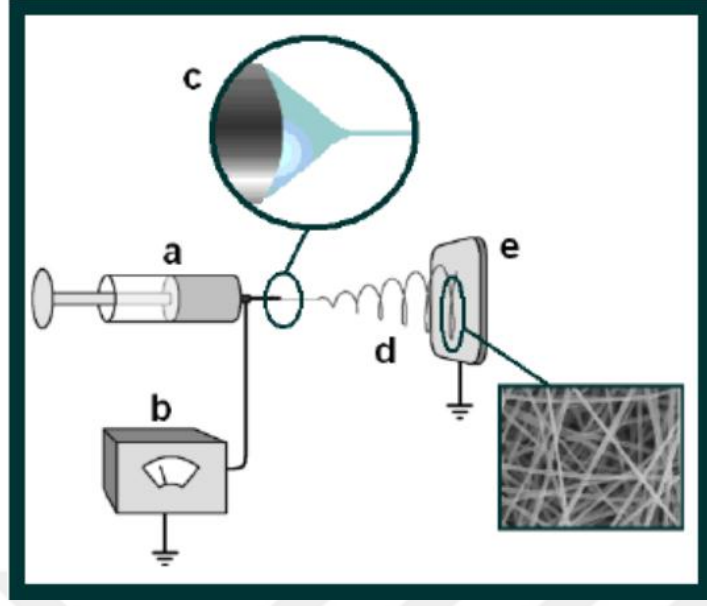
Elektroeğirme yöntemi, elektrostatik kuvvet yardımıyla polimer çözeltilerinden ya da eriyiklerden nano boyutta lif üretme tekniğidir. Elektroeğirme yöntemiyle üretilen lifler, geleneksel eğirme yöntemleriyle üretilen liflere kıyasla daha küçük çaplara ve daha büyük bir yüzey alanına sahiptir [64]. Sahip oldukları çok büyük yüzey alanları, liflerin rastgele konumlanması sonucu oluşan yüksek gözeneklilik ve küçük gözenek boyutları gibi özellikleriyle nano lifli yüzeyler yapay organlar, yara örtüleri, ilaç taşıyıcı sistemleri gibi biyomedikal uygulamalarda kendilerine önemli bir yer bulmaktadır [65, 66]. Elektro eğirme işlemi oda sıcaklığında atmosferik koşullar altında gerçekleştirilmektedir ve bu yöntemle üretilen liflerin lif inceliği gibi özellikleri kontrol edilerek istenen özelliklerde nano lif elde edilebilmektedir [64, 67]. Şekil 4.1’de gösterildiği gibi temelde dikey ve yatay olarak ayrılan iki tip elektroeğirme sistemi vardır ve aynı zamanda tipik bir elektro eğirme sistemi üç ana bileşenden oluşmaktadır [68].

- 1.) Besleme Ünitesi (Şırınga, metal iğne ...)
- 2.) Yüksek Gerilim Güç Kaynağı
- 3.) Toplayıcı (İletken plaka, döner silindir vb.)



**Şekil 4.1** Elektroğirme yönteminde lif oluşumu **a)** Dikey sistem **b)** Yatay sistem [69]

Şekil 4.2’de elektroğirme işlemi sırasında oluşan nano liflerin şematik gösterimi verilmiştir. Elektroğirme işleminden önce polimer ya uygun çözücüde çözülür ya da eritilir. Daha sonra polimer sıvısı veya eriyiği besleme ünitesine konulur [64]. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’ de gösterildiği gibi polimer çözeltisinin konulduğu besleme ünitesinin kılcal metal ucu ile topraklanmış metalik toplayıcı arasına yüksek gerilim güç kaynağı bağlanarak yüksek bir elektrik alan oluşturulur. [70]. Elektrik alan kuvveti çözeltinin moleküler çekimini yener ve polimer, iç çapı 0,5 ile 0,15 mm arasında olan bir iğne ucundan püskürtülerek elektriksiz olarak yüklenmiş polimer jeti halinde çıkar [71, 72]. Jet toplayıcıya ulaşmadan önce elektrostatik etkileşimler ile esneme ve gerilmeye maruz kalarak uzar ve çözücünün buharlaşmasıyla nano lif formunda toplayıcı üzerinde katılır [71].



**Şekil 4.2** Elektro eğirme işleminin şematik gösterimi

(a) Enjekte edilen polimer çözeltisi, (b) Yüksek gerilim güç kaynağı, (c) İğne ucundaki damlacık şeklinin koni biçimine dönüşümü,

(d) Jetin yol aldığı kararsızlık bölgesi, (e) Toplayıcıda biriken nano lif tabakası [73]

Elektroeğirme işleminde başlangıçta damlacık oluşumu gözlenir. Sonrasında damlacık taylor konisi biçimini alır ve jet çıkışı başlar. Oluşan jet önce kararlı bölgede uzarken sonrasında kararsız bölgeye maruz kalır ve en son olarak toplayıcı üzerinde lifler halinde katılır. Aşağıdaki bölümlerde elektroeğirme 6 temel aşaması açıklanmaktadır [74]:

#### 4.1.1 Damlacık oluşumu

Elektro eğirme işleminin ilk aşamasında, bir motor yardımıyla kontrollü hız sağlanarak çok düşük hızlarda besleme ünitesinin kılcal ucuna iletilen polimer çözeltisine herhangi bir elektrik alan uygulanmazsa kılcal uçtaki damla halindeki polimer çözeltisi sadece yer çekimi kuvveti ( $F_g$ ) ve yüzey gerilim kuvvetlerinin ( $F_\gamma$ ) etkisinde olacağı için zemine düşer [75, 76]. Oluşan damlacığın yarıçapı  $r_0$ , kılcal ucun iç yarıçapı R, yüzey gerilimi  $\gamma$ , sıvı yoğunluğu  $\rho$ , yer çekimi sabiti r ise

$$r_0 = \left( \frac{3 \times R \times \gamma}{2 \rho g} \right)^{1/3}$$

(4.1)

denklemini elde edilmektedir [42].

Damlacığa elektrik alan uygulanmasıyla gerilim seviyesi artırılır ve belli bir gerilim seviyesine gelindiğinde elektrik kuvveti  $F_E$ , yerçekimi kuvveti  $F_g$  ile sıvının yüzey gerilimine karşı koyar. ( $F_Y = F_E + F_g$ ) ve bununla birlikte damlacık yarıçapı  $r_0$ ' dan  $r$ ' ye düşer. Elektrik alanın artışıyla beraber damlacık boyutunun küçülmesi kararsız olana kadar devam eder [42].

#### 4.1.2 Taylor konisi oluşumu

Besleme ünitesindeki kılcal uca iletilen polimer damlacığı kritik bir gerilim değerine ulaşıncaya kadar yüzey gerilim kuvvetlerinin etkisinde olduğu için küre formundadır [21]. Elektro eğirme işlemi boyunca başlangıçta küresel formda bulunan damlacığı yüksek hızlı kararsız bir jet formuna dönüştüren beş kuvvet etki etmektedir [77]. Bu kuvvetler; yüzey alanını genişleten elektriksel yüklerden kaynaklanan elektrostatik kuvvet  $F_E$ , damlacığın jet şeklinde uzamasını engelleyen ve damlacığı kararlı formda tutmaya çalışan yüzey gerilim kuvveti  $F_Y$ , polimer çözeltisinin akışkanlığını azaltan koni oluşumunu ve polimer jetin uzamasını engelleyen viskoelastik kuvvet  $F_{ve}$ , elektro eğirme sisteminin yatay veya dikey konumlanmasına göre damlacığın veya jetin toplam yükünü pozitif veya negatif olarak etkileyen yerçekimi kuvveti  $F_g$  ve damlacıktaki içsel kuvvetlerden dolayı damlacığın üzerine geri itici kuvvet olarak etki eden bir kulomb kuvveti  $F_c$ 'dir [75, 78]. Bu kuvvetler

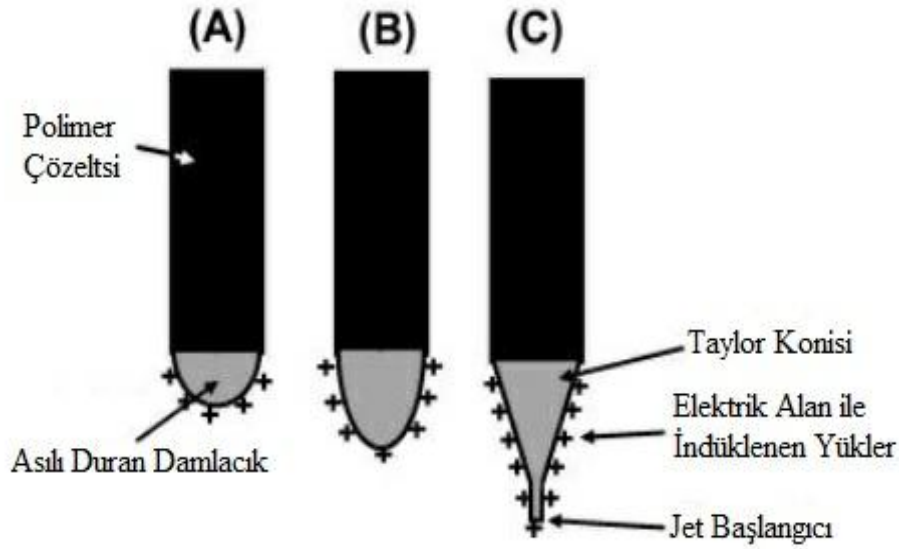
$$F_t = F_E + F_c + F_{ve} + F_Y + F_g$$

(4.2)

şeklindeki eşitlikle ifade edilmektedir [78].

Uygulanan gerilim belli bir kritik değere ulaştığında, damlacığın dağılmasına yol açan elektriksel yüklerden dolayı oluşan elektrostatik kuvvetler ile diğer kuvvetler birbirini dengeleyerek polimer damlacık koni şeklini alır. Kritik gerilim değerinde yarı dikey

açısı hemen hemen  $49,3^\circ$  olan bu özel konik şekle ‘Taylor Konisi’ denmektedir [75, 79]. Aşağıdaki Şekil 4.3’ de Taylor konisi oluşumunun şematik gösterimi verilmiştir.



**Şekil 4.3** Taylor koni oluşumunun şematik gösterimi: a.) Polimer çözeltisinde elektrik alandan dolayı yüzey yüklerinin indüklenmesi b.) Asılı duran damlacığın uzaması c.) Asılı damlacığın elektriksel yüklerin birbirini itmesinden dolayı Taylor Konisi biçimine dönüşmesi ve sonrasındaki jet başlangıcı [80]

#### 4.1.3 Elektro eğirme jetinin oluşumu

Kritik gerilim değerinin ( $V_c$ ) üzerine çıkılmasıyla yüzey gerilim kuvvetleri elektrostatik kuvvetleri dengeleyemez ve Taylor Konisi biçimindeki polimer damlacığının ucundan toplayıcıya doğru hareket eden ince bir jet gönderilir (Şekil 4.3 c). Uygulanan gerilim değeri arttıkça Taylor konisi şeklindeki polimerin yüzeyinden çıkan jet sayıları da artmaktadır [42]. Maksimum yük yoğunluğu jetin olduğu koni ucunda bulunmaktadır ve fırlatılan sıvı jet, toplayıcıya doğru hızlanarak hareket etmektedir [72, 81, 82].

Şekil 4.4’te gösterildiği gibi eğirme işlemi sırasında polimer jetten çözelti buharlaşarak jet akımı toplayıcıya doğru ilerler ve nano lifler katı halde toplayıcı plaka üzerinde birikir [83].



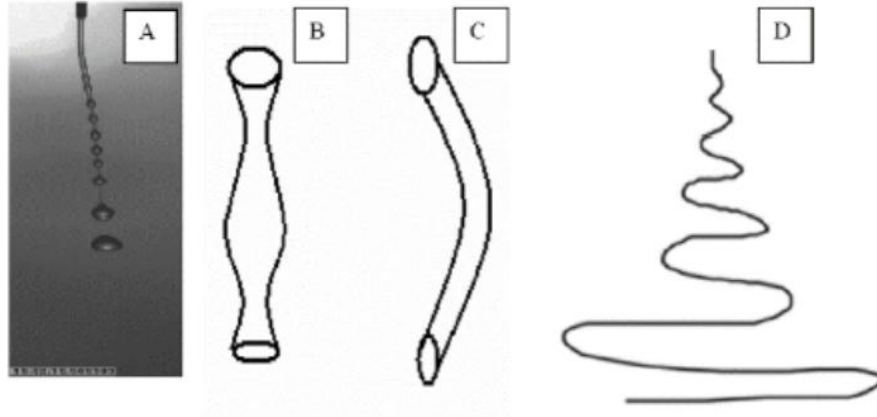
**Şekil 4.4** Yüklü damlacıktan çözücünün buharlaşması sonucu oluşan iyon fişkırması  
[76]

#### 4.1.4 Kararlı bölgede jetin uzaması

Polimer jeti toplayıcıya doğru ilerlerken sadece belli bir mesafe için kararlı formda doğrusal bir hareket izler ve giderek hızlanır. Bu hareket sırasında jet esnemeye maruz kalarak uzar ve incelir aynı zamanda çözücünün buharlaşmasıyla jet çapı küçülmektedir. Hem jetin incilmesi hem de çözücünün buharlaşmasıyla jetin birim kütledeki yüzey alanı artar [84].

#### 4.1.5 Kararsız bölgenin oluşumu

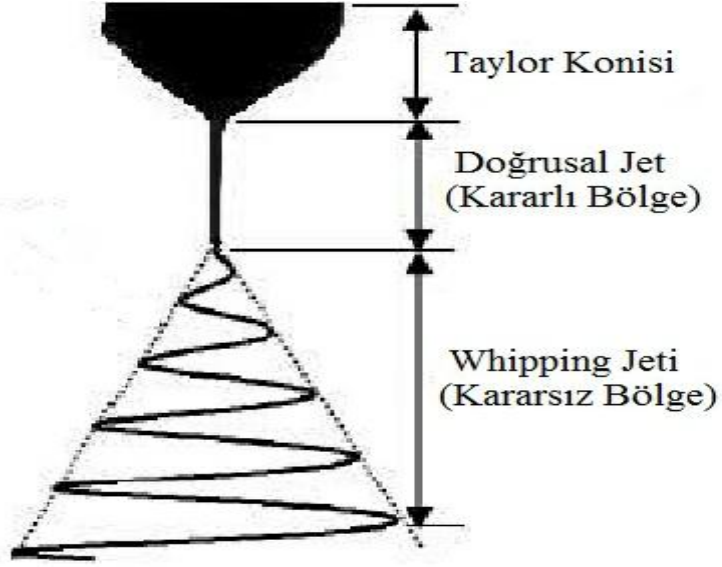
Küresel formdan Taylor konisi formuna dönüşen polimerin yüzeyinden çıkan jet önce kararlı halde belli bir süre doğrusal yol izler ve sonra kararsız bir bölgeye girer. Bu işlemden jetler, liflerin boyutunu ve geometrisini etkileyen üç tür fiziksel kararsızlığa maruz kalabilirler. Kararsızlık türlerinden ilki Ragleigh kararsızlığı diğerleri sırayla bükülme ve whipping kararsızlığı şeklinde adlandırılmaktadır [85, 86]. Polimer jeti bu kararsızlık türlerinden sadece birine maruz kalabilecekleri gibi üç kararsızlık türünü de gösterebilir [86]. Hangi kararsızlığın oluşacağı çoğunlukla yüzey yük yoğunluğuna ve jet yarıçapına bağlı olmaktadır [87]. Yüksek elektrik kuvvetlerinde çoğunlukla bükme (simetrik eksenli) ve whipping kararsızlıkları jette etkisini göstermektedir [71]. Şekil 4.5'te jette meydana gelen kararsızlık halleri gösterilmektedir.



**Şekil 4.5** Jette görülen kararsızlık türleri **a.)** Ragleigh kararsızlığının gösterimi **b.)** Simetrik eksenli elektrik alan akımlanmasının gösterimi **c.)** Whipping kararsızlığı ile sonuçlanan bükülme kararsızlığı **d.)** Whipping Kararsızlığı [88]

Karşılaşılan kararsızlık türlerinden ilki Ragleigh Kararsızlığında (Şekil 4.5 a) maddenin iletkenliği önemli bir rol oynamadığı için bu kararsızlığa yalıtkan mod kararsızlığı da denilebilir. Bu kararsızlık türü düşük elektrik alanlarda gerçekleşir ve çoğunlukla malzemenin yüzey gerilimine bağlıdır. Diğer iki kararsızlık türlerinden olan Simetrik eksenli elektrik alan akımlanması (Şekil 4.5 b) ve Whipping Kararsızlığı daha yüksek elektrik alanının uygulanmasıyla ortaya çıkar ve çoğunlukla çözeltilerin iletkenliğine bağlıdır [71].

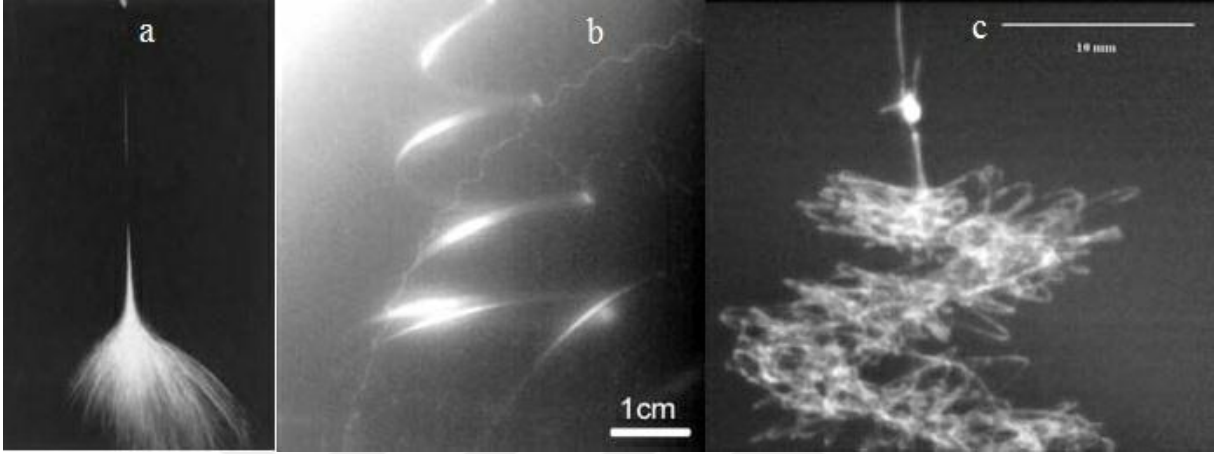
Elektro eğirme işleminde en sık görülen kararsızlık türü Whipping Kararsızlığıdır [78]. Şekil 4.6' da gösterildiği gibi Taylor konisinden çıkan jet belli bir mesafede doğrusal bir yol izledikten sonra çözücü sürekli olarak buharlaşır ve jet uzayarak çapı küçülür. Püskürtülen jet akımı genellikle jet yayılımı halinde kararsızlık yaşar [83].



Şekil 4.6 Elektro eğrilmiş jetin hareketi [89]

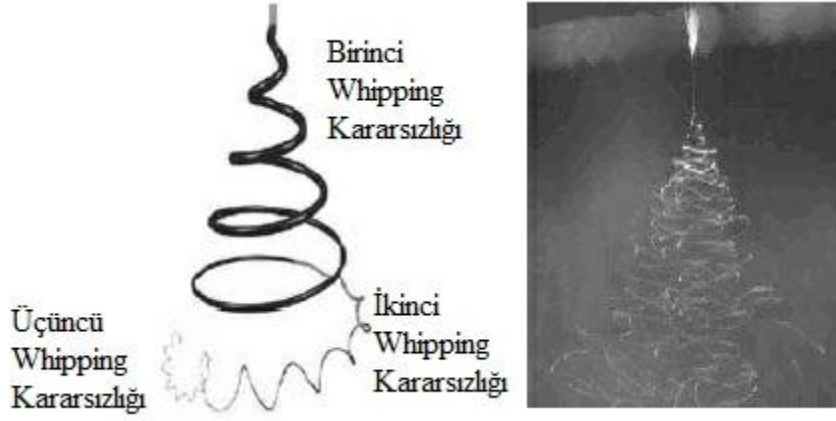
Çıplak gözle ya da düşük hızlı fotoğraflama ile bu kararsızlık, başlangıçta tek jet akımının çoklu jet akımlarına ya da alt liflere tekrarlanan çatallanmalar ile yayılması şeklinde görünmektedir. Bu yayılım Şekil 4.7 a' da görüldüğü gibi saçaklanmış ip görünümündedir. Jetin görünür yayılımı, lif yüzeyinin farklı kısımlarındaki artan elektrostatik itme gücü ile açıklanabilir. Ancak Şekil 4.7 b' de gösterildiği gibi yüksek hızlı kameralarla yapılan daha sonraki çalışmalar, bu görünür yayılımın jetin çok hızlı Whipping (Çırpma) hareketi şeklinde optik bir yanılsama olduğunu ortaya koymuştur [83]. İleriki çalışmalar bu kararsızlığın başlangıçta düzgün olarak yüklenmiş doğrusal lif oluşumundaki küçük bükülmelerin sonucu olduğunu göstermiştir. Ancak lif büküldükçe jet çevresindeki yüzey yükleri homojen olarak dağılamamaktadır ve çift kutuplu (dipolar) moment jete indüklenir. Bu dipoller (çift kutuplar) birbirlerine ve uygulanan elektrik alanına karşılık olarak bölgesel bir tork başlatır ve Şekil 4.5 c' de gösterildiği gibi bu tork jeti büker. Jet ileriye doğru akış yönünde hareket ettikçe bükülmeler artırılır ve bunun sonucunda liflerin çapının azalmasına neden olan whipping kararsızlığı oluşur (Şekil 4.5 d). Çözücünün buharlaşmasıyla jet çapı daha da azalır. Whipping kararsızlığı sonucu oluşan çaptaki bu azalma yüzey geriliminin, viskozitenin, jetlerin yüzey yüklerinin ve iç yüklerin ivmelenmesi arasındaki karmaşık ilişki sonucu jetin aldığı yol uzunluğunun artması olarak var sayılabilir [71]. Çoğunlukla Whipping Jeti, Şekil 4.5 b' de ve Şekil 4.6' de görüldüğü gibi bükülme kararsızlığı sonucu sarmal halka şeklinde ortaya çıkmaktadır. Rutledge ve arkadaşları simetrik eksenli ve simetrik

eksenli olmayan birçok olası kararsızlıkları hesaba katarak elektro eğirme işleminin teorik bir modelini geliştirdiler. Simetrik eksenli kararsızlık sıvı akımının peristaltik bir dalgalanması olabilirken, bükülme ve sarmal kararsızlıklar simetrik eksenli olmayan kararsızlıklardır. Onlar, Ragleigh Kararsızlığının baskılandığını simetrik eksenli olmayan whipping kararsızlığının ise arttırıldığını gözlemlerler [83].



**Şekil 4.7** Sudaki etilen oksidin jet akışları **a)** Görünür yayılma (düşük hızlı fotoğraflama) **b)** Tek, dallara ayrılmamış lifin sarmal whipping hareketi (yüksek hızlı fotoğraflama) **c)** Eğirme sırasında sarmalların birleşmesiyle oluşan asetondaki polikaprolaktanun (PCL) şerit oluşumu. [83, 86, 90, 91].

Polimer jeti toplayıcı plakaya yaklaştığında jet yüzeyindeki yüklerin birbirlerini itmelerinden kaynaklı ana jetten dallanan küçük jetler oluşmaktadır. Elektriksel kuvvetlerin etkisiyle ivmelenen polimer jeti yeteri kadar ince forma ulaştığında ve viskoelastik yükler yeteri kadar sönmüldüğünde yeni whipping kararsızlıkları meydana gelmektedir. Oluşan bu kararsızlıkların şematik gösterimi ve fotoğrafı Şekil 4.8’ te verilmektedir [78].

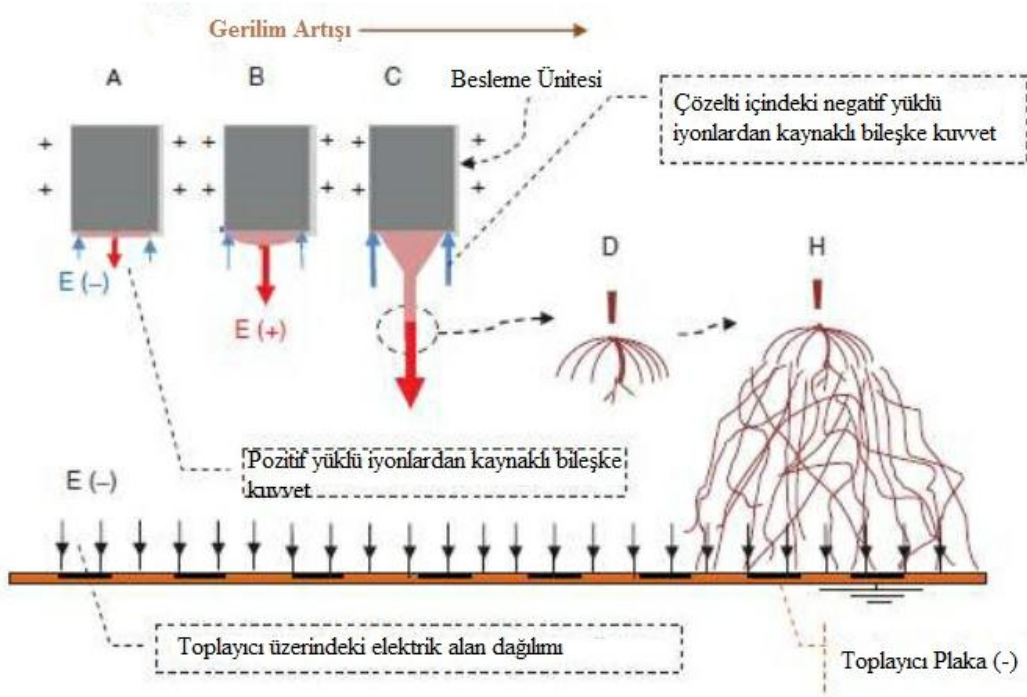


Şekil 4.8 Elektro eğirme yönteminde Whipping kararsızlığı [92]

#### 4.1.6 Lif formunda katılaşma

Yukarıdaki bölümlerde de anlatıldığı gibi kararsızlık bölgesinde ivmelenen polimer jetinin yüzey alanı giderek artmakta ve içindeki çözücü buharlaşmaktadır. Polimer jeti buharlaşan çözücü sayesinde toplayıcı plaka üzerinde katı halde toplanmaktadır. Çözücünün sahip olduğu buharlaşma hızı jetin kararsızlık bölgesinden geçiş süresine etki etmektedir. Buharlaşma hızı yüksek bir çözücü kullanıldığında polimer jetinin kararsızlık bölgesinden geçişi kısa sürer ve bu da daha kalın nano liflerin oluşmasına sebep olur [42].

Şekil 4.9' da elektroegirme işleminin asılı damlacık oluşumundan jet oluşumuna, jetin kararsız bölgesindeki davranışından toplayıcı plaka üzerinde ağ yapısı halinde toplanmasına kadar süreç aşamaları özetlenmiştir.



Şekil 4.9 Elektroğirme işleminin aşama aşama gösterilmesi [93]

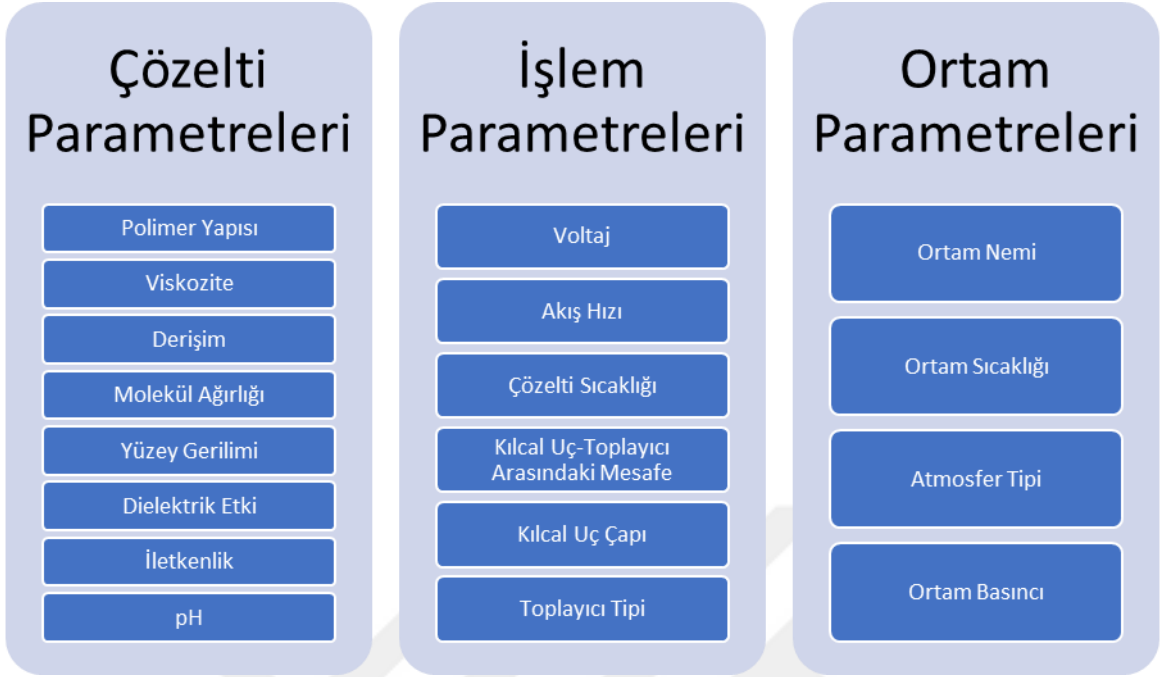
## 4.2 Elektroğirme İşlemini Etkileyen Parametreler

Elektroğirme işlemiyle ideal bir nano lif oluşturulmak istendiğinde gerçekleştirilmesi gereken hedefler şunlardır;

- Liflerin çapları uygun ve kontrol edilebilir olmalıdır.
- Lif yüzeyi hatasız yapıya sahip olmalı ya da hatalar kontrol edilebilir olmalıdır.
- Nano lifler tek yapı halinde toplanabilir olmalıdır.

Fakat araştırmacılar bu üç hedefe ulaşmanın zor olduğunu ortaya koymuşlardır [94]. Elektroğirme yöntemi birçok faktörün etkili olduğu karmaşık bir işlem olduğu için nanolif yapısını etkileyecek birçok parametre mevcuttur. Elektroğirme işlemi aşağıdaki Tablo 4.1' de genel olarak sınıflandırılmıştır.

**Tablo 4.1** Elektroğirme yöntemini etkileyen faktörler [75]



## 5. BİYOMEDİKAL UYGULAMALARI İÇİN TAŞINABİLİR ELEKTROEĞİRME SPREY TABANCASININ TASARIMI

Yukarıdaki bölümlerde anlatıldığı gibi bir elektro eğirme sistemi en basit haliyle kılcal uç, yüksek gerilim güç kaynağı ve iletken plakadan oluşmaktadır. Bu çalışmada da elektro eğirme sisteminin temel bileşenlerinden hareketle taşınabilir elektro eğirme sprej tabancasının tasarımı ve üretilmesi amaçlanmıştır. Bu tasarımda kullanılan malzemeler şu şekilde sıralanabilir:

- DC Motor
- Dc Motor Sürücü ve mikro denetleyici kartı
- OLED Ekran
- 24V-2A'lık Güç Kaynağı
- Yüksek Gerilim Güç Kaynağı
- Gerilim Dönüştürücü İzolasyon Trafosu
- Köprü Diyot
- LM2596
- Çiftli Potansiyometre

### 5.1 Taşınabilir Elektro Eğirme Sprej Tabancasının Tasarımı için Kullanılan Elektronik Donanımlar

#### 5.1.1 DC motor

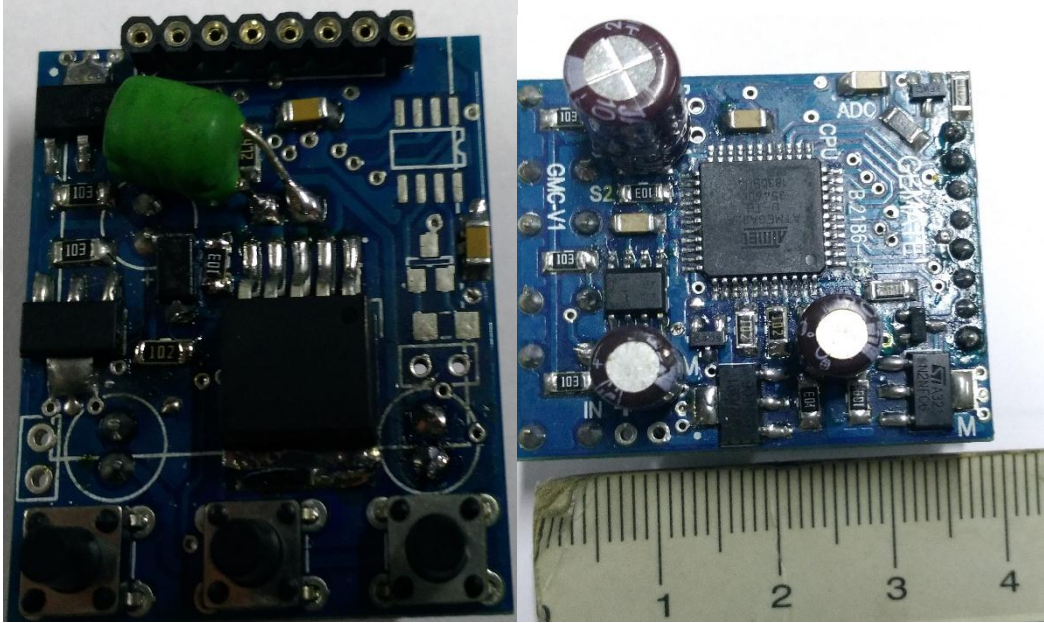
Bu çalışmada Şekil 5.1'te gösterilen 24 V anma gerilimine, 0.275 A anma akımına, 200 Ncm anma torkuna ve 14 rpm anma hızına sahip Bühler Motor marka DC Motor kullanılmıştır [95].



Şekil 5.1 Bühler motor marka 24 VDC motor

### 5.1.2 Kontrol kartı

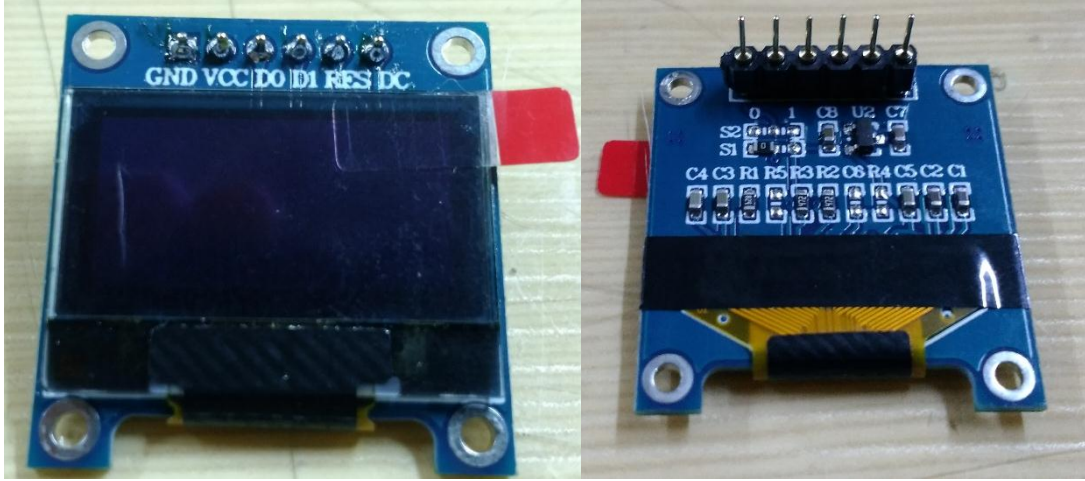
Taşınabilir elektro eğirme sprej tabancasının ilk tasarımında mikro denetleyici olarak Arduino Uno R3 ve motor sürücü olarak Easy Driver kullanılmış ancak karşılaşılan ısınma problemleri ve kartın daha küçük boyutlara indirgenmesi gereksiniminden Şekil 5.2’de gösterilen özel üretim GEMATE marka kontrol kartı kullanılmıştır.



Şekil 5.2 GEMATE kontrol kartı ön ve arka yüz

### 5.1.3 OLED ekran

Taşınabilir elektro eğirme sprej tabancasının ilk tasarımında kullanılan Arduino Keypad Lcd Ekran yerine daha az güç tüketimine sahip ve daha küçük boyutlarda olan OLED Grafik Ekran tercih edilmiştir. OLED Grafik Ekran 128x64 piksel çözünürlüğüne sahip, 0,96 inç (2,5 cm) genişliğinde, çalışma gerilimi 3 V ile 5 V arasında olan, SPI/I2C arayüz desteğine sahip ve 6 adet pin ile kontrol edilerek istenilen yazı veya şekilleri ekrana yazdırabilen özelliklere sahiptir [96]. Şekil 5.3’te gösterilen OLED Grafik Ekran modülünün pin isimleri ve işlevleri Tablo 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.3 OLED grafik ekran ön ve arka yüz

Tablo 5.1 OLED Grafik Ekran Modülünün Pin İsimleri ve Fonksiyonları [97]

Pin Numarası	Pin Adı	Eşdeğer İsimleri	Kullanımı
1	GND	Ground	Eksi (-) bağlantısının yapıldığı uç
2	VCC	VDD, 5 V	Enerjinin verildiği uç
3	DO	SCK, SCL, CLK	Hem I2C hem de SPI için kullanılan saat darbesinin yapıldığı uç (clock pin)
4	D1	SDA, MOSI	Hem I2C hem de SPI için kullanılan modülün veri ucu (data pin)
5	RES	RST, RESET	Modülü sıfırlamak için kullanılan uç
6	DC	A0	SPI protokolü için veri komutu ucu (data command pin)

#### 5.1.4 Güç kaynağı

Projede elektro eğirme sprej tabancası şebekeye bağlı bir sistem olarak tasarlandı. Bu yüzden şebekeden çekilen 220 VAC gerilimi, kontrol kartın beslemesi olarak kullanılacak 24 VDC gerilime dönüştürmek için Şekil 5.4'te gösterilen MERVESAN Markanın MS-6024 model güç kaynağı kullanıldı. Güç kaynağının özellikleri şu şekildedir [98]:

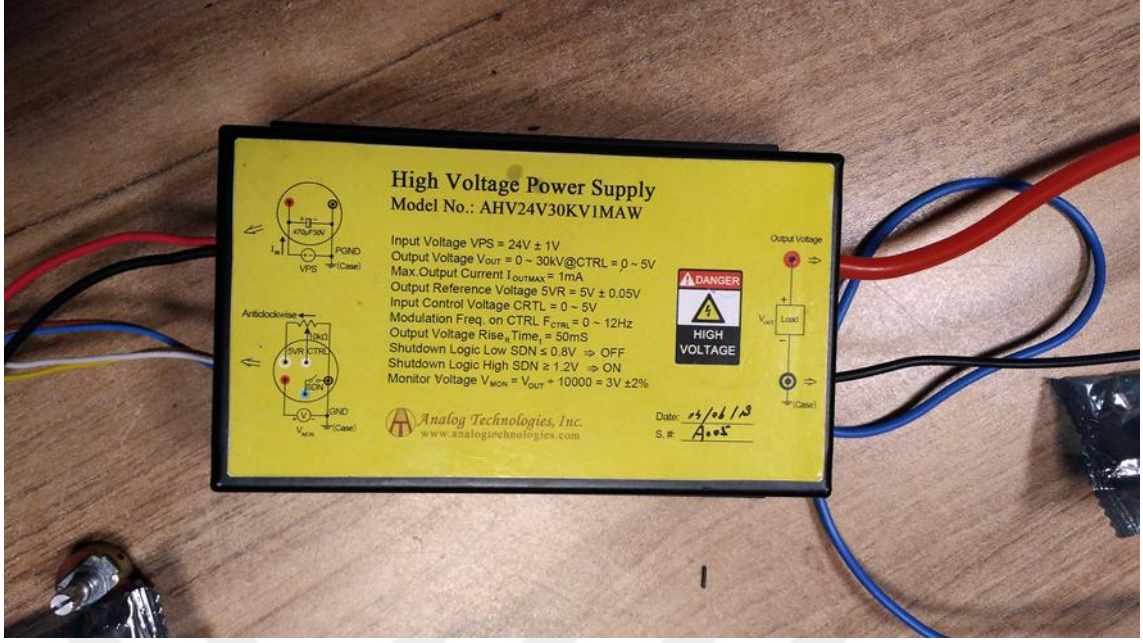
- AC Gerilim Giriş Aralığı: 100-240 VAC
- DC Çıkış Gerilimi: 24 V
- Çıkış Akım Aralığı: 0-2,5 A
- Çıkış Gücü: 60 W
- Kısa Devre/Aşırı Yük/ Yüksek Gerilim Korumalı



Şekil 5.4 24 V 2,5 A'lik Adaptör

#### 5.1.5 Yüksek gerilim güç kaynağı

Elektroegirme sistemi için gerekli yüksek elektrik alanı oluşturmak için Şekil 5.5'te gösterilen Analog Technologies Inc. Şirketine ait maksimum 30 KV'a kadar çıkış verebilen AHV24V30KV1MAW Model yüksek gerilim güç kaynağı kullanıldı.

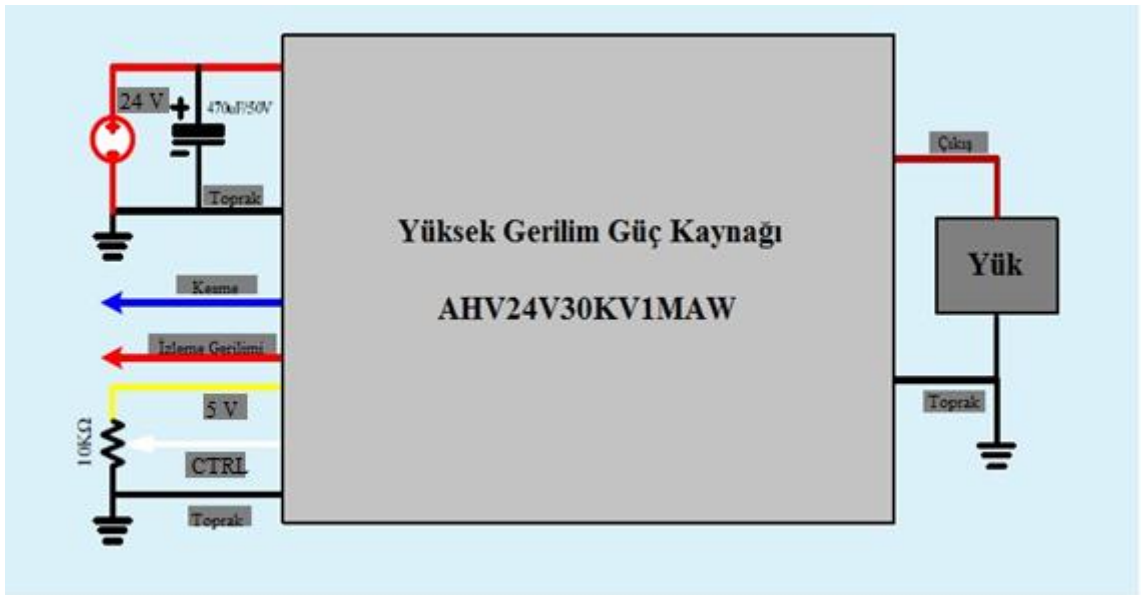


**Şekil 5.5** Maksimum 30 KV'a kadar çıkış verebilen yüksek gerilim güç kaynağı

Yüksek gerilim güç kaynağının giriş uçlarındaki kırmızı kablo giriş gerilimi 24 Voltu, siyah kablo topraklamayı (gnd,- ucu), beyaz kablo regülasyon kablosunu, sarı kablo referans gerilimi 5 Voltu (30 KV/5 V), mavi kablo kesme (kapatma) kablosunu temsil ederken çıkış kablolarından kalın kırmızı kablo yüksek gerilim çıkışını kahverengi kablo ise gerilim izleme (10000=3V, voltage monitör, feedback) kablosunu ifade eder. Potansiyometre ile yüksek gerilim güç kaynağı çıkışındaki istenen yüksek gerilim değeri ayarlanabilmektedir. Bunun için regülasyon kablosu olan beyaz kabloya potansiyometrenin orta ucu bağlanır. Diğer uçları da sırasıyla topraklama (-, gnd) için kullanılan siyah kabloya ve referans gerilim ucu olan sarı kabloya bağlanarak istenen çıkış gerilimi, potansiyometre çevrilerek elde edilmektedir [99]. Yüksek gerilim güç kaynağının bazı teknik özellikleri Tablo 5.2'de verilmiştir.

**Tablo 5.2** Yüksek gerilim güç kaynağının bazı teknik özellikleri [99]

Değişkenler	Sembol	Değer	Birim/İşaret
Giriş Gerilimi	VPS	24±1	V
Regülasyon Modu		0~5 V ya da 10k potansiyometre	
İzleme Gerilimi Çıkış Empedansı	$Z_{VMON}$	1	MΩ
İzleme Gerilimi	$V_{MON}$	0 – 3	V
Tam Yük Altındaki Verimlilik	$\eta$	$\geq 70$	%
Dış Ebatlar	-	140x100x55	Mm
Ağırlık	-	1000	G



**Şekil 5.6** HV modülünün bağlantı diyagramı [99]

### 5.1.6 Gerilim düşürücü izolasyon trafosu

Yüksek gerilim güç kaynağının gereksinim duyduğu giriş gerilimi 24 VDC olduğu için projede öncelikle şebekeden çekilen 220 VAC gerilim 24 VAC gerilime düşürmek istenmiştir. Ayrıca yüksek gerilim güç kaynağı, besleme kısmında elektriksel gürültü ve parazit oluşturduğu için yüksek gerilim güç kaynağının sistemin bağlı olduğu şebekeye parazit vermemesi adına izolasyon sağlanmak istenmiştir. Bu yüzden kapalı tip alçaltıcı gerilim trafosu kullanılmıştır. Şekil 5.7’de kullanılan gerilim düşürücü izolasyon trafosu gösterilmiştir. MERVESAN Elektronik’e ait MS-50-TR modelindeki gerilim düşürücü trafo 220-230 V AC giriş gerilim değerine, 50 Hz çalışma frekansına ve 24 V-1,5 A AC çıkış değerlerine sahiptir.



Şekil 5.7 Kapalı tip alçaltıcı gerilim trafosu

### 5.1.7 Köprü diyot

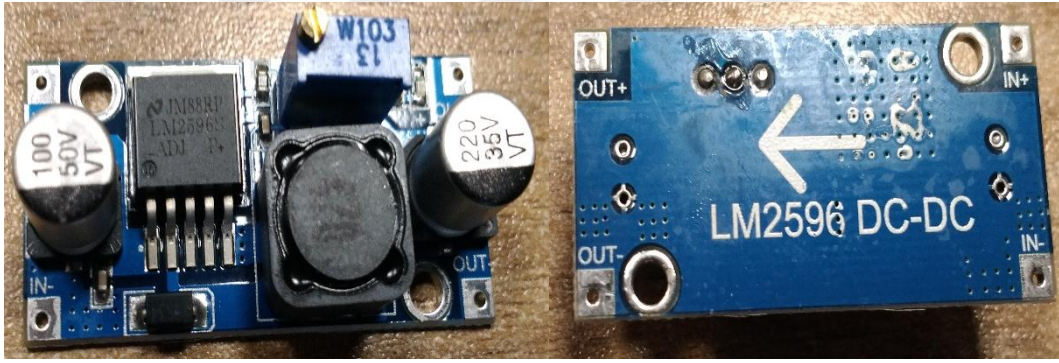
Kapalı tip alçaltıcı transformatör çıkışında elde edilen 24 VAC gerilim Şekil 5.8’de gösterilen köprü diyot bağlantısı ile DC gerilime çevrilerek yüksek gerilim güç kaynağı girişi için gerekli DC gerilim elde edilmiştir.



Şekil 5.8 Köprü diyot bağlantısı

### 5.1.8 LM2596

Köprü diyot ile alternatif akımdan doğru akıma çevrilen çıkış geriliminde dalgalanmaları önlemek ve sabit bir değerde 24 VDC'de tutmak için Şekil 5.9'da gösterilen LM2596 regülatör devresi kullanılmıştır.



Şekil 5.9 LM2596 gerilim regülatörü devresinin ön ve arka yüzü

### 5.1.9 Çiftli potansiyometre

Yüksek gerilim güç kaynağı çıkışındaki gerilim değerini kontrol edebilmek için 10 K değerinde çiftli potans kullanılmıştır. Şekil 5.10'da gösterilen çiftli potansiyometrenin arkasında kalan kısım yüksek gerilim güç kaynağı ile doğrudan bağlantı halindeyken ön kısmındaki potans yüksek gerilim değerinin değişimini Oled grafik ekranda sayısal olarak göstermek için kullanılmıştır.



**Şekil 5.10** 10 K değerinde çiftli potansiyometre

## **5.2 Tasarlanan Taşınabilir Elektroğirme Sprey Tabancasının Çalışma Prensibi**

Elektroğirme sprej tabancası yüksek gerilim değerinin potansiyometre yardımıyla ayarlanarak bu gerilim değerinin OLED grafik ekrana aktarıldığı ve dc motorun ileri geri hareketi sayesinde 0,5 ml'lik şırınga pompasının içindeki polimerin düzeden çıkışına izin veren elektronik mekanizma olmak üzere iki ayrı devre olarak tasarlandı.

### **5.2.1 DC motorun kontrol edildiği elektronik mekanizma**

Bu kısımda kullanılan elektronik donanımlar;

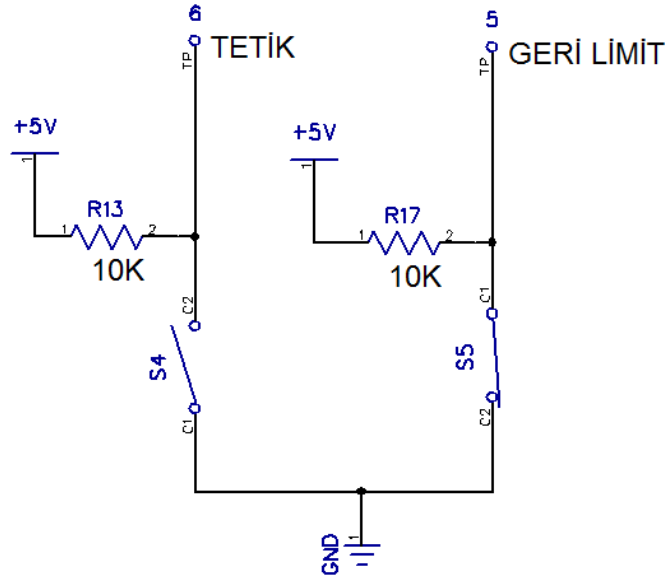
- Şırınga pompasını hareket ettirmek için kullanılan DC motor,
- Kontrol kartı: Kontrol kartı içerisinde
  - H köprü mosfet devresi ile dc motorun yön kontrolünün sağlandığı motor sürücü devresini,
  - Motorun ileri-geri yönde hareketinin sağlanmasında açma-kapama görevi yapan ve program içinde geçişleri sağlayan tuş takım bloklarını,
  - Mikro denetleyici için gerekli regülasyon devresini,
  - ATMEGA 16A mikro denetleyicisini barındırmaktadır.
- Dakikada pompalanan ve şırınga pompası içinde kalan sıvı miktarını ml cinsinden gösteren, 'ileri' ve 'geri' mod ayarları ile motorun ileri-geri hareket ayarlarının seçilmesine ve şırınga pompası içinde hava bulunması halinde ya da gerekli durumlarda bu hareketin manuel olarak yapılmasına izin veren 'boşluk' modunu gösteren, 'boşluk, ileri, geri' modları arasında seçim yapılmasına

olarak sağlayan ve yüksek gerilim değerinin sayısal değerini göstermek için kullanılan OLED Grafik Ekran,

- Şebekeden çekilen 220 VAC gerilimi kartın beslemesi için gerekli 24 VDC gerilime dönüştüren güç kaynağı

olarak özetlenebilir.

Şekil 5.11’de verilen devre şemasında gösterildiği gibi sistemi açıp kapatan tuşa (start-stop tuşu) basıldığında yani S4 anahtarı kapalı duruma getirildiğinde devre toprak üzerinden tamamlanır. Tetikleme tuşuna tekrar basıldığında S4 anahtarı açılır ve mikro denetleyiciye 10 K’lık pull-up direnci üzerinden 5 V’luk sinyal gönderilir. ATMEGA mikro denetleyicisi kendinden pull-up dirençlerine sahip olmasına rağmen sistem kararsızlığını en aza indirmek için 10 K’lık pull-up direnci eklenmiştir.

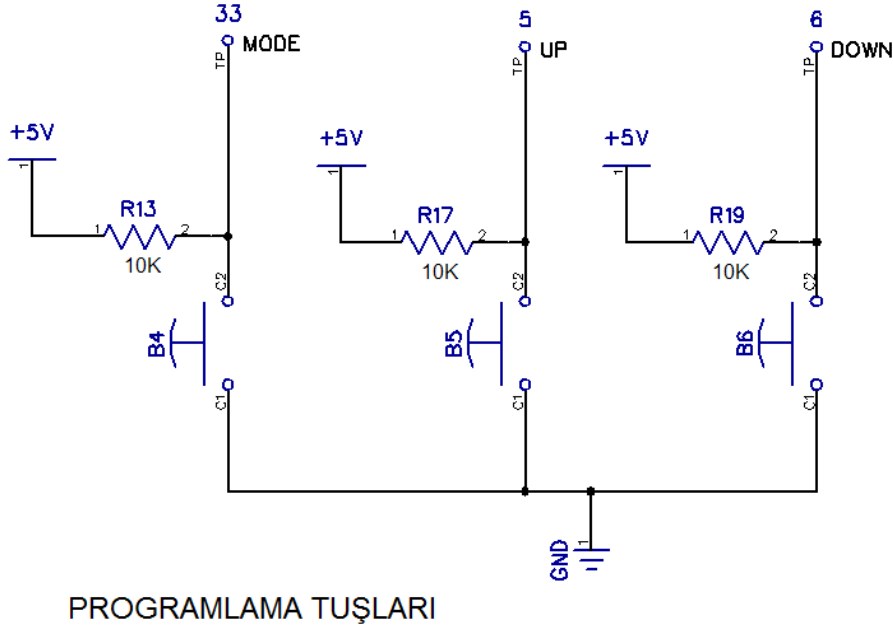


TETİK TUŞU & GERİ LİMİT SIVIÇI

Şekil 5.11 Başlatma tuşu ve geri limit tuşunun devre şeması

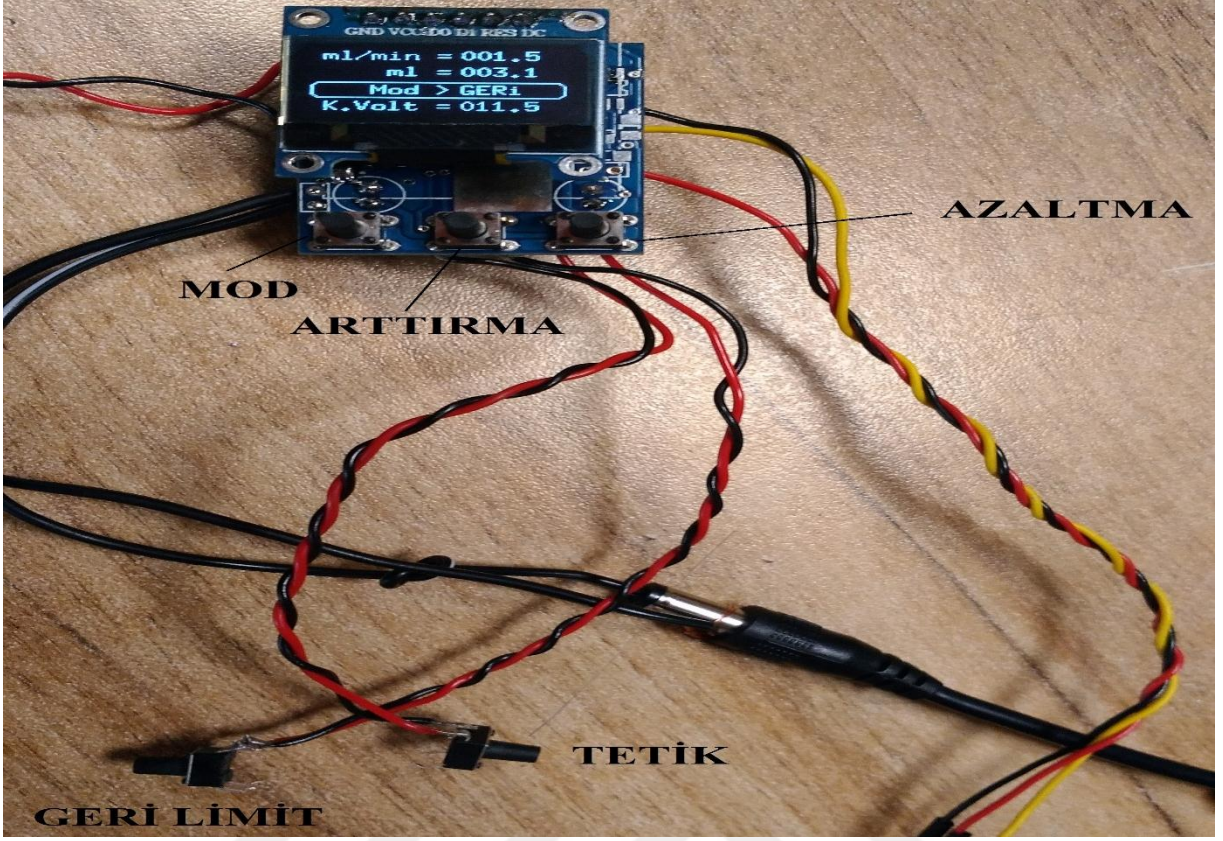
Kontrol kartı üzerine mod, arttırma (up) ve azaltma (down) ayarı olmak üzere 3 adet programlama tuşu yerleştirilmiştir. Mod ayarı ile OLED grafik ekranda gösterilen dört değer (dakikada pompalanacak sıvı miktarı, pompada geriye kalan sıvı miktarı, motorun ileri, geri ya da boşluk ayarında hareketi, yüksek gerilim değeri) arasında yukarı aşağı hareket sağlanarak fonksiyonlar arasında geçiş sağlanır. Arttırma ve azaltma ayarları ile seçilen fonksiyonların sayısal değerlerinin arttırılması veya azaltılması sağlanır. Eğer motorun hareketi seçilecekse arttırma azaltma tuşları ile seçim yapılır.

Şekil 5.12’de devre şeması verilen programlama tuşlarının B4, B5 ve B6 anahtarlarının ilk konumları açıktır ve devre 5 V üzerinden tamamlanmaktadır. B4, B5 ve B6 anahtarlarına basıldığında anahtarlar kapanır ve devre toprak üzerinden tamamlanır. Mikro denetleyiciye sinyal gönderilerek yapılan seçim ya da seçimlerin işlenmesi sağlanmaktadır.



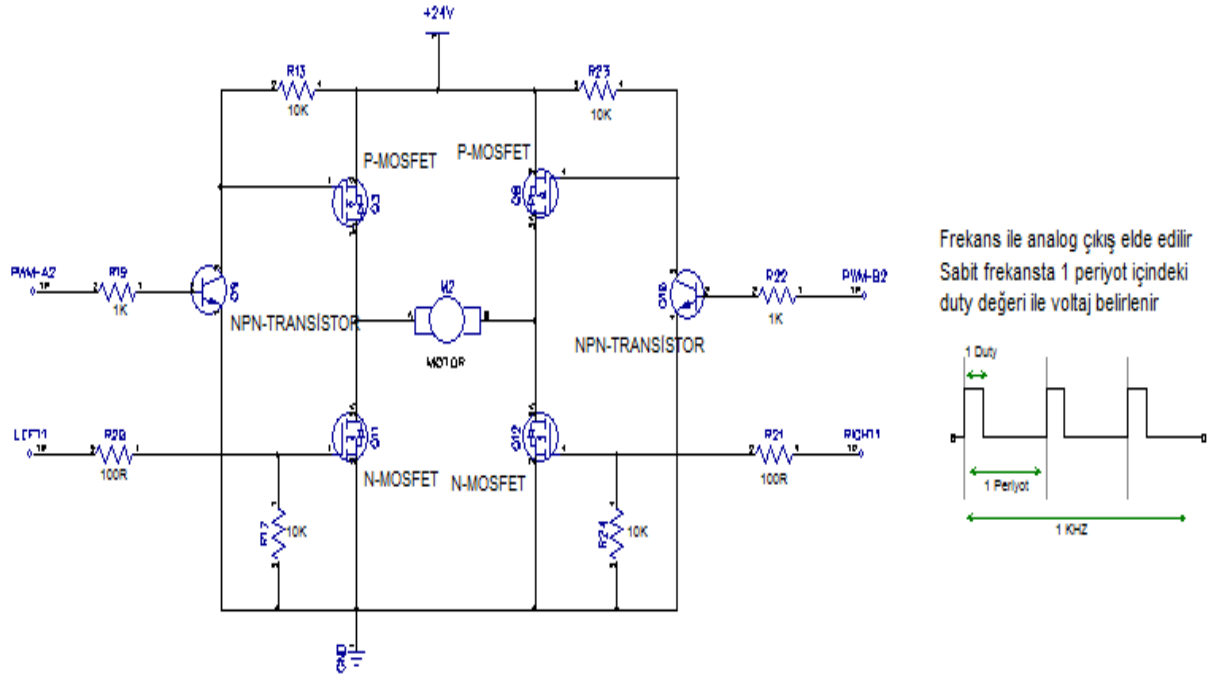
Şekil 5.12 Kontrol kartına yerleştirilen programlama tuşları

Tetik tuşuna basıldığında OLED ekrandan ileri ayarı seçilmişse motor ileri doğru hareket eder ve istenilen sıvı miktarı pompalandıktan sonra durur. Ekrandan geri ayarı seçildiğinde tetik tuşuna tekrar basılır motor geri doğru hareket eder ve motorun arkasına yerleştirilen ‘geri limit’ tuşuna temas ettiğinde durur. Şekil 5.13’te tuş takımlarının fiziksel karşılıkları gösterilmektedir.



**Şekil 5.13** Tuş takımlarının fiziksel görünümleri

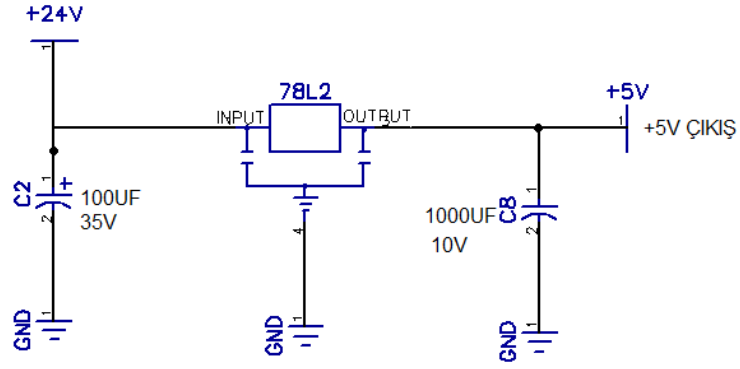
Sistemde şırınga pompasının hem ileri itilmesini hem de geri çekilmesini sağlamak için motor yönünün kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu yüzden Şekil 5.14'te gösterilen H köprülü devrede 2 adet n kanallı mosfet, 2 adet p kanallı mosfet ve 2 npn transistör kullanılmıştır. Devrede sadece mosfetler kullanıldığında 5 V'luk motor sürülebileceği için mosfetlere ek olarak transistörler kullanılarak 24 V'luk motorun kontrolü sağlanmıştır. Ayrıca sabit pwm frekans sinyali yardımıyla voltaj değerinin yüksekte (high) kalma (duty) süresiyle yani bir periyottaki doluluk oranı ile dc motorun hızı kontrol edilmiştir.



DEVİR AYARLI İLERİ GERİ ÇİFT YÖNLÜ DC MOTOR SÜRÜCÜ

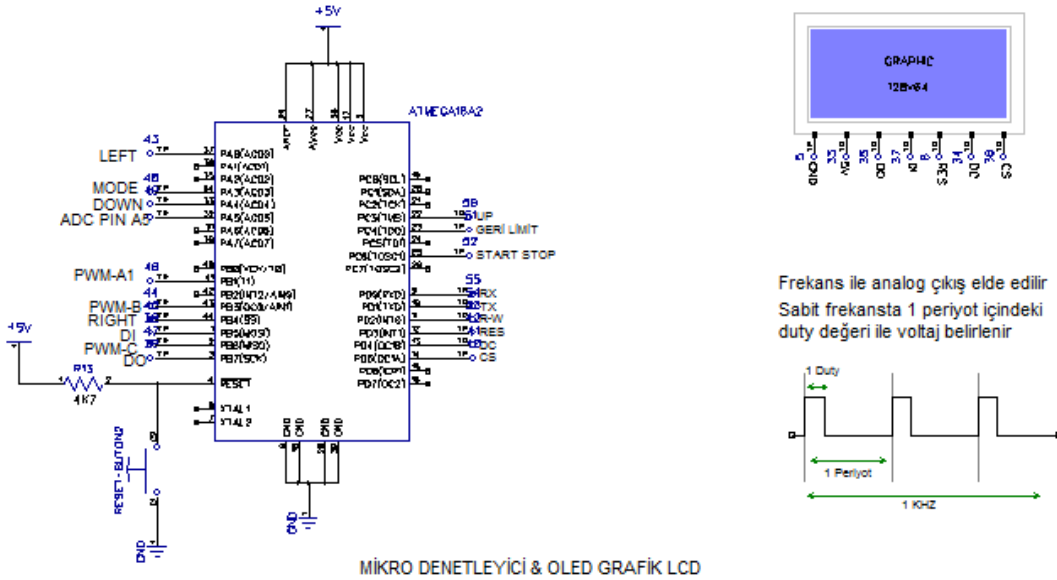
Şekil 5.14 Motorun yön kontrolünün yapıldığı devre şeması

Şebekeden çekilen AC gerilim, güç kaynağı ile 24V luk DC gerilime çevrilse de yüksek frekanstaki gerilim dalgalanmalarını engellemek için sabit bir gerilime ihtiyaç vardır. Bu yüzden hem kontrol kartı için gerekli 5 V'luk gerilimi sağlayabilmek hem de voltajdaki dalgalanmaları önleyebilmek için Şekil 5.15'te görülen regüle devresi kullanılmıştır. Bu devrede 78L05 entegresi kullanılmıştır. Devredeki kondansatörlerin gerilim değerleri devredeki dalgalanmaları önlemek için giriş ve çıkış gerilim değerlerine göre seçilmiştir. Bu referans aralığı, istenen gerilimin %40'ından fazla olma standardıyla 24 V'luk giriş gerilimi için C2 kondansatörünün gerilimi 35 V, 5 V'luk çıkış gerilimi için C8 kondansatörünün gerilimi 10 V olarak seçilmiştir. Ayrıca 5 V'luk çıkış Şekil 5.16'da gösterilen mikro denetleyicinin AREF (29 nolu pin), AVcc (27 nolu pin, Vcc ( 5,17 pinleri) uçlarına bağlanmıştır.



24V > 5V DÖNÜŞTÜRÜCÜ REGÜLE DEVRESİ

Şekil 5.15 24 voltu 5 volta dönüştüren regüle devresi

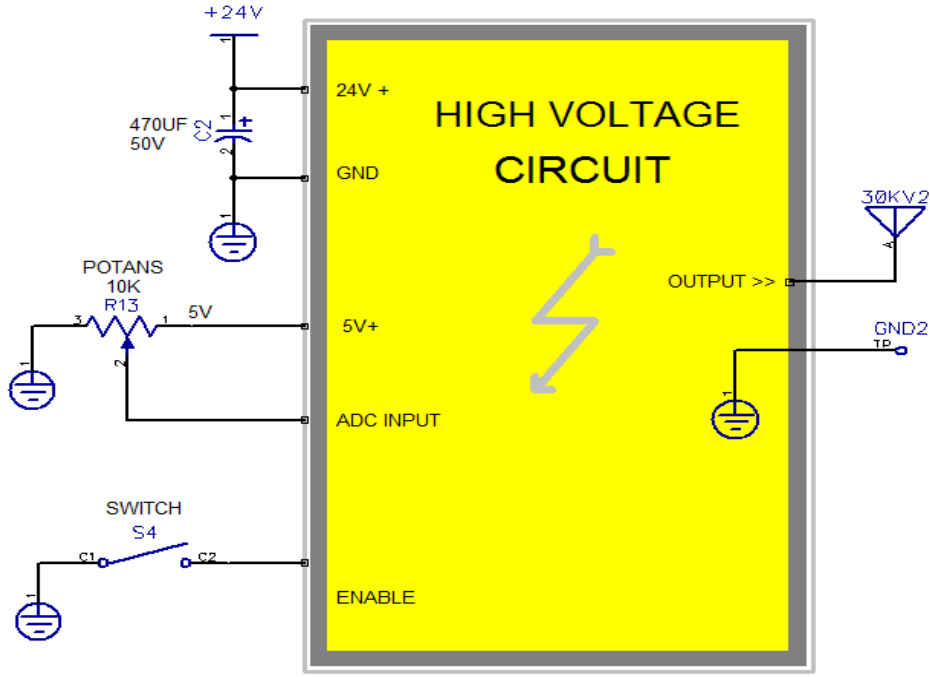


Şekil 5.16 ATMEGA16A mikrodenetleyici ve OLED grafik ekran

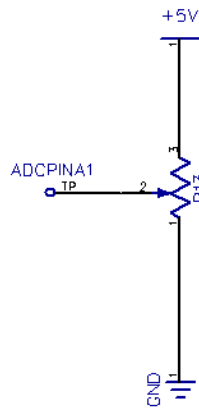
## 5.2.2 Yüksek gerilimin kontrol edildiği elektronik mekanizma

Bu kısımda yukarıda bahsedildiği gibi yüksek gerilim güç kaynağı modülü, gerilim düşürücü izolasyon trafosu, regüle devresi (LM2596+köprü diyot) ve çiftli potansiyometre kullanıldı. AHV24V30KV1MAW Model yüksek gerilim güç kaynağının devre şeması Şekil 5.17’de verilmiştir. Yüksek gerilim güç kaynağının giriş kısmındaki kırmızı kablo (24 V) ve siyah kablo (gnd, toprak) regüle devresinin çıkışına bağlanır, regüle devresinin girişinden aynı şekilde gerilim düşürücü izolasyon trafosuna bağlantı yapılır ve trafo üzerinden de şebekeden akım çekilir. Hem yüksek gerilim

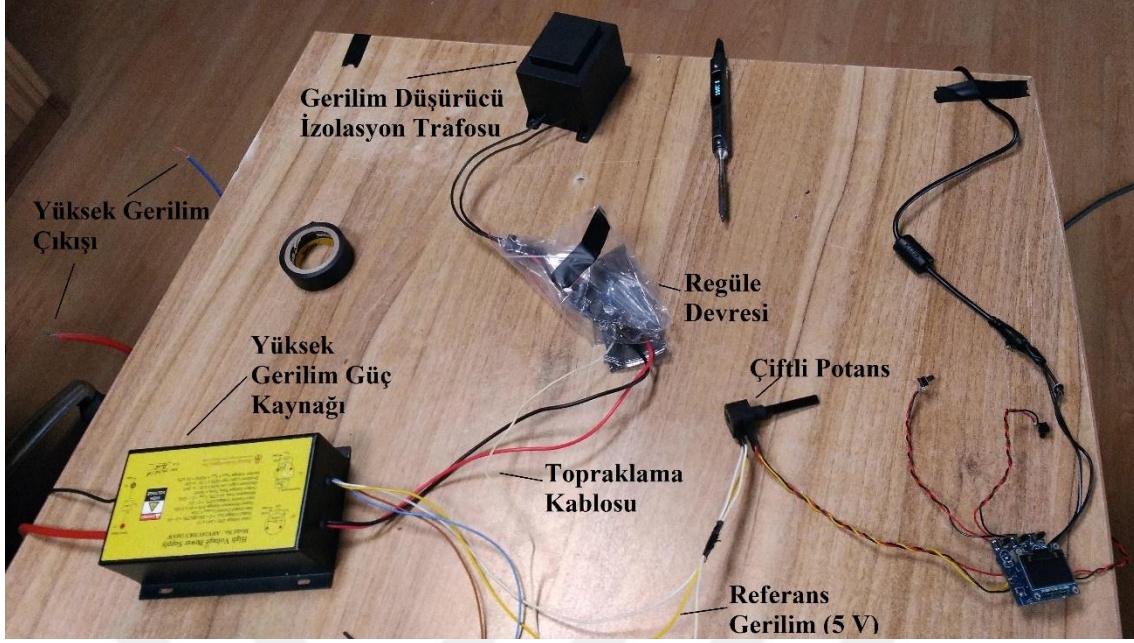
değerini ayarlamak hem de bu değişimi OLED grafik ekran da gözlemlemek için potansiyometrenin orta ucu yüksek gerilim güç kaynağının girişindeki beyaz kabloya, diğer uçları da sırasıyla siyah (toprak) ve sarı (referans gerilim=5 V) kabloya bağlanır. Şekil 5.18’de verilen bağlantı şekline göre potansiyometrenin diğer ucu, gnd (-) uca bağlanmıştır (Şekil 5.19). Potansiyometre Şekil 5.18’de gösterildiği gibi mikro denetleyicinin A1 pinine bağlanır.



Şekil 5.17 Yüksek gerilim güç kaynağı devre şeması



Şekil 5.18 Yüksek gerilimin kontrolü için analog çıkış



Şekil 5.19 Yüksek gerilim devresinin fiziksel bağlantısı

### 5.3 Sistemin Yazılımı

8 bitlik mikro denetleyici olan ATmega16A C dilinde programlanmış olup bu bölümde kullanılan kod parçalarına ve açıklamalara yer verilecektir.

Programın başında motor sürücü devresinde motor yönünü değiştirmek için mosfetlerin right ve left kısmının otomatikleştirmek amacıyla ön yükleme kısmı tanımlanmıştır. Aşağıda verilen kodda R\_MOTOR (right motor) kısmında Şekil 5.14'te verilen devre şemasında solda kalan p tipi mosfete bağlı olan npn transistöre 1, n tipi mosfete 0, devre şemasının sağında kalan p tipi mosfete bağlı olan npn transistöre 0, n tipi mosfete 1 atanarak motorun sola dönmesi; L\_MOTOR (left motor) kısmında devre şemasında solda kalan p tipi mosfete bağlı npn transistöre 0, n tipi mosfete 1, devre şemasının sağında kalan p tipi mosfete bağlı npn transistöre 1, n tipi mosfete 0 atanarak motorun sağa dönmesi ve STOP\_MOTOR kısmında hepsi 0 yapılarak motorun durması tanımlanmıştır.

Aşağıda verilen kodda motor yön tayini için mosfet durumları şu şekildedir.

```
#define S_PNP0 PORTB |=_BV(4) //PNP
#define R_PNP0 PORTB &=~_BV(4)
#define S_NPN0 PORTB |=_BV(3) //NPN
```

```

#define R_NPN0 PORTB &~_BV(3)

#define S_PNP1 PORTB |=_BV(1) //PNP
#define R_PNP1 PORTB &~_BV(1)
#define S_NPN1 PORTA |=_BV(0) //NPN
#define R_NPN1 PORTA &~_BV(0)

#define R_MOTOR (S_PNP0,R_NPN0,R_PNP1,S_NPN1) //LEFT
#define L_MOTOR (R_PNP0,S_NPN0,S_PNP1,R_NPN1) //RIGHT
#define STOP_MOTOR (R_PNP0,R_NPN0,R_PNP1,R_NPN1) //STOP

```

Aşağıdaki kod ile tetik ve geri limit komutları sırasıyla mikro denetleyicinin C6 ve C4 pinlerine veri girişi için tanımlanmıştır.

```

#define TETİK bit_is_clear(PINC,6)
#define R_LIMIT bit_is_clear(PINC,4)

```

Aşağıda verilmiş olan kodlarla mode, up ve down fonksiyon tuşları komutları sırasıyla mikro denetleyicinin A3, C3 ve A4 pinlerine veri girişi için tanımlanmıştır.

```

#define MODE bit_is_clear(PINA,3)//INPUT
#define UP bit_is_clear(PINC,3)//INPUT
#define DOWN bit_is_clear(PINA,4)//INPUT

```

Aşağıdaki kod parçasında kullanıcı opsiyonları 4 adet belirlenmiştir. Mod tuşuna sürekli basılı tutulduğu hallerde tuşun sürekli hareketini engellemek için b[0], 0'a çekilir. Aynı zamanda ortam gürültülerine karşı yüksek gerilim değerinin sağlıklı bir şekilde okunabilmesi için potansiyometreden her 20 ms de bir 10 farklı değer alınır, bu değerlerin ortalaması alınarak ve çarpan değeri ile çarpılarak yüksek gerilim değerinin voltaj değeri bulunur.

```

if(MODE){
    if(b[0]){
        b[0]=0;

        if(menu_vale[0]<3){// FONKSİYON DEĞİŞKENİ 0-1-2-3

```

```

        menu_vale[0]++;
    }
    else{
        menu_vale[0]=0;
    }
}
}
else{
    b[0]=1;
}
an_time++;
if(an_time>=2)
{
    an_time=0;

    an1[an]=adc_read(5);
    an++;
}

if(an>=10)
    an=0;

    sanal_an0= ((an1[0] + an1[1] + an1[2] + an1[3] + an1[4] + an1[5] +
an1[6] + an1[7] + an1[8] + an1[9]) / 10);

    sanal_an0=sanal_an0*29.5; //EKranda 30 kv göstermek için çarpan
    sanal_an0=sanal_an0/100; // 30.000/100 =30=kv

```

Aşağıda verilen program parçasında ml/dak ayarı yapılır ve fonksiyon içindeki set değerlerini değiştirip eproma yükler. Data [0] dakikada pompalanan sıvı miktarını ml cinsinden gösterir. Data[0]<22 komutundaki 22 sayısı 2,2 ml'yi ifade eder. Yani

dakikada en fazla 2,2 ml enjekte edilebilir. Data[0]>10 komutunda dakikada en az 1,0 ml enjekte edilebileceği ifade edilmiştir.

```
    if(menu_vale[0]==0){
        if(UP){
            if(b[1]<10){//SAYILARI ARTIRIR
                b[1]++;
            }
            else{
                if(data[0]<22){
                    data[0]++;
                    eeprom_update_word((uint16_t
*)0,data[0]);
                }
            }
            if(b[1]==1){
                if(data[0]<22){
                    data[0]++;
                    eeprom_update_word((uint16_t
*)0,data[0]);
                }
            }
        }
        else{
            b[1]=0;
        }
        if(DOWN){
            if(b[2]<10){
                b[2]++;
            }
            else{
```

```

        if(data[0]>10){
            data[0]--;
            eeprom_update_word((uint16_t
*)0,data[0]);
        }
    }
    if(b[2]==1){
        if(data[0]>10){
            data[0]--;
            eeprom_update_word((uint16_t
*)0,data[0]);
        }
    }
    else{
        b[2]=0;
    }
}

```

Aşağıda verilen program parçasında ise toplamda enjekte edilecek sıvı miktarının ayarı yapılır ve fonksiyon içindeki değişiklikler eproma yüklenir.

```

    else if(menu_vale[0]==1){
        if(UP){
            if(b[1]<10){
                b[1]++;
            }
            else{
                if(data[1]<60){
                    data[1]++;
                    eeprom_update_word((uint16_t
*)2,data[1]);
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
    if(b[1]==1){
        if(data[1]<60){
            data[1]++;
            eeprom_update_word((uint16_t
*)2,data[1]);
        }
    }
}
else{
    b[1]=0;
}
if(DOWN){
    if(b[2]<10){
        b[2]++;
    }
    else{
        if(data[1]>2){
            data[1]--;
            eeprom_update_word((uint16_t
*)2,data[1]);
        }
    }
    if(b[2]==1){
        if(data[1]>2){
            data[1]--;
            eeprom_update_word((uint16_t
*)2,data[1]);
        }
    }
}
}
}

```

```

else{
    b[2]=0;
}
}

```

Bu kısım grafik ekranda gösterilen mod ayarının yapıldığı kısımdır. Geri, ileri, boşluk ayarı yapılarak şırınga pompasının enjeksiyon yönü (ileri-geri) ya da enjeksiyonun manuel olarak (boşluk) yapılmasının seçimi tayin edilir ve fonksiyon içindeki değişiklikler eproma yüklenir.

```

else if(menu_vale[0]==2){// MODE KISMI ( GERİ / İLERİ / BOŞLUK )
    if(UP){
        if(b[1]){
            b[1]=0;
            if(data[2]<2){
                data[2]++;
                // eeprom_update_word((uint16_t
                *)4,data[2]);
            }
            else{
                data[2]=0;
            }
        }
    }
    else{
        b[1]=1;
    }
    if(DOWN){
        if(b[2]){
            b[2]=0;
            if(data[2]>0){
                data[2]--;
            }
        }
    }
}

```

```

//eeprom_update_word((uint16_t
*)4,data[2]);
    }
    else{
        data[2]=2;
    }
}
}
else{
    b[2]=1;
}
}
}

```

Bu program parçasında da potansiyometreden gelen değere göre yüksek gerilimin değeri ve fonksiyon içindeki değişiklikler ekranda gösterilir.

```

else if(menu_vale[0]==3){
    if(UP){
        if(b[1]<10){
            b[1]++;
        }
        else{
            if(data[3]<300){
                data[3]++;
                eeprom_update_word((uint16_t
*)6,data[3]);
            }
        }
        if(b[1]==1){
            if(data[3]<300){
                data[3]++;
                eeprom_update_word((uint16_t
*)6,data[3]);
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
}
else{
    b[1]=0;
}
if(DOWN){
    if(b[2]<10){
        b[2]++;
    }
    else{
        if(data[3]>2){
            data[3]--;
            eeprom_update_word((uint16_t
*)6,data[3]);
        }
    }
    if(b[2]==1){
        if(data[3]>2){
            data[3]--;
            eeprom_update_word((uint16_t
*)6,data[3]);
        }
    }
}
else{
    b[2]=0;
}
}
}

```

```

Screen_time=0;
u8g_FirstPage(&u8g);
do
{
    menu_1(6,2,data[0]); //ml/min

    menu_2(6,18,data[1]); //ml

    menu_3(6,36,data[2]); //MOD </>

    menu_4(6,52,sanal_an0); //ADC TO 30.000 kv

    menu_5(6,0,menu_vale[0]);

} while ( u8g_NextPage(&u8g) );
}
}

```

Data [2] registerı programın çalışma ayarını gösterir. Data[2]==0 bu ayarlardan boşluk modunu ifade etmektedir.

```

if(data[2]==0){ //BOSLUK
    if(TETİK){
        if(b[3]<20){
            b[3]++;
        }
        else{

            do{

                _delay_ms(3);

                if(motor_ramp[1]<100){

```

```

        STOP_MOTOR;
    }
    else{
        R_MOTOR;
    }

    if(motor_ramp[1]<100){
        motor_ramp[1]++;
    }
    else{
        motor_ramp[0]=0;
    }
}
while(motor_ramp[0]);
}
}
else{
    b[3]=0;

    STOP_MOTOR;

    S_ENABLE;

    //R_DAC;

    motor_ramp[0]=1;
    motor_ramp[1]=0;
}
menu_vale[3]=0;
menu_vale[4]=0;
if(menu_vale[5]!=0){

```

```

        Pwm_calibre[0]=0;

        Pwm_calibre[1]=0;

        menu_vale[5]=0;

        data[1]=eeprom_read_word((uint16_t *)2);

    }

}

```

Programın çalışma modlarından data[2]==1 ileri ayarını ifade etmektedir.

```

else if(data[2]==1){ //İLERİ

    menu_vale[4]=0;

    if(TETİK){

        if(b[3]<20){

            b[3]++;

        }

        if(b[3]==19){

            if(menu_vale[3]==0){

                menu_vale[3]=1;

                if(menu_vale[5]==0){

                    Pwm_calibre[0]=0;

                    Pwm_calibre[1]=0;

                    motor_ramp[0]=1;

                    motor_ramp[1]=0;

                    menu_vale[5]=1;

                    data[1]=eeprom_read_word((uint16_t *)2);

                }

            }

        }

        else{

            //data[1]=eeprom_read_word((uint16_t *)2);

            menu_vale[3]=0;

        }

    }

}

```

```
}  
else{  
    b[3]=0;  
}
```

Grafik ekranda gösterilen ml/min ayarı için motorun 1 tur ilerleme mesafesinin duty boyu data [4] değişken registerine yazılır. Menu\_vale[3]==1 ise motor şırınga pompasını ileri yönde iter. Data [5] değişkenine ise şırınga içerisindeki kalan sıvının miktarı atanır.

```
if (menu_vale[3]==1){  
    if(data[0]==22){  
        data[4]=95;  
        data[5]=54000;  
    }  
    else if(data[0]==21){  
        data[4]=75;  
        data[5]=50000;  
    }  
    else if(data[0]==20){  
        data[4]=47;  
        data[5]=31000;  
    }  
    else if(data[0]==19){  
        data[4]=35;  
        data[5]=24000;  
    }  
    else if(data[0]==18){  
        data[4]=26;  
        data[5]=19000;  
    }  
    else if(data[0]==17){
```

```
        data[4]=25;
        data[5]=18640;
    }
    else if(data[0]==16){
        data[4]=23;
        data[5]=18600;
    }
    else if(data[0]==15){
        data[4]=22;
        data[5]=18570;
    }
    else if(data[0]==14){
        data[4]=21;
        data[5]=18550;
    }
    else if(data[0]==13){
        data[4]=20;
        data[5]=18530;
    }
    else if(data[0]==12){
        data[4]=19;
        data[5]=18500;
    }
    else if(data[0]==11){
        data[4]=18;
        data[5]=18480;
    }
    else{
        data[4]=17;
```

```
        data[5]=18470;
    }
```

Pwm kontrolünün yapıldığı kodlar aşağıda verilmiştir. Programda 1 KHz, 95'e denk gelmekte ve motorun 1 tur / ilerleme mesafesinin dijital kalibrasyonu data [4] değişken registerına atanmaktadır. Yani data [4] duty boyu olarak adlandırılabilir. Motorun duty boyu ne kadar fazla ise motor o kadar hızlı hareket etmektedir. Data [4] = 95 olduğunda motor tam kapasitede çalışmakta ve if komutundan çıkmamaktadır yani stop\_motor koduna uğramaz, motor hızlı bir şekilde şırınga pompasını itmektedir. Motor tam kapasitede çalıştığı için enjekte edilen sıvı miktarı 14 rpm'de dakikada 2,2 ml'dir. Programda data [1], motor enjeksiyon işlemi için çalıştığında pompanın toplamda enjekte edeceği sıvı miktarını ml cinsinden ekranda gösteren registerdır.

```
if(Pwm_calibre[0]<95){
    Pwm_calibre[0]++;
}
else{
    Pwm_calibre[0]=0;
}

if(Pwm_calibre[0]<=data[4]){
    R_ENABLE;
    while(motor_ramp[0]){
        _delay_ms(3);
        if(motor_ramp[1]<100){
            STOP_MOTOR;
        }
        else{
            R_MOTOR;
        }
        if(motor_ramp[1]<100){
            motor_ramp[1]++;
        }
    }
}
```

```

        else{
            motor_ramp[0]=0;
        }
    }
    R_MOTOR;

    if(Pwm_calibre[1]<data[5]){
        Pwm_calibre[1]++;
    }
    else{
        Pwm_calibre[1]=0;

        if(data[1]>0){
            data[1]--;
        }
        else{
            data[1]=eeprom_read_word((uint16_t *)2);
            menu_vale[3]=0;
            menu_vale[5]=0;
        }
    }
}
else{
    STOP_MOTOR;
    S_ENABLE;
}
}
else{
    STOP_MOTOR;
}

```

```

        S_ENABLE;

        // R_DAC;

        motor_ramp[0]=1;

        motor_ramp[1]=0;

    }

}

```

Data[2]==2 olduğunda program modlarından geri ayarı seçilmiş olunur.

```

else if(data[2]==2){
    menu_vale[3]=0;

    if(menu_vale[5]!=0){
        Pwm_calibre[0]=0;
        Pwm_calibre[1]=0;
        menu_vale[5]=0;
        data[1]=eeprom_read_word((uint16_t *)2);
    }

    if(TETiK){

        if(b[3]<20){
            b[3]++;
        }

        if(b[3]==19){
            if(menu_vale[4]==0){
                menu_vale[4]=1;
            }

            else{
                menu_vale[4]=0;
            }
        }
    }
}

```

```

else{
    b[3]=0;
}
if(R_LIMIT==ON){
    menu_vale[4]=0;
}
if (menu_vale[4]==1){
    do{
        _delay_ms(3);
        if(motor_ramp[1]<100){
            STOP_MOTOR;
        }
        else{
            L_MOTOR;
        }
        if(motor_ramp[1]<100){
            motor_ramp[1]++;
        }
        else{
            motor_ramp[0]=0;
        }
    }
    while(motor_ramp[0]);
    L_MOTOR;
}
else{
    motor_ramp[0]=1;
    motor_ramp[1]=0;
    STOP_MOTOR;
}

```

```

        S_ENABLE;

        // R_DAC;

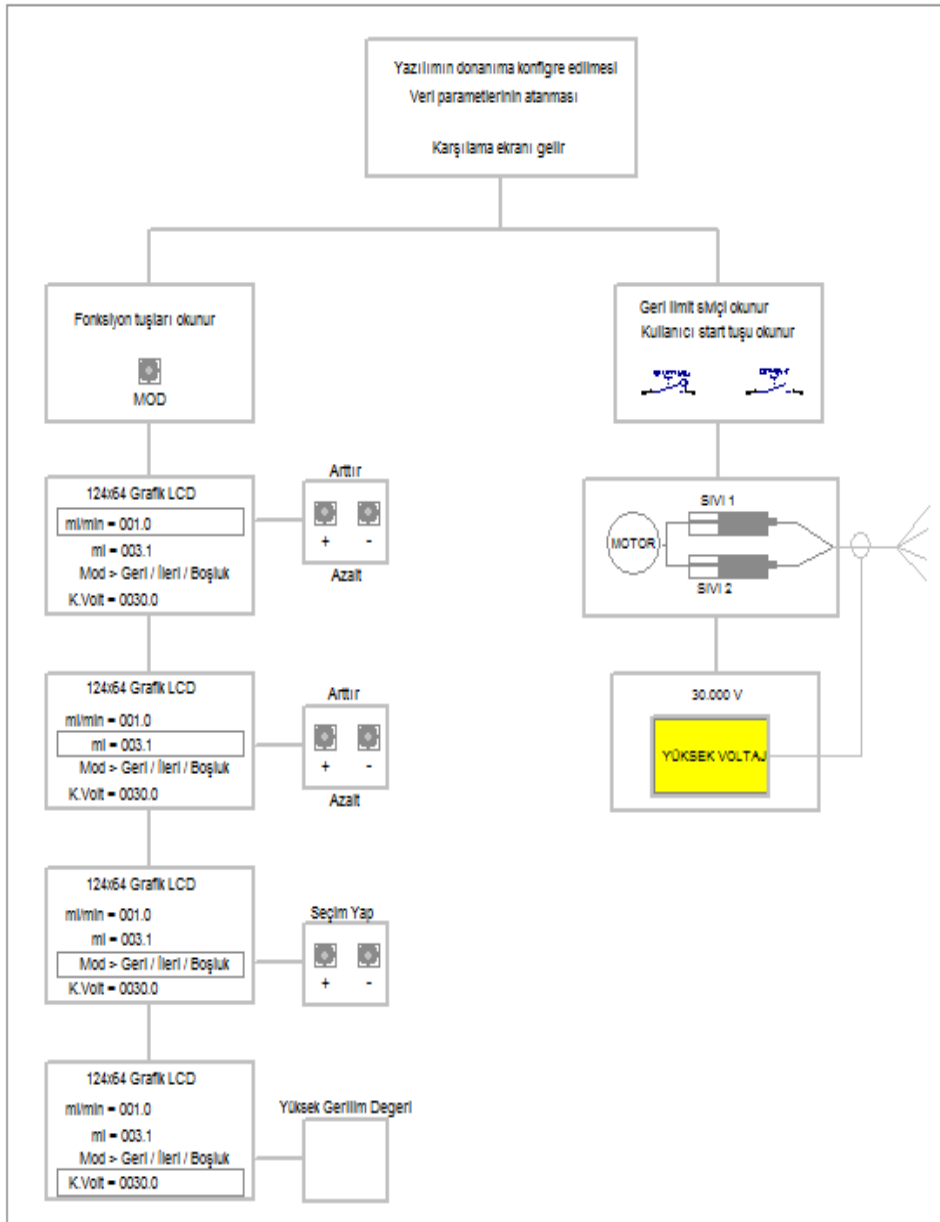
    }

}

}

```

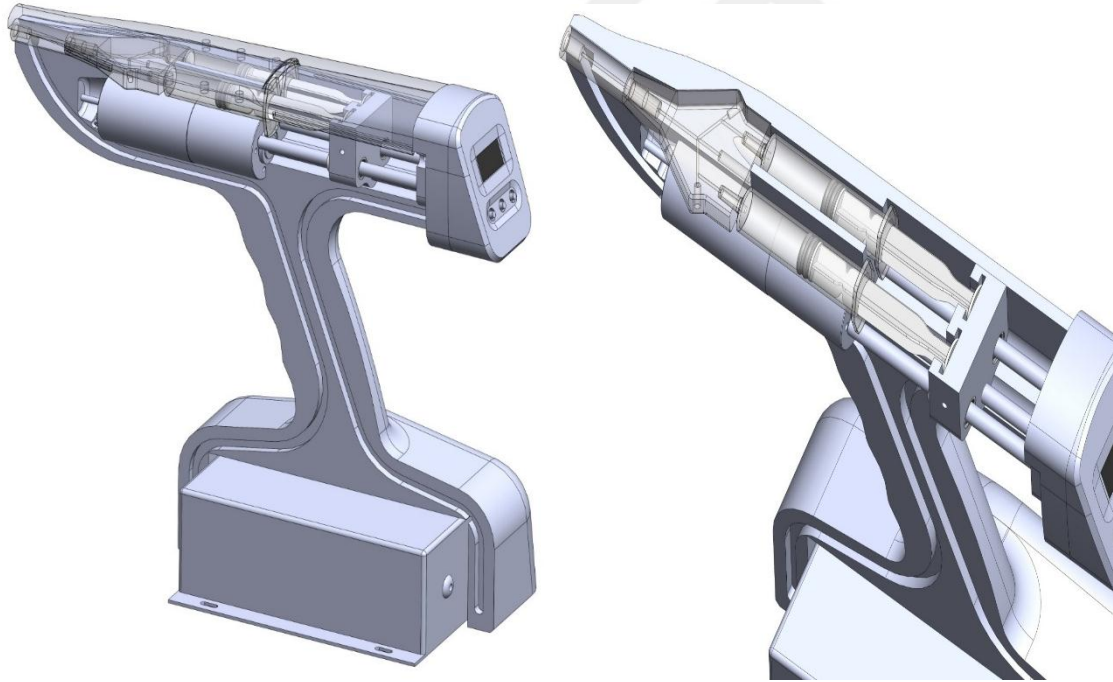
Bu kısma kadar taşınabilir elektro eğirme cihazı tasarımında kullanılan donanımlara, devre şemalarına, bağlantı şekillerine ve yazılım kısmına değinildi. Son olarak Şekil 5.20’de sistemi özetleyen diyagram verilmektedir.



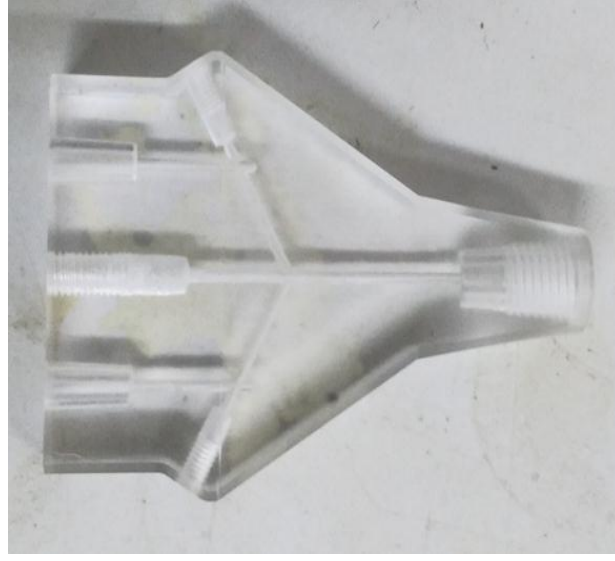
Şekil 5.20 Cihaz donanımının çalışmasını gösteren diyagram

#### 5.4 Elektroğirme Tabancasının Mekanik Tasarımı

Elektroğirme yöntemiyle üretilen nano liflerin geniş tıbbi uygulamaları içinde yara örtücü olarak kullanılmalarının yara iyileşme hızında ve yara izinin giderilmesi üzerindeki başarımlarından dolayı bu çalışmada elektroğirme sistemi taşınabilir el tipi tasarıma indirgenerek acil tıbbi müdahale anlarında kullanılması hedeflenmiştir. Elektroğirme tabancası içinde iki şırınga pompası barındıracak şekilde tasarlanmış ve şırınga pompalarından çıkan sıvılar şırınga ucunda birleşerek tek bir sıvı halinde çıkışları sağlanmıştır. Elektroğirme sprey tabancasının kullanım hedeflerinden biri de ilaç salınımını gerçekleştirmek olduğu için tabanca bu şekilde tasarlanmış ve deneyler sırasında başlangıç için şırınga pompalarına tek cins polimer sıvısı enjekte edilmiştir. Şekil 5.21’de elektroğirme sprey tabancasının 3D görüntüleri verilmektedir.



Şekil 5.21 Cihazın 3D görüntüleri



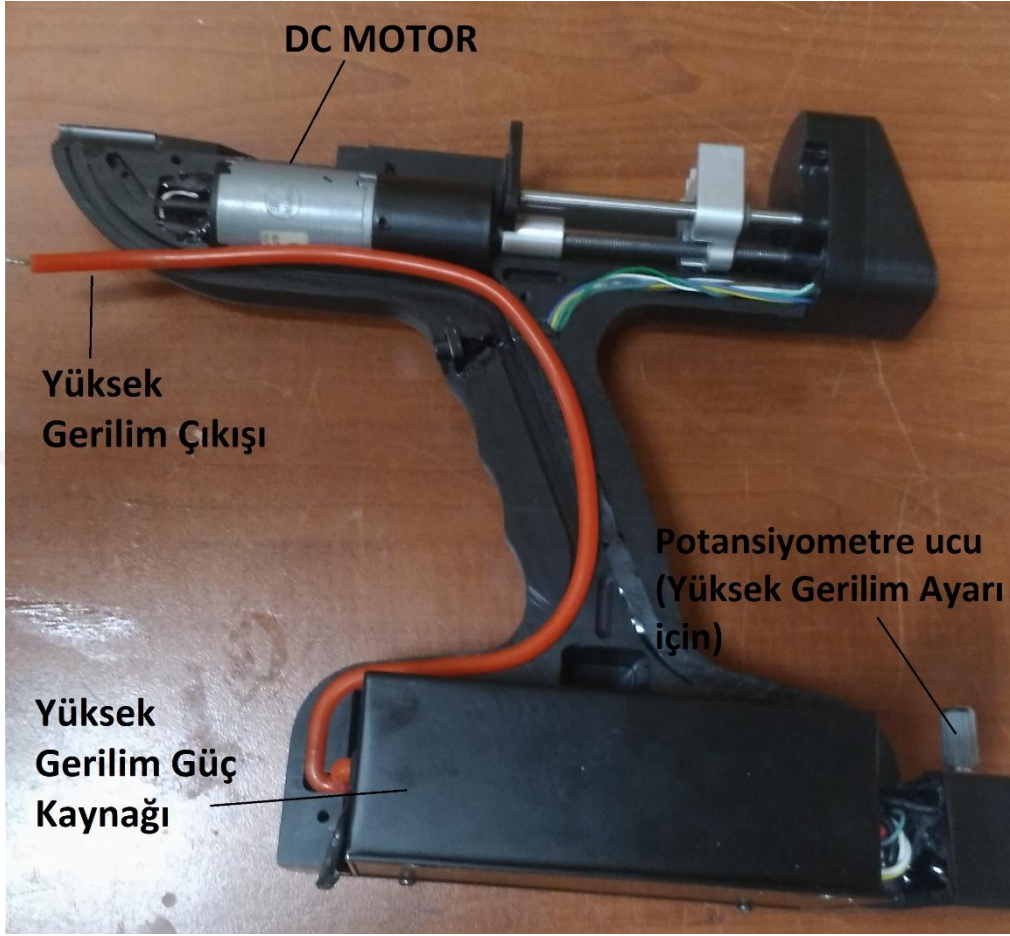
**Şekil 5.22** Enjekte edilecek sıvıların birleştiği parça (Mikroçip)

Şekil 5.23’de elektroğirme spray tabanca kabzasının TriBot firmasından temin edilen fiziksel parçaları gösterilmektedir.



**Şekil 5.23** Cihaz kabzasının parçaları

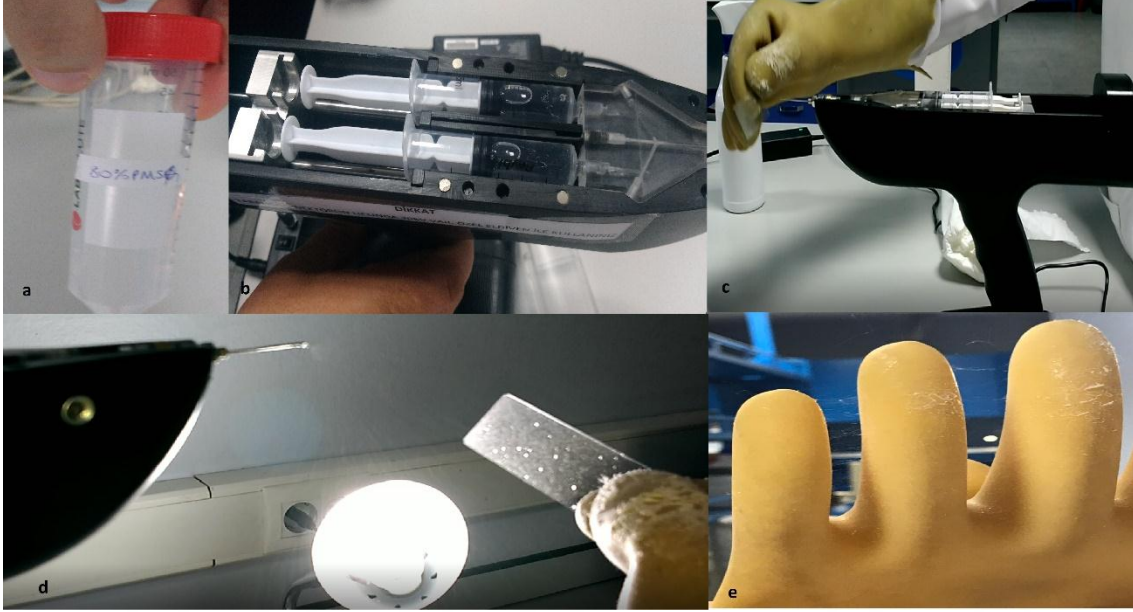
Elektronik donanımların cihaz kabzasına monte edildikten sonraki görünümü Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24 Cihazın iç görünümü

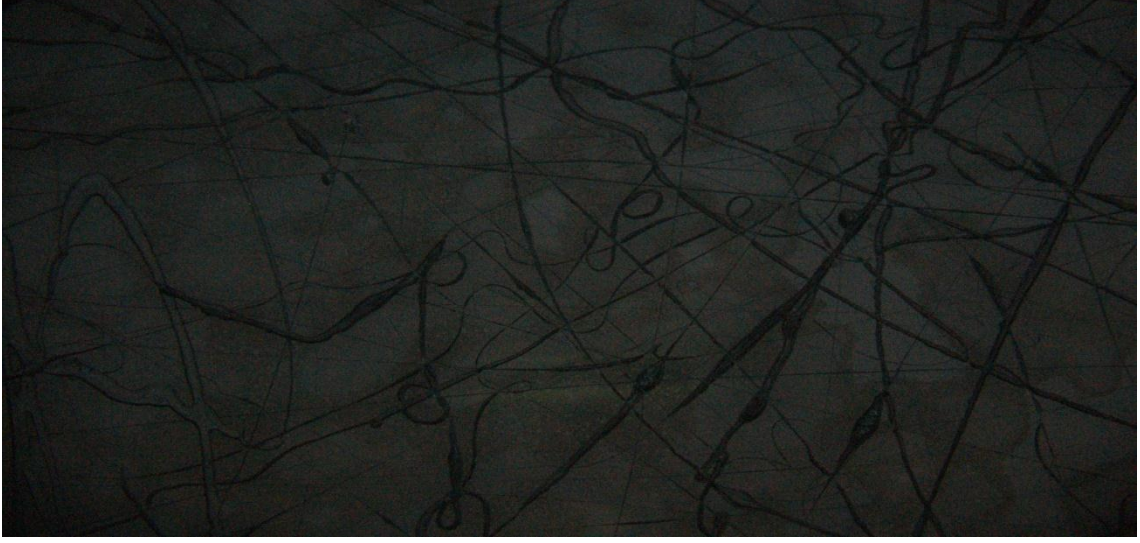
## 6. ÜRETİLEN SİSTEMDE GERÇEKLEŞTİRİLEN DENEMELER

Üretilen elektroegirme sprej tabancası ile gerçekleştirilen denemelerde farklı çözelti solüsyonları ile denemeler yapılmış, üretilen nano liflerin optik mikroskop ve SEM görüntüleri alınmıştır. Yapılan deneylerde püskürtme işlemi lameller ve eldiven üzerinde gerçekleştirilerek nano lif yüzeyinin birikmesi gözlemlenmiştir (Şekil 6.1).



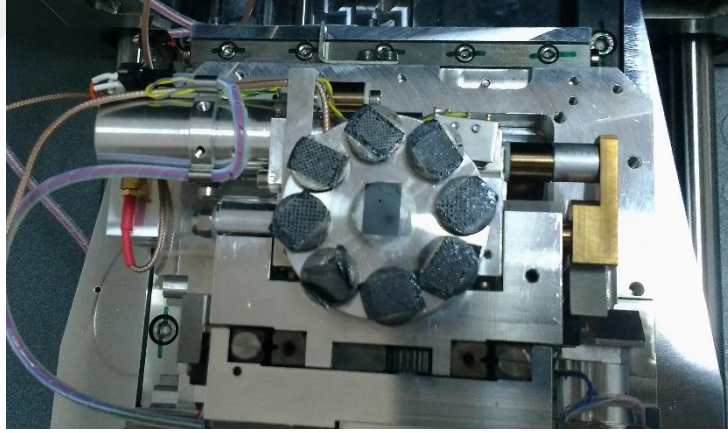
**Şekil 6.1** Elektro egirme işlem denemeleri **a.)** Ağırılıkça %80 PMSQ çözelti solüsyonu **b.)** Çözeltinin cihaza entegre edilmesi **c.)** Elektro egirme işleminin lamel üzerine denemesi **d.)** Telefon Kamerası ile görüntülenen elektro egirme işlemi **e.)** Elektro egirme işleminin eldiven üzerine uygulanması ile oluşan nano lif ağı

Çözücüsü diklorometan olan ağırılıkça %8 PCL çözelti solüsyonu iki tane 5 ml'lik şırınga pompasına çekilerek elektro egirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında yüksek gerilim 9 KV'ta tutulmuş ve deney sonucunda lameller üzerinde biriken nano lifli yüzeyin optik mikroskop görüntüsü alınmıştır (Şekil 6.2).



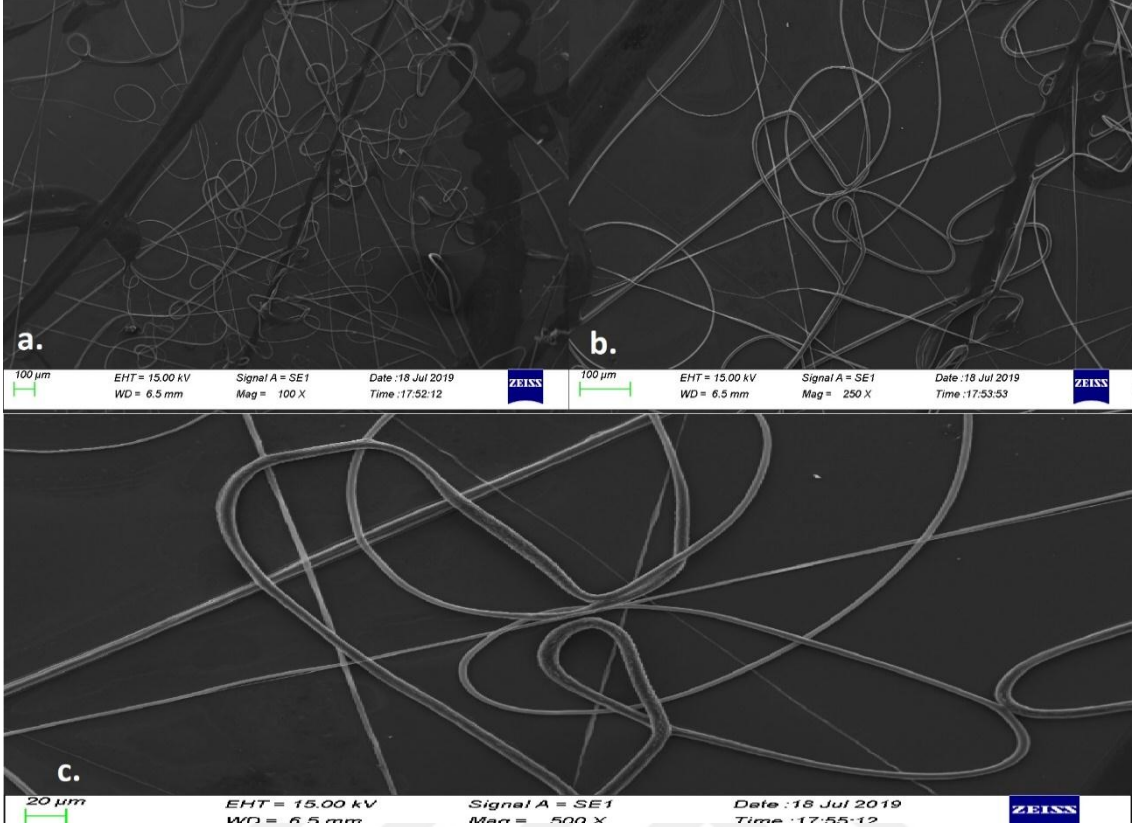
**Şekil 6.2** PCL çözeltisinden elde edilen bir nano lifli yüzeyin optik mikroskoptaki görüntüsü

Lameller daha sonrasında küçük parçalara ayrılarak küçük numunelere ayrıldı ve Quorum marka altın kaplama cihazıyla kaplanarak SEM görüntülenmesine hazır hale getirildi (Şekil 6.3).



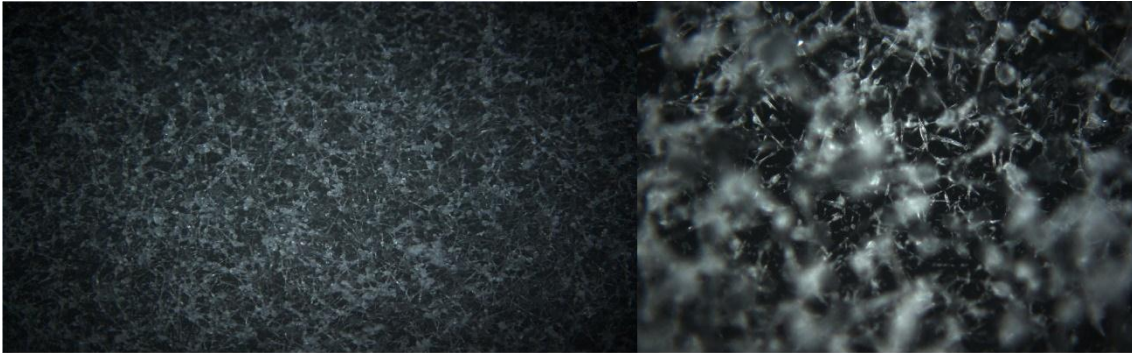
**Şekil 6.3** SEM görüntülenmesine hazır numuneler

Zeiss evo 10 marka/model taramalı elektron mikroskobunda 15 kV yüksek gerilim altında alınan 100 kat, 250 kat ve 500 kat yakınlaştırma ile alınan görüntüler Şekil 6.4'te verilmiştir.



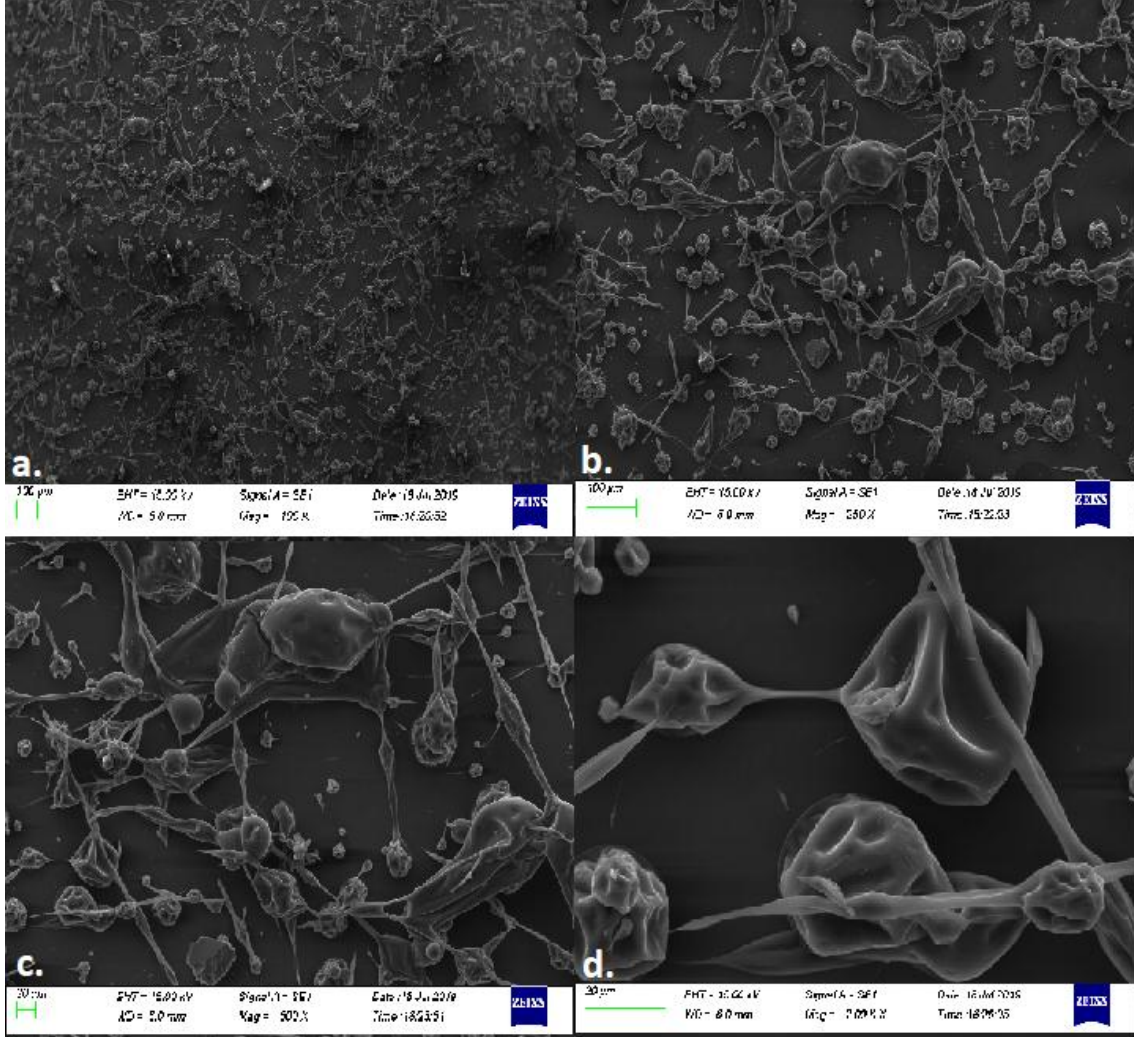
**Şekil 6.4** PCL çözelti solüsyonundan elde edilen nanolifli yüzeyin SEM görüntüleri a.) 100 kat yakınlaştırma ile görüntüleme b.) 250 kat yakınlaştırma ile görüntüleme c.) 500 kat yakınlaştırma ile görüntüleme

Çözücüsü ethonol olan ağırlıkça %80 PMSQ çözelti solüsyonu ile iki tane 5 ml'lik şırınga pompasına çekilerek elektro eğirme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deney sırasında yüksek gerilim değeri 13 kV'ta tutulmuştur. Deney sonucunda lameller üzerinde biriken nano lifli yüzeyin optik mikroskop görüntüsü Şekil 6.5'te verilmiştir.



**Şekil 6.5** PMSQ çözeltisinden elde edilen bir nano lifli yüzeyin optik mikroskoptaki görüntüleri

Polidimetilsiloksan (PMSQ) olarak adlandırılan polimer ile hem partikül hem de lif olarak üretim yapılabilmektedir. Zeiss evo 10 marka/model taramalı elektron mikroskopunda 15 kV yüksek gerilim altında alınan 100 kat, 250 kat, 500 kat ve 200 kat yakınlaştırma ile alınan görüntüler Şekil 6.6'da verilmektedir.



**Şekil 6.6** PMSQ çözelti solüsyonundan elde edilen nanolifli yüzeyin SEM görüntüleri **a.)** 100 kat yakınlaştırma ile görüntüleme **b.)** 250 kat yakınlaştırma ile görüntüleme **c.)** 500 kat yakınlaştırma ile görüntüleme **d.)** 2000 kat yakınlaştırma ile görüntüleme

## 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada biyomedikal uygulamalar için tasarlanan taşınabilir elektroğirme cihazının tasarımına, üretilmesine ve cihazda gerçekleştirilen denemelere yer verilmiştir. Cihaz elektroğirme sistem gerekliliklerini karşılamakta olup projenin ilerleyen aşamalarında geliştirilebilir. Cihaz taşınabilir bir sistemin gerekliliğini sağlamak adına ergonomik olarak tasarlanmış ve büyüklüğü el matkabı boyutlarında tutulmaya çalışılmıştır. Yüksek gerilim ile üretilen statik gerilimin elektro eğirme tabancasının bileşenlerine zarar vermemesi amacıyla izolasyon, trafo koruması ile sağlanmıştır. Aynı zamanda sistem 30 kV'a kadar yüksek gerilim üretebilme özelliğine sahiptir. Cihaz farklı yüksek gerilim değerlerinde denenmiş olup yüksek gerilimin açık kalma sürelerine göre ısınma problemleri ile karşılaşılmamıştır. Ancak elektroğirme işlemi için seçilen 30 kV'a kadar çıkış verebilen yüksek gerilim güç kaynağının ağırlığı ve eklenen izolasyon trafosunun ağırlığından dolayı cihaz uzun süreli kullanımlar için uygun olmayabilir. Bu yüzden daha hafif bir taşınabilir elektro eğirme sprey tabancası üretimi için cihaz, mini yüksek gerilim modülleriyle yeniden tasarlanabilir. İlerleyen çalışmalarda cihaza lazer mesafe ölçüm sensörü eklenerek atış yapılacak yüzeye hem odaklanma sağlanıp hem de mesafeye göre kullanılan sıvı miktarı, yüksek gerilim değerlerinin karşılaştırmalı verileri okunması sağlanabilir. Aynı zamanda daha gelişmiş kullanımlar için kontrol kartına entegre edilmiş MODBUS RTU protokolü aktif edilerek cihaza dış dünyayla haberleşme imkânı vererek cihazın çalışma süreleri, püskürtülen sıvı miktarları, proses süreleri gibi izlenmek istenilen değişkenler dış ortama aktararak cep telefonu, bilgisayar gibi aygıtlarda izlenebilir.

Cihazda ilerleyen aşamalarda ilaç salınımı gerçekleştirilmek istendiğinden cihaz iki şırınga pompasını ve bu şırınga pompalarından çıkan polimer çözeltilerini birleştiren mikroçipi barındırmaktadır. Ancak cihazda yapılan denemeler sırasında, cihazın mekanik kısmını oluşturan mikroçipin polimer çözeltisi ile tıkanıdığı ve farklı tip çözücü denemelerinde ise polimer çözeltisinin mikroçipi erittiği gözlemlenmiştir. Bu da cihazın polimer çözeltisi ile etkileşime girmeyecek malzemeden yapılmasını gerekli kılmıştır. Aynı zamanda yapılan denemelerde cihazın ml/dak ayarı 1.00'da tutulmasına rağmen elektro eğirme işlemi çok hızlı gözlemlenmiştir. Bu da polimer çözeltisinin daha hassas enjekte edilmesi için cihaz yazılımının güncellenmesini gerektirmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] <https://www.nano.gov/> erişim tarihi (22.07.2019)
- [2] <https://nanomedicine.mit.edu/> erişim tarihi (22.07.2019)
- [3] <http://ndaschakladar.blogspot.com/2011/03/carbon-fibre-vs-human-hair.html> erişim tarihi (22.07.2019)
- [4] <http://www.trynano.org/> erişim tarihi (22.07.2019)
- [5] <https://www.science.org.au/curious/> erişim tarihi (22.07.2019)
- [6] Hulla J.E., Sahu S.C., Hayes A.W. (2015), Nanotechnology: History and Future, Human and Experimental Toxicology, 34(12), 1318–1321.
- [7] Subedi S.K. (2013), An Introduction to Nanotechnology and Its Implications, The Himalayan Physics, 4(4).
- [8] Zarzycki A. (2014), At Source Of Nanotechnology, Tecno Lógicas, 17(32).
- [9] Taniguchi N. (1974), On The Basic Concept of Nano-Technology, Proceedings of the International Conference on Production Engineering, 18-23.
- [10] Kürkçüoğlu I., Köroğlu A., Özkır S.E., Ateş M. (2014), Nanoteknoloji Kavramı ve Dış Hekimliğindeki Uygulamaları, SDÜ Sağlık Bilimleri Dergisi, 5(2).
- [11] Alagarasi A. (2011), Introduction to Nanomaterials, Indian Institute of Technology Madras.
- [12] <https://www.iso.org/obp/ui/#home> erişim tarihi (22.07.2019)
- [13] <https://www.safenano.org/> erişim tarihi (22.07.2019)
- [14] Ren C. (2013), Pan Nanofibers And Nanofiber Reinforced Composites, M.S., University Of Nebraska.
- [15] <https://www.niehs.nih.gov/> erişim tarihi (22.07.2019)
- [16] Wu X. (2003), Fracture of Advanced Polymer Composites with Nanofiber Reinforced Interfaces, Phd Dissertation, University of Nebraska.

- [17] Wen Y. (2004), Novel Continuous Carbon and Ceramic Nanofibers and Nanocomposites, Phd Dissertation, University of Nebraska.
- [18] Ren X. (2007), Nanomanufacturing and Analysis of Novel Continuous Ferroelectric PVDF and P(VDF-TrFE) Nanofibers, Phd Dissertation, University of Nebraska.
- [19] Kenry, Lim C. T. (2017), Nanofiber Technology: Current Status and Emerging Developments, Progress in Polymer Science, 70, 1-17.
- [20] Ramakrishna S., Fujihara K., Teo W.E., Yong T., Ma Z., Ramaseshan R. (2006), Electrospun Nanofibers: Solving Global Issues, Materialstoday, 9(3).
- [21] Kozanođlu G.S. (2006). Elektrosinning Yöntemiyle Nanolif Üretim Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [22] Ifuku S., Nogi M., Yoshioka M., Morimoto M., Yano H., Saimoto H. (2010), Fibrillation of Dried Chitin into 10-20 nm Fibers by a Simple Grinding Method under Acidic Conditions, Carbohydrate Polymers, 81(1), 134-139.
- [23] Süpüren G., Kanat Z.E., Çay A., Kırıcı T., Gülümser T., Tarakçiođlu I. (2007), Nano Lifler, Tekstil ve Konfeksiyon.
- [24] Yener F. (2010), Klasik ve İğnesiz Elektrosinning Yöntemleriyle Elde Edilen Nano Liflerin Kıyaslanması ve Bu Yöntemlerdeki Sistem Parametrelerinin Lif Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Kahramanmaraş.
- [25] Drean J.Y., Harzallah O. (2016), Variance Analysis and Autocorrelation Function for 2D Fiber Lap Statistical Analysis, Intech Open..
- [26] Bhat G. (2015), Meltblown Submicron Fibers for Filter Media and Other Applications, International Fiber Journal.
- [27] Demir A., Oruç F. (2004), Polimer Esaslı Nanoliflerin Üretimi, Tekstil Araştırma Dergisi, 2, 28-30.
- [28] <http://www.hillsinc.net/> erişim tarihi (23.07.2019)

- [29] Dahiya A., Kamath M. G., Hedge R.R., Huang H.Y., Gao X. (2004), Spunbond Technology.
- [30] Malkan S. R., Wadsworth L. C. (1992), a Review on Spunbond Technology, Part I, INB, Nonwovens, 3, 4-14.
- [31] <https://nptel.ac.in/> erişim tarihi (23.07.2019)
- [32] Wilhelm A., Hilmer F. Walter K. (2002), Nonwoven Fabrics; Raw Materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes.
- [33] Smorada R. (1992), Spunbonding Characteristics, Applications, Technologies, Spunbond Technology, 2,17-33.
- [34] <https://www.petsabond.com/> erişim tarihi (23.07.2019)
- [35] <http://www.kehuannonwoven.com/> erişim tarihi (23.07.2019)
- [36] Naeimirad M., Zadhoush A., Kotek R., Neisiany R.E., Khorasani S.N., Ramakrishna S. (2018), Recent Advances in Core/Shell Bicomponent Fibers and Nanofibers: A review, Journal of Applied Polymer Science.
- [37] Kikutani T., Radhakrishnan J., Arikawa S., Takaku A., Okui N., Jin N., Niwa F., Kudo Y. (1996), High-Speed Melt Spinning of Bicomponent Fibers: Mechanism of Fiber Structure Development in Poly (ethylene terephthalate)/ Propylene System, Journal Applied Polymer Science, 62(11), 1913-1924.
- [38] Tucker N., Stanger J.J. , Staiger M.P.,Razzaq H., Hofman K. (2012), The History of the Science and Technology of Electrospinning from 1600 to 1995, Journal Of Engineered Fibers and Fabrics.
- [39] Gilbert W. (1600), De Magnete Magnetisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure.
- [40] Nascimento M. L. F., Araujo E. S., Cordeiro E. R., Oliveira A. H. P., Oliveira H. P. (2015), A Literature Investigation about Electrospinning and Nanofibers: Historical Trends, Current Status and Future Challenges, Recent Patents on Nanotechnology, 9(2).
- [41] <https://www.nobelprize.org/> erişim tarihi (23.07.2019)

- [42] Andradý A.L. (2008), Science and Technology of Polymer Nanofibers.
- [43] Cooley J. F. (1900), Improved Methods of and Apparatus for Electrically Separating the Relatively Volatile Liquid Component from the Component of Relatively Fixed Substances of Composite Fluids.
- [44] Zelený J. (1914), The Electrical Discharge from Liquid Points, and a Hydrostatic Method of Measuring Electrical Intensity at Their Surfaces, *The Physical Review*, 3, 69- 91.
- [45] Zelený J. (1914), On the Conditions of Instability of Electrified Drops, with Applications to the Electrical Discharge from Liquid Points. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society: Mathematical and Physical Sciences*, 71-83.
- [46] Zelený J. (1917), Instability of Electrified Liquid Surfaces, *The Physical Review*, 10, 1-6.
- [47] Zelený J. (1920), Electrical Discharges from Pointed Conductors, *The Physical Review*, 16, 102-25.
- [48] Chun I. (1995), Fine Fibers Spun by Electrospinning Process From Polymer Solutions and Polymer Melts in Air and Vacuum: Characterization of Structure and Morphology on Electrospun Fibers and Developing a New Process Model, Phd Thesis, University of Acron.
- [49] Formhals A. (1934), Process and Apparatus for Preparing Artificial Threads, US Patent 1,975,504.
- [50] Göktepe F., Mülayim B.B. (2015), Elektrik Alan Lif Çekimi (Elektrospinning) ile Nano Liflerden İplik Üretim Yöntemleri, *Tekstil ve Mühendis*, 22(99).
- [51] Subbiah T., Bhat G.S., Tock R.W., Parameswaran S., Ramkumar S.S. (2005), Electrospinning of Nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 96, 557-569.
- [52] Formhals A. (1943), Artificial Fibers From Forming Liquids, US Patent 2,323,025.
- [53] Taylor G. I. (1969), Electrically Driven Jets, 313, 453-476.
- [54] Buchko C. J., Chen L. C., Yu, S., Martin, D. C. (1999), *Polymer*, 40 (26),7397-7407.

- [55] Zıǧal N. (2012), Nanolif Kaplı Kuvars Kristal Mikroterazi Yüzeyley ile Kütleye Hassas Biyosensörlerin Performanslarının Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- [56] Mohan A. (2002), Formation and Characterization of Electrospun Nonwoven Webs, Master Thesis, The Graduate Faculty of North Carolina State University.
- [57] Taylor G.I. (1964), Disintegration of Water Drops in an Electric Field, 383.
- [58] Baumgarten P. K. (1971), Electrostatic spinning of acrylic microfibers, Journal of Colloid and Interface Science, 36(1), 71-79.
- [59] Wang Y., Yang Q., Shan G., Wang C., Du J., Wang S., Li Y., Chen X., Jing X., Wei Y. (2005), Preparation of Silver Nanoparticles Dispersed in Polyacrylonitrile Nanofiber Film Spun by Electrospinning, Materials Letters, 59(24-25), 3046-3049.
- [60] How T.V. (1985), Synthetic Vascular Grafts and Methods of Manufacturing Sucg Grafts, US Patent 4,552,707.
- [61] Doshi J., Reneker D. H. J. (1995), Electrospinning Process and Application of Electrospun Fibers, Journal of Electrostatics, 35, 151-160.
- [62] Reneker D.H, Chun L. (1996), Nanometre diameter Fibres of polymer, Produced by Electrospinning, Nanotechnology, 7(3), 216–223.
- [63] <http://www.nanodev.com.tr/> erişim tarihi (23.07.2019)
- [64] Kurečić M., Smole M. S. (2013), Electrospinning: Nanofibre Production Method, Tekstilec, 56(1),4-12.
- [65] Deitzel J. M., Kleinmeyer J., Harris D., Beck Tan N.C. (2001), The Effect Of Processing Variables On The Morphology Of Electrospun Nanofibers And Textiles, Polymer, 42 (1), 261-272.
- [66] Lu J. W., Zhu Y. L., Guo Z. X., Hu P., Yu J. (2006), Electrospinning Of Sodium Alginate With Poly (Ethylene Oxide), Polymer, 47 (23), 8026-8031.
- [67] ÖZDOĞAN E., DEMİR A., SEVENTEKİN N. (2006), Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları (Bölüm 2), Tekstil Mühendisliği Bölümü, Ege Üniversitesi, İzmir.

- [68] Karakaş H., Electrospinning Of Nanofibers And Their Applications, MDT Electrospinning.
- [69] Bhardwaj N., Kundu S.C. (2010), Electrospinning: a Fascinating Fiber Fabrication Technique, Biotechnology Advances, 28, 325-347.
- [70] Khan S. N. (2007), Electrospinning Polymer Nanofibers-Electrical and Optical Characterization.
- [71] SİRİN Ş., Suat ÇETİNER S., SARAÇ A.S., Elektro Çekim Yoluyla Polimer Nanolifler: Nanolif Kalitesini Etkileyen Faktörler.
- [72] Sautter, Brian P., Continuous Polymer Nanofibers Using Electrospinning
- [73] Üstündağ G. Ç., Karaca E., Poli (Vinil Alkol)/Sodyum Alginat Karışımlarından Elektro Çekim Yöntemi İle Elde Edilen Nanolifli Yüzeylerin İncelenmesi.
- [74] Zeytuncu B. (2014), Elektrospinning Tekniği ve UV Işımasının Eşzamanlı Olarak Uygulanması ile Nanofiber Membranların Hazırlanması ve Kıymetli Metallerin 78 Adsorpsiyonunda Uygulanması, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-129.
- [75] Söylemez E., Polivinil Alkol-Polietilenimin (Pva-Peı) Kompozit Nanoliflerin Elektrospınleme Yöntemi İle Üretimi, Karakterizasyonu Ve Çeşitli Kullanım Alanlarına Uygulanması.
- [76] Celep Ş. (2007), Nanoteknoloji ve Tekstilde Uygulama Alanları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [77] Gümüş T., Demir A. (2009), Elektrospinning Yöntemiyle Polimerik Nanolif Membran Tasarımı Ve Endüstriyel Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [78] Üstün A. (2011), Hava Filtrasyonu İçin Nanolif Üretimi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli
- [79] ERDAL M. O. (2013), Elektrospin Yöntemiyle Termoelektrik Nano Yapılar Üretimi ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya.

- [80] Basson N. (2014), Free Volume Of Electrospun Organic-İnorganic Copolymers, Stellenbosch University.
- [81] Sill T.J., Recum H.A.V. (2008), Electrospinning: Applications İn Drug Delivery And Tissue Engineering, *Biomaterials*, 29(13), 1989–2006.
- [82] Garg K., Bowlın G.L. (2011), Electrospinning jets and nanofibrous structures, *Biomicrofluidics*, 5(1), 13403.
- [83] Burger C., Hsiao B.S., (2006), Nanofibrous Materials and Their Applications, *Annual Review of Materials Research*, 36(1), 333-368.
- [84] Üstündağ G.C. (2009), Elektrospinning Yöntemi ile Biyomedikal Kullanımına Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-181.
- [85] Reneker D.H, Yarin A.L, Fong H, Sureporn K. (2000), Bending İnstability Of Electrically Charged Liquid Jets Of Polymer Solutions İn Electrospinning, 87,4531–47.
- [86] Shin Y.M., Hohman M.M., Brenner M.P., Rutledge G.C., (2001), Experimental Characterization Of Electrospinning: The Electrically Forced Jet And İnstabilities, *Polymer*, 42, 9955–67.
- [87] Frenot A., Chronakis I.S. (2003), Polymer Nanofibres Assembled By Electrospinning, *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 8 (1), 64–75.
- [88]. Hohman M.M., Shin M., Rutledge G. (2001), Electrospinning And Electrically Forced Jets. Stability Theory, *Phys Fluids*, 13, 2201–20.
- [89] Angamma C.J., Jayaram S.H. (2011), A Theoretical Understanding Of The Physical Mechanisms Of Electrospinning, *Proceedings of ESA Annual Meeting On Electrostatics*, 1-9.
- [90] Theron S.A., Yarin A.L., Zussman E., Kroll E. (2005), Multiple Jets İn Electrospinning: Experiment And Modeling, *Polymer*, 46, 2889–99.
- [91] Reneker D.H., Kataphinan W., Theron A., Zussman E., Yarin A.L. (2002), Nanofiber Garlands Of Polycaprolactone By Electrospinning, *Polymer*, 43, 6785–94.

- [92] Greiner A., Wendorff J.H. (2007), Electrospinning: A Fascinating Method For The Preparation Of Ultrathin Fibres, *Angewandte Chemie*.
- [93] Hamzeh S., Miraftab M., Yoosefinedaj A. (2013), Study of Electrospun Nanofiber Formation Process and their Electrostatic Analysis, *Journal of Industrial Textiles*.
- [94] Huang Z.M., Zhang Y.-Z., Kotaki M., Ramakrishna, S. (2003), A review on polymer nanofibres by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites Science and Technology*, 63, 2223–2253.
- [95] [http://mugul.xyz/buhler/Gear\\_Motor\\_31x100\\_106\\_88\\_1.61.077.4XX.pdf](http://mugul.xyz/buhler/Gear_Motor_31x100_106_88_1.61.077.4XX.pdf) erişim tarihi (23.07.2019)
- [96] <https://www.direnc.net/128x64-0-96-inch-oled-grafik-ekran-spi> erişim tarihi (23.07.2019)
- [97] <https://circuitdigest.com/article/ssd1306-oled-display> erişim tarihi (23.07.2019)
- [98] <https://www.kartalotomasyon.com.tr/class/INNOVAEditor/assets/adaptorpdf/MS6024.pdf> erişim tarihi (23.07.2019)
- [99] <http://www.analogtechnologies.com/document/AHV24V30KV1MAW.pdf> erişim tarihi (23.07.2019)

## ÖZGEÇMİŞ

# CEYLİN EDA KARACAN

### KİŞİSEL BİLGİLER:

**Cinsiyet** : Kadın

**Uyruk** : T.C.

**Sürücü Belgesi:** B/A2

### İŞ DENEYİMİ:

2018- : TKDK (Uzman)

### EĞİTİM BİLGİLERİ:

2016- : Marmara Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Tezli Yüksek Lisans

2010-2015 : Ondokuz Mayıs Üniversitesi/Mühendislik Fakültesi/  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

2005-2009 : Canik İmkb Anadolu Lisesi

### KURS / SERTİFİKA BİLGİLERİ:

London Twin English Centre 'English Language Training Programme' Intermediate Seviye Dil Sertifikası

London Englishhouse Stage 5 of the Callan Method Dil Sertifikası

Atakum Halk Eğitim Merkezi MS Office Programları Sertifikası

Elektrik Mühendisliği Odası 'C ile Pic Programlama' Kursu

TTNET 'Geleceğini Netleştir' Sertifikası

TEGV gönüllü İletişim Eğitimi ve TEGV'DE Öğrenme Yaklaşımları ve Modelleri Eğitim Sertifikaları

Savunma Sporları 6.Derece Öğrenci Seviye Sertifikası

Gazi Belediyesi ve İlkadım Gençlik Merkezi Türk Halk Müziği Koro Çalışmaları

### BİLGİSAYAR BİLGİSİ:

Autocad, Fortran, Arduino, C, Matlab, Multisim, Isis-Ares, Pic, MS Office Programları

### YABANCI DİL BİLGİSİ:

**İngilizce:** YDS : 75 (2016)

### HOBİLER:

Bağlama ve gitar çalmak, savunma sanatı, yüzmek, basketbol oynamak, resim çizmek, fotoğraf çekmek, bisiklet sürmek