

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTROSTATİK EĞİRME SİSTEMİ TASARIMI VE
NANOLİF ÜRETİMİ

OKAN KARATAY

DOKTORA TEZİ

2012

**ELEKTROSTATİK EĞİRME SİSTEMİ TASARIMI VE
NANOLİF ÜRETİMİ**

**ELECTROSPINNING SYSTEM DESIGN AND NANOFIBER
PRODUCTION**

OKAN KARATAY

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ELEKTRİK-ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
DOKTORA TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2012

“Elektrostatik Eğirme Sistemi Tasarımı ve Nanolif Üretimi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 01/06/2012 tarihinde, **ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Adnan KÖKSAL

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Üye : Doç. Dr. Hasan OĞUL

Üye : Doç. Dr. Hamit ERDEM

Üye : Yrd. Doç. Dr. Cengiz KOÇUM

ONAY

....../....../.....

Prof. Dr. M. Emin AKATA
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

TEŐEKKÖR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa DOĞAN'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Yrd. Doç. Dr. Cengiz KOÇUM'a, laboratuvar çalışmalarını birlikte yürüttüğüm araştırma görevlisi Tansel UYAR'a, birçok teknik konuda bana sonsuz yardımları olan babam Süleyman KARATAY ve çalışma arkadaşım Erkan KÖK'e, ayrıca manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli eşim Sevgi ERTUĞRUL KARATAY ve tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZ

ELEKTROSTATİK EĞİRME SİSTEMİ TASARIMI VE NANOLİF ÜRETİMİ

OKAN KARATAY

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrostatik Eğirme tekniği ile nano lif üretimi polimer jet'inin (çözeltisinin) yüksek gerilim altında toplayıcı plakaya doğru hareketi ile gerçekleşmektedir. Polimer, kompozit ve metal nano lif gibi çok çeşitli malzemeler bu yöntemle işlenebilmektedir. Nano fiber oluşumundaki en önemli engel polimer jetinin kaotik hareketinin yol açtığı kararsızlık olgusudur.

Bu çalışmada, sonlu uzunluktaki içi boş silindirik plaka ve paralel düzlemsel elektrotlar kullanılarak oluşturulan ikincil elektrik alanlar yardımıyla, polimer jetinin kaotik saçılımının bastırılması ve düzenli fiber elde edilebilirliği araştırılmıştır. Çalışmanın ilk adımında standart eğirme sistemi modeli oluşturulmuş ve elektrik alan ifadesi çıkarılan silindirik elektrot ile bütünleştirilmiştir. İkinci aşamada kurgulanan sistem modeli bilgisayar benzetimleri ve deneysel sonuçlar kullanılarak karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Son adımda paralel elektrotlar üzerinde zaman bağlı değişen bir elektrik alan oluşturularak toplayıcı plaka üzerinde düzenli nano fiber ağ diziliminin elde edilebilirliği araştırılmıştır.

Çalışma sonucunda, sonlu uzunluktaki silindirik elektrot üzerinde oluşan ikincil elektrik alanın, toplayıcı plaka üzerinde oluşan fiber ağ yapısı saçılımını önemli oranda azalttığını göstermiştir. Deneysel sonuçlar ve bilgisayar benzetimleri ile uyumlu sonuçlar vermiştir. Paralel elektrotlar kullanılarak oluşturulan zamana bağlı değişen elektrik alan yardımıyla düzenli ağ dizilimi elde edilmiştir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Nano dokuma, lif, polimer, düzenli ağ, saçılım

DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Mustafa Doğan, Doğu Üniversitesi, Kontrol Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

ELECTROSPINNING SYSTEM DESIGN AND NANOFIBER PRODUCTION

OKAN KARATAY

Başkent University Institute of Science

Department of Electrical-Electronics Engineering

In electrospinning process nano structured solid fibers are produced from charged polymer jet oriented at external electrostatic field. Materials such as polymer, composites and tissue scaffold fibers have been fabricated with electrospinning techniques. The typical obstacle of electrospun fiber production is the whipping instability resulted from the chaotic oscillation of polymer jet.

In this study, feasibility of suppressing the whipping instability is analyzed and explained with a mathematical model based for the secondary electrostatic field created by finite length hollow cylinder. Additionally, parallel plate conducting electrodes are applied through the jet trajectory in order to investigate the possibility of controlled deposition of polymer fibers. Parallel electrodes are driven to generate a time-varying steering field for manipulating the fiber mat formation at the collector plate.

It is shown that the three-dimensional path of polymer jet calculated by computer simulations based on the application of finite length hollow cylinder focus the characteristic spot size of the deposited electrospun fiber to a smaller diameter which is coherent to the experimental observations. Moreover electrospun polymer fibers accumulated in a controlled fashion at the collector with the modulated electric field.

KEYWORDS: Fibers, nanofabrication, polymers, deposition.

SUPERVISOR: Asst. Prof. Dr. Mustafa Doğan, Doğuş University, Department of Control Engineering.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZ.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
1.GİRİŞ.....	1
1.1 Elektrostatik Eğirme ile Nano Lif Üretim Teknikleri.....	3
1.2 Problem Tanımı.....	7
1.3 Çalışmanın İçeriği.....	9
1.4 Elektrostatik Eğirme Sistemi ile Denetlenebilir Nano Lif Sentezi	10
Üzerine yapılan çalışmalar.....	
1.4.1 PEO (Poli-etilen Oksit) ile yarı-kontrollü fiber sentezi.....	10
1.4.2 Yardımcı elektrotlar kullanılarak nano lif üretimi.....	13
1.4.2.1 <u>Polimer jet'in kaotik hareketinin bastırılması</u>	14
1.4.2.2 <u>Paralel elektrotlar yardımı ile fiber lif oluşumunun</u>	
<u>kontrol edilmesi</u>	16
1.4.3 Odaklayıcı ve yönlendirici alanlar yardımı ile Elektrostatik Eğirme	
sisteminin kaotik hareketinin bastırılma çalışmaları.....	19
1.4.4 Hareketli ve farklı gerilim ile kutuplanan toplayıcı plakalar yardımıyla	
saçılımı azaltılmış fiber sentezi.....	22
2. ELEKTROSTATİK EĞİRME DÜZENEĞİ TASARIMI	25
2.1 Mekanik Tasarım.....	25
2.2 Elektronik Bölümler.....	28
2.2.1 Doğrultma bölümü.....	28
2.2.2 Kontrol kartı bölümü.....	29
2.2.3 Güç kartı bölümü.....	31
2.2.4 Yüksek gerilim bölümü.....	32
2.3 Sistem Kurulumu.....	33
3. ELEKTROSTATİK EĞİRME TEKNİĞİNİN MODELLENMESİ.....	35
3.1 Parçacık Yapısının Modellenmesi.....	35
3.1.1 Kelvin-Voigt modeli.....	35
3.1.2 Maxwell Modeli.....	36
3.2 Kütle Korunumu.....	37
3.3 Momentum Korunumu.....	39

3.4 Yük Korunumu.....	40
3.5 Polimer Jetine Etki Eden Kuvvetler.....	41
3.6 Polimer Jetinin Üç Boyutlu Dinamiğinin Oluşturulması.....	43
3.7 Yardımcı Silindirik Elektrot Üzerinde Oluşan Elektrik Alan.....	45
3.7.1 Galerkin yöntemi.....	47
3.7.2 Silindirik levha üzerinde oluşan yük dağılımının Galerkin metodu ile çözümlenmesi.....	49
3.7.3 Silindirik levha üzerinde oluşan gerilim ve elektrik alan dağılımı..	53
3.8 Yardımcı Paralel Elektrotlar Üzerinde Oluşan Elektrik Alan.....	55
3.9 Tasarlanan Elektrostatik Eğirme Düzeneği Matematiksel Modeli.....	57
4. POLİMER JETİNİN BİLGİSAYAR BENZETİMİ.....	61
4.1 Sonlu Farklar Yöntemi.....	61
4.2 Benzetim Dinamiğinin Oluşturulması.....	63
4.3 Benzetim Sonuçları.....	65
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	69
5.1 Standart Elektrostatik Eğirme Sistemi Deneyleri.....	70
5.2 Tasarlanan Elektrostatik Eğirme Sistemi Deneyleri.....	71
5.2.1 Silindirik yardımcı elektrot kullanılarak gerçekleştirilen deneyler..	72
5.2.2 Paralel yardımcı elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneyler.	76
5.3 TEM görüntüleri.....	79
5.3.1 Tek yardımcı elektrot.....	79
5.3.2 Çift yardımcı elektrot.....	81
5.3.3 İkincil elektrot AC gerilim ile kutuplandığındaki SEM görüntüleri..	83
5.3.4 İkili paralel yardımcı elektrot.....	84
5.3.5 Dörtlü paralel yardımcı elektrot.....	85
6. SONUÇ.....	87
7. KAYNAKÇA.....	90
8.EK AÇIKLAMALAR.....	94
9.EKLER.....	98

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1 (a)Taylar Konisi, (b) Spiral hareket yapan polimer çözeltisi.....	2
Şekil 1.2 Elektrostatik Eğirme, Baumgarten	3
Şekil 1.3 Elektrostatik Eğirme, Martin et al.....	4
Şekil 1.4 Elektrostatik Eğirme, Srinivasan.....	5
Şekil 1.5 Elektrostatik Eğirme, Abvay.....	5
Şekil 1.6 Fiber lif çaplarının elektrik alan şiddeti ve polimer çözelti yoğunluğuna bağlı değişimi.....	6
Şekil 1.7 %25 derişime sahip polimer çözeltisine 21kV gerilim uygulandığında elde edilen fiber liflerinin SEM görüntüsü. Şırınga-merdane arası mesafe 21cm.....	7
Şekil 1.8 (a) Elektrostatik eğirme düzeneği (b), Nano liflerin SEM görüntüsü..	8
Şekil 1.9 19kV, 21cm şırınga-toplayıcı mesafesinden elde edilen nano lif yapısı.....	9
Şekil 1.10 Elektrostatik Eğirme Düzeneği Elektrik alan oluşumu.....	11
Şekil 1.11 Eş yüklü parçacıklar arasında oluşan elektrostatik kuvvet.....	11
Şekil 1.12 Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	12
Şekil 1.13 (a) Bakır halkalara 5kV gerilim uygulandığında 10cm yükseklikteki jet yapısı, (b) 2.5kV gerilim uygulandığında 10cm yükseklikteki jet yapısı.....	13
Şekil 1.14 Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	14
Şekil 1.15 (a) Elektrostatik eğirme düzeneği, (b) Silindirik yardımcı elektrot bulunan ve bulunmayan düzeneğe ait EAYF değerleri.....	15
Şekil 1.16 (a) Yardımcı elektrot kullanılarak oluşturulan elektrostatik eğirme düzeneği, (b) standart sistem sonucu oluşan fiber ağ yapısına ait spot büyüklüğü, (c) Yardımcı elektrot sonucunda elde edilen fiber ağ yapısı.....	16
Şekil 1.17 Paralel yardımcı elektrotlar ile oluşturulan elektrostatik eğirme sistemi ile sabit elektrik alan ve değişik frekans değerlerinde oluşturulan fiber dizilimleri (a),(b),(c).....	17

Şekil 1.18 Değişken frekans değerlerinde elde edilen Herman yönelim faktörü.....	17
Şekil 1.19 Elektrik alan içersindeki polarize fiberin şematik gösterimi.....	18
Şekil 1.20 (a) Şematik Elektrostatik eğirme düzeneği , (b) Düzenek fotoğrafı..	19
Şekil 1.21 Elektrostatik Eğirme polimer Jet yönlendirme düzeneği.....	20
Şekil 1.22 (a) Odaklama/Yönlendirme ile elde edilen fiber lif yapısı (1. elektronik düzenek) (b) 2. elektronik düzenek.....	21
Şekil 1.23 Elektrostatik eğirme yöntemi ile paralel diziliimli nano lif üretimi.....	22
Şekil 1.24 Elektrostatik eğirme sistemi.....	23
Şekil 1.25 Toplayıcı plakalar üzerinde elde edilen fiber çapları (a) germe işlemi uygulanmamış, (b) germe işlemi uygulanmış.....	24
Şekil 2.1 Elektrostatik Eğirme sistemi.....	26
Şekil 2.2 Güç kaynağı şematik diyagramı.....	28
Şekil 2.3 LM3524 devre şeması.....	30
Şekil 2.4 Kontrol ünitesi devre şeması.....	30
Şekil 2.5 Kompanzasyon girişindeki gerilim ile darbe-genişlik oranının değişimi.....	31
Şekil 2.6 Güç kartı bölümü.....	32
Şekil 2.7 Elektrostatik Eğirme Düzeneği.....	33
Şekil 3.1 Kelvin-Voight parçacığı.....	36
Şekil 3.2 Maxwell Parçacığı.....	37
Şekil 3.3 Polimer Jetine ait kesit alan.....	38
Şekil 3.4 Polimer Jetine ait kesit alandaki momentum korunum.....	39
Şekil 3.5 Visco-elastik parçacıklar.....	43
Şekil 3.6 İçi boş iletken silindirik plaka.....	45
Şekil 3.7 Galerkin yaklaşımı ile oluşturulan c_0 değerinin α 'ya bağlı değişimi..	52
Şekil 3.8 Galerkin yaklaşımı ile oluşturulan c_1 değerinin α 'ya bağlı değişimi..	53
Şekil 3.9 Normalize yüzey yük dağılımının $\alpha=10$ durumunda z/d 'ye bağlı olarak değişimi.....	53
Şekil 3.10 $\alpha = 5$ için silindirik levha üzerinde oluşan eş potansiyel eğrileri ve elektrik alan vektörleri.....	55
Şekil 3.11 Paralel levhalar arası oluşan elektrik alan dağılımı.....	56
Şekil 3.12 Elektrik alan şiddet ve doğrultusunun zaman bağlı değişimi.....	57

Şekil 3.13 Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	58
Şekil 4.1 Sonlu farklar yöntemi ile işlevin ayrıklaştırılması.....	62
Şekil 4.2 Benzetim algoritması şematik gösterimi.....	64
Şekil 4.3 50 parçacıklı, $V_0 = 10\text{kV}$, $h = 20\text{cm}$	66
Şekil 4.4 50 parçacıklı, yardımcı elektrotlu düzenek, $V_0 = 10\text{kV}$, $h = 20\text{cm}$	66
Şekil 4.5 Çift elektrotlu sistem (kırmızı) ile tek elektrotlu sistemin (mavi) x-y-z eksenlerinde karşılaştırılması.....	67
Şekil 4.6 X eksenindeki saçılma miktarı (Standart sistem~2.5cm, çift elektrotlu sistem 1cm).....	67
Şekil 4.7 Y eksenindeki saçılma miktarı (Standart sistem~2.5cm, Çift elektrotlu sistem 0.25cm).....	68
Şekil 5.1 Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	69
Şekil 5.2 a) PVA çözeltisine 12kV uygulanarak elde edilen fiber yapısı ($R=4.5\text{cm}$), b) SEM tarafından 4K büyütme ile oluşturulan ağ yapısına ait görüntü.....	70
Şekil 5.3 PEO çözeltisine 20kV uygulanarak elde edilen fiber yapısı ($R=8\text{cm}$).....	71
Şekil 5.4 Yardımcı elektrotlar kullanılarak oluşturulan Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	72
Şekil 5.5 Tek yardımcı elektrotlu Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	72
Şekil 5.6 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı. $h=0.5\text{cm}$ (PVA çözeltisi).....	73
Şekil 5.7 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı. $h=0.15\text{cm}$ (PVA çözeltisi).....	73
Şekil 5.8 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı, $h=2.1\text{cm}$ (PVA çözeltisi).....	74
Şekil 5.9 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı, $h=0.5\text{cm}$ (PEO çözeltisi).....	74
Şekil 5.10 Çift yardımcı elektrotlu Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	80

Şekil 5.11 İkili silindirik elektrot kullanılarak oluşturulan Nano lif yapısı ($R = 1.5cm$) $h_{birinci} = 0.5cm$ $h_{ikinci} = 3.5cm$ $V_1 = 12kV$, $V_2 = 6kV$ (PVA çözültisi).....	75
Şekil 5.12 Paralel yardımcı elektrotlu Elektrostatik Eğirme düzeneği.....	76
Şekil 5-13 Paralel elektrotlar sürücü katı.....	77
Şekil 5.14 İkili paralel elektrot ile PVA çözültisi kullanılarak elde edilen fiber ağ yapısı. ($h_{paralel} = 5cm$, $g_{paralel} = 10cm$).....	78
Şekil 5.15 İkili paralel elektrot ile PVA çözültisi kullanılarak elde edilen fiber ağ yapısı. ($h_{paralel} = 8cm$, $g_{paralel} = 11cm$).....	78
Şekil 5.16 Dörtlü paralel elektrot kullanılarak elde edilen fiber ağ yapısı PEO çözültisi, ($h_{paralel-1} = 6cm$, $h_{paralel-2} = 8cm$ $g_{paralel} = 11cm$).....	79
Şekil 5.17 Tek yardımcı elektrot ile ($h=0.15cm$) SEM görüntüsü.....	80
Şekil 5.18 Tek yardımcı elektrot ile ($h=0.5cm$) SEM görüntüsü.....	81
Şekil 5.19 İki yardımcı elektrot ile SEM görüntüsü, $h_{birinci} = 0.5cm$ $h_{ikinci} = 3.5cm$	82
Şekil 5.20 İki yardımcı elektrot ile 30.000X büyütme SEM görüntüsü.....	82
Şekil 5.21 İki yardımcı elektrot AC gerilim'le elde edilen TEM görüntüsü.....	83
Şekil 5.22 İkili paralel elektrot ile elde edilen TEM görüntüsü (2.400x büyütme).....	84
Şekil 5.23 İkili paralel elektrot ile elde edilen fiber çapları: $R_{ifiber} = 200 - 500nm$	85
Şekil 5.24 Dörtlü paralel elektrot ile elde edilen TEM görüntüsü (1.500x büyütme).....	86
Şekil 5.25 Dörtlü paralel elektrot ile elde edilen fiber çapları: $R_{ifiber} = 100 - 350nm$	86

ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 Polimer jetine etki eden kuvvetler.....	42
Çizelge 3.2 Tasarım modelinde polimer jetine etki eden kuvvetler.....	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

AKM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
EAYF	Elektrik Alan Yoğunlaşma Faktörü
PEO	Poli-etilen Oksit
PVA	Poli-vinil Alkol
TEM	Tarayıcı Elektron Mikroskobu
VTK	Veri Toplama Kartı
ω	Açısal Frekans
J	Akı
I	Akım
p	Basınç
K_T	Depolarizasyon Faktörü
ε_0	Dielektrik sabiti
μ	Dinamik Sürtünme
θ	Dönüş Açısı
E	Elektrik Alan
K	Elektriksel İletkenlik
V_0	Gerilim
σ	Gerilme
Hz	Hertz
v	Hız
a	İvme
k	Jet eğriliği
kV	Kilovolt
F	Kuvvet

m	Kütle
D	Materyal Türev
nf	Nanofarad
c_n	Sabit
λ	Sarsım Katsayısı
f	Sıklık
h	Şırınga Toplayıcı Plaka Arası Mesafe
c	Sürtünme Katsayısı
Q_T	Toplam Yük
T	Tork
ε	Uzama
L	Uzunluk Ölçütü
g	Yer Çekimi İvmesi
ρ	Yoğunluk
e	Yük
α	Yüzey Gerilimi

1. GİRİŞ

Günümüzde tekstil endüstrisinden ilaç endüstrisine kadar pek çok alanda kullanılmakta olan fiber yapılarının bulunuşu ve kullanımı tarih öncesi dönemlere kadar uzanmaktadır. İlk çağlardan bu yana insanın günlük yaşamında önemli bir yer tutan dokuma endüstrisinin doğması ve gelişmesinde fiber yapıların keşfi önemli bir yer teşkil etmiştir. Fiber ağları daha önceleri ipek böceği kozalağı gibi hayvansal kaynaklardan elde edilirken, bu tür yapıların doğal nedenlerden dolayı sınırlı işleme kapasitelerinin bulunması yapay fiberlerin doğmasına öncü olmuştur. Endüstriyel olarak üretilen fiberler organik polimer yapılardan veyahut inorganik malzemelerden sentezlenmektedirler. Yapay fiberler esneklikleri, kolay şekil alabilmeleri ve farklı yapılarla bütünleşebilmeleri nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır.

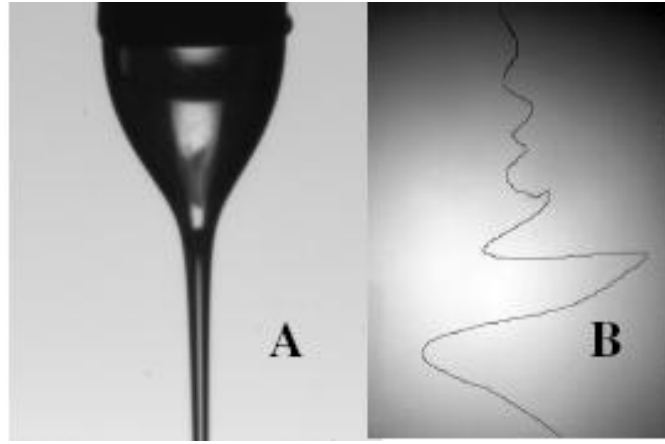
Fiber yapılarının uygulama alanlarının genişlemesindeki en önemli engel nano boyutlara indirgenmesindeki güçlüklerdir. Bugün uygulanmakta olan endüstriyel üretim teknolojileri çapı bir mikron ve altında olan fiber oluşumuna imkân vermemektedir. Nano teknoloji beraberinde koruyucu giysi üretiminden, yapay organ üretimine, bakteri dezenfektasyonundan, yüksek kapasiteli uzun ömürlü pil üretimine kadar pek çok alanda çığır açacak pek çok gelişmenin önünü açmaktadır.

Nano fiber üretimi alanındaki güçlüklerin aşılması amacıyla farklı teknikler üzerinde yoğun araştırma ve geliştirme faaliyetleri yürütülmektedir. Bu aktif çalışma alanlarından bir tanesi de Elektrostatik Eğirme (Electrospinning) yöntemidir. Elektrostatik eğirme, ilk olarak yüksek gerilim altındaki sıvıların davranışlarındaki farklılaşmaların gözlemlenmesi sonucunda ortaya çıkarılmıştır. Bu alanda yapılan ilk çalışmada su damlacıklarına yeterince yakın bir noktada elektrostatik bir alan oluşturulduğunda, damlacıkların konik bir yapı oluşturarak, spiral bir yörünge üzerinden saçıldığı görülmüştür [1]. Takip eden yıllarda ise elektrostatik eğirme önemli bir araştırma alanı olarak literatürde fazlaca yer almamıştır [2;3].

Elektrostatik Eğirme yönteminin nano lif üretimde kullanılması ilk olarak 1990'lı yılların başlarında olmuştur. Reneker et al., [4] yaptıkları çalışmalar ile organik

polimer çözeltilerinin yüksek gerilimin oluşturduğu elektrostatik alanda saçılarak nano lif yapısı oluşturduğunu göstermişlerdir. Bugün nano lif üretim teknolojisi tekstil endüstrisinden doku mühendisliğine kadar birçok alanda uygulanabilir olması nedeniyle aktif bir çalışma alanı olmuştur.

Polimer esaslı nano liflerin üretimi için kullanılan elektrostatik eğirme tekniğinde, uygun bir çözücüde eriyen polimer, ucunda şırınga iğnesi bulunan bir pipetin içine yerleştirilir. Pipetin ucundaki metal yapıdaki iğneye giderek artan bir elektrik alan uygulandığında (1kV-30kV) polimer çözeltisi iğne ucunda önce “Taylor Cone” olarak tanımlanan konik bir yapı oluşturur [9]. Şekil 1.1a’da yüksek gerilim altında şırınga ucunda oluşan konik yapı görülmektedir.



Şekil 1.1: (a)Taylor Konisi, (b) Spiral hareket yapan polimer çözeltisi [9]

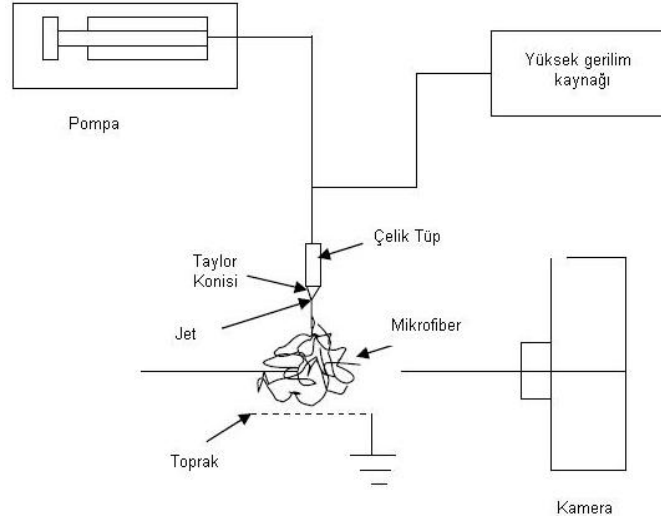
Polimer çözeltisine uygulanan elektrik alan belirli bir eşik değerini aştıktan (1kV-5kV) sonra polimer jeti Taylor Konisi yapısından ayrılır. Yüksek gerilimle kutuplanan polimer molekülleri hareket eksenini doğrultusunda kaotik bir yörüngeyi takip ederek toplayıcı plaka üzerinde rastgele bir ağ yapısı oluşturur (Şekil 1.1b).

Oluşan fiber ağ şekillerinin çapları uygulanan elektrik alan şiddetine ve polimer yapısına bağlı olarak geniş bir ölçekte (30 nm –1 µm) olabilmektedir. Elektrostatik Eğirme tekniği ile elde edilen sonuçların umut vaat edici olması çok sayıda araştırmacının dikkatini çekmiştir. Mevcut birçok araştırmada elde edilen fiber yapıların sentezlenmesi kontrolsüz olarak gerçekleştirilebilmiştir [10]. Bu durum mevcut şekli ile Elektrostatik eğirme tekniğinin nano lif üretim teknolojisinde yaygın kullanımını engellemektedir.

1.1 Elektrostatik Eğirme ile Nano Lif Üretim Teknikleri

Literatürde yer alan elektrostatik eğirme düzenekleri üç temel bölümden oluşmaktadır. İlk bölüm polimer çözeltisinin saklandığı ve püskürtme işleminin yapıldığı şırınga benzeri yapıdan oluşabilen ince tüptür. Bu bölüm pasif (çözeltinin yer çekimi etkisi ile harekete başlaması) ya da aktif (şırınga pompası gibi bir cihaz yardımı ile çözeltinin püskürtülmesi) yapıda olabilmektedirler. İkinci bölüm ise yüksek voltaj (5kV-30kV) aracılığıyla jet yörüngesi boyunca oluşturulan elektrik alan bölgesinden, son bölüm ise oluşturulan nano lif yapısının toplandığı düzenden oluşmaktadır.

Elektrostatik eğirme tekniği üzerine yapılan ilk yayınlardan biri 1971 yılında Baumgarten [14] tarafından gerçekleştirilmiştir. Akrilik mikro fiber yapılarının elde edilmesi amacıyla oluşturulan deneysel düzenek Şekil 1.2’de görülmektedir. Çalışmada dimetil formamid içersinde çözölen polimer, çelik bir yapıya sahip bir tüpe yerleştirilmiştir. Yüksek gerilim ve pompanın uyguladığı itme kuvveti ile tüpten saçılan polimerler karmaşık bir hareket karakteristiği göstererek topraklanmış metal plakanın üzerine toplanmıştır. Çözelti hareketinin incelenmesi amacıyla ise yüksek çözünürlüklü bir kamera kullanılmıştır.

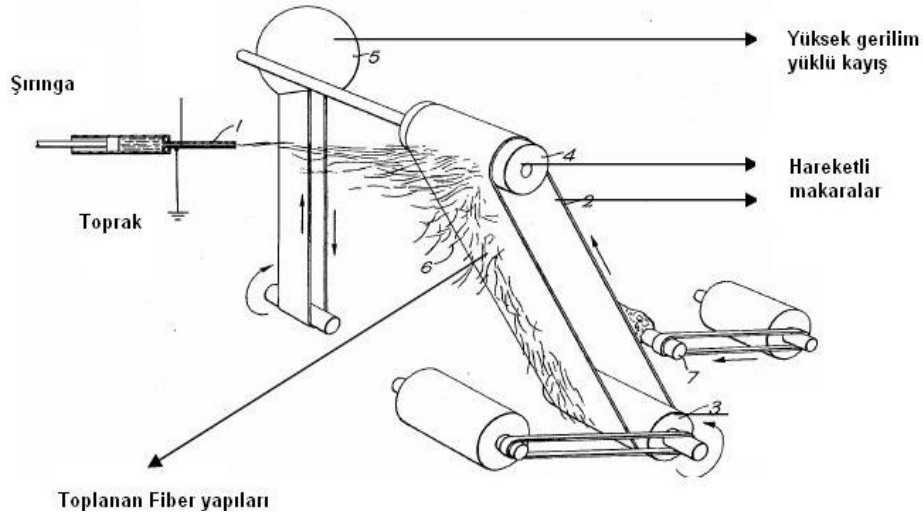


Şekil 1.2 Elektrostatik Eğirme, Baumgarten [14]

Çalışma sonucunda çözelti akışkanlığı artırıldığında tüpten ayrılan polimer jetlerinin boyutlarının ve oluşan fiber yapılarının kalınlığının arttığı gözlenmiştir. Tüpe uygulanan itme kuvveti artırıldığında ise de polimer jetlerinin boyutları

arttığı, buna karşın fiber kalınlıklarının kayda değer bir oranda artmadığı gözlenmiştir.

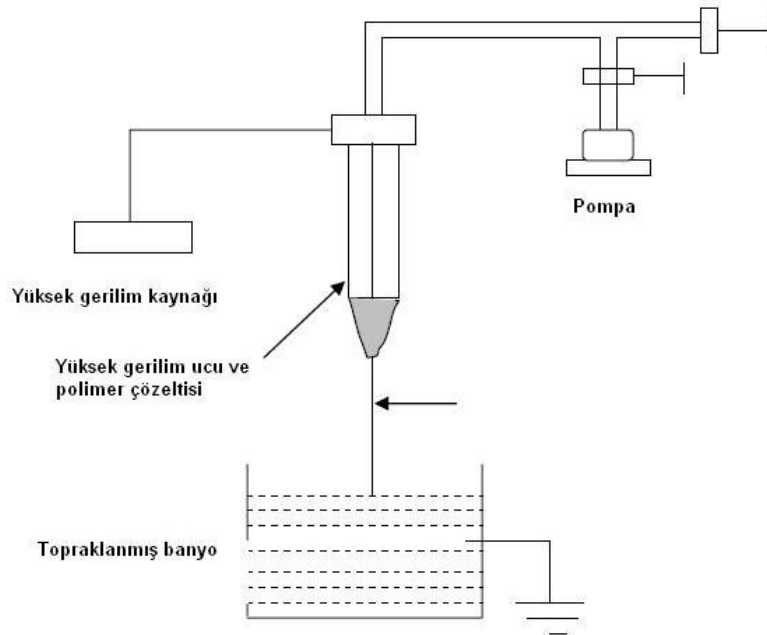
Bir diğer uygulama da Martin et al. [15] tarafından yapılmıştır. Söz konusu çalışma kapsamında çeşitli nedenlerle oluşan yara dokularının yapay olarak fiber ağ yapıları ile giydirilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde polimer çözeltisi metal uçlu şırınga içerisine yerleştirilmiş ve şırınga iğnesi topraklanmıştır. Bir pompa yardımı ile çözelti, 20kV gerilim ile yüklenen ve gözenekli bir yapıya sahip hareketli bir kayış üzerinden, toplayıcı düzeneğine doğru püskürtülmüştür (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 Elektrostatik Eğirme, Martin et al. [15]

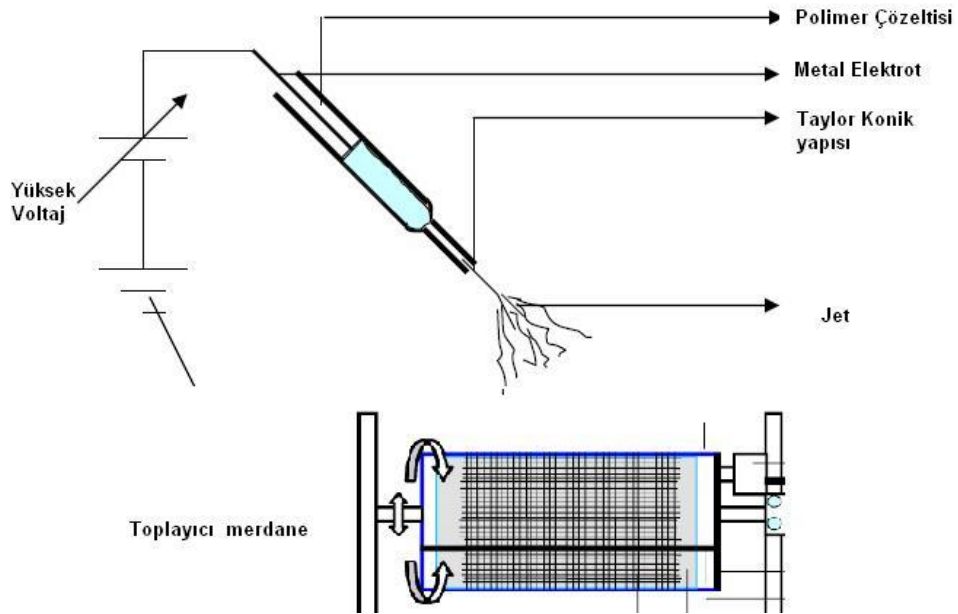
Deneyssel çalışmalar sonucunda toplayıcı yapı üzerinde boyutları mikrometre ile santimetre aralığında değişen ve karmaşık bir dizilime sahip fiber ağ yapısı elde edilmiştir.

Srinivasan [16] tarafından yapılan çalışmada ise daha önceki yapılan deneylerden farklı olarak plastik şırınga içerisindeki polimer çözeltisine yüksek gerilim doğrudan uygulanmıştır (Şekil 1.4). Şırıngadan pompa yardımı ile püskürtülen çözelti bir banyoda toplanmış ve daha sonra vakum ortamında kurutulmuştur. Deney sonucunda elde edilen fiber yapılarının kalınları birkaç yüz nanometre olarak Atomik Kuvvet Mikroskobu, AKM, (Atomic Force Microscope, AFM) altında gözlenmiştir.



Şekil 1.4 Elektrostatik Eğirme, Srinivasan [16]

Abvay [12] tarafından 2002 yılında gerçekleştirilen çalışmada ise Şekil 1.5'deki yapı kullanılmıştır. Yüksek gerilim ile yüklenen pozitif uç şırınga içersinde bulunan polimer çözeltisinin içine yerleştirilmiş ve belirli bir açı ile saçılması sağlanmıştır.

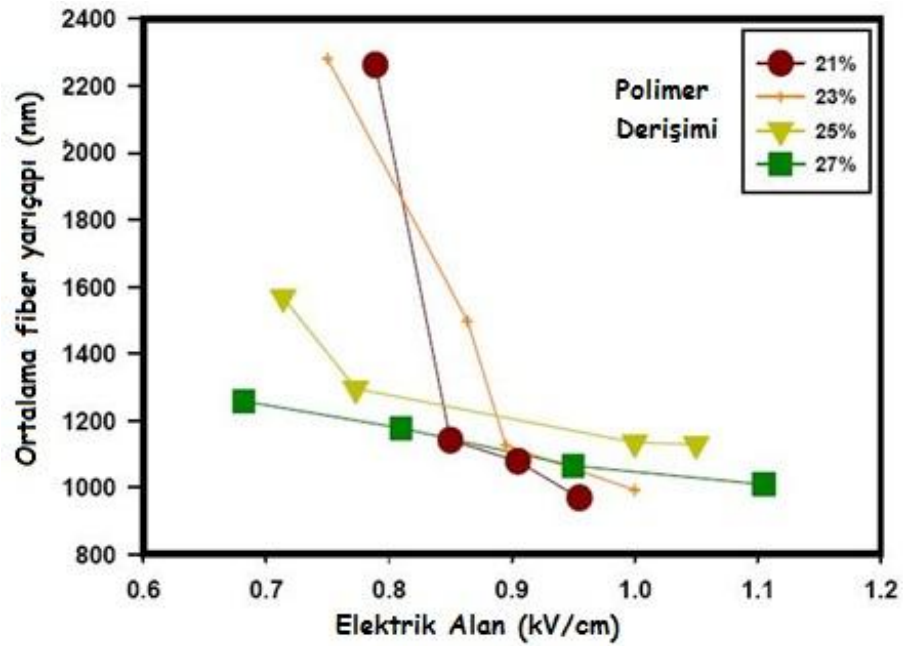


Şekil 1.5 Elektrostatik Eğirme, Abvay [12]

Hareket eksenini boyunca buharlaşma ve yüksek gerilimin etkisi ile incelenerek hareket eden polimerleri toplamak amacıyla yüzeyi alüminyum kaplı bir hareketli merdane kullanılmıştır. Hareketli merdane yığın halinde oluşan polimer liflerinin düzgün doğrusal bir şekilde dizilimini sağlamak amacıyla sabit toprak plakasına alternatif olarak elektrostatik eğirme düzeneğiyle bütünleştirilmiştir. Oluşan nano lifleri incelemek amacıyla ise Tarayıcı Elektron Mikroskobu, TEM, (Scanning Electron Microscope, SEM) kullanılmıştır.

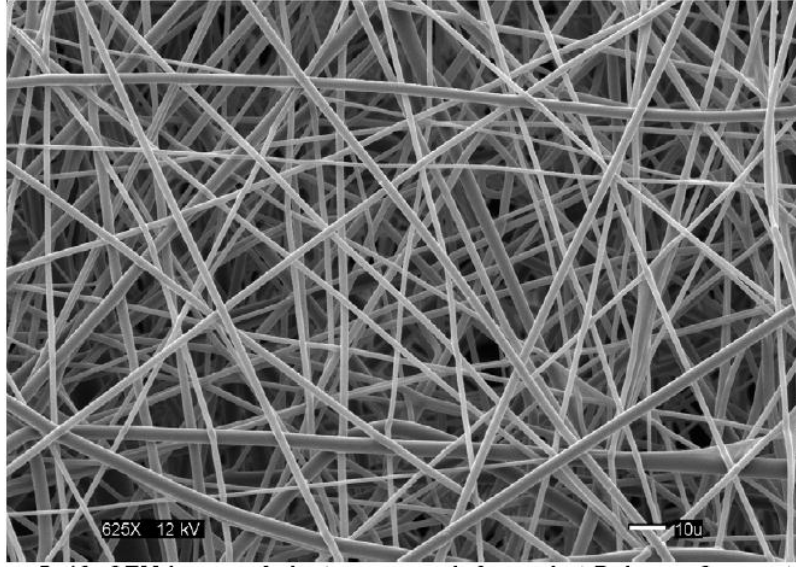
Deneysel çalışma sonucunda elde edilen fiber lif çaplarının istatistiksel değişimi, farklı polimer çözelti derişimleri ve elektrik alan şiddeti bağı olarak, Şekil 1.6'da görülmektedir.

İstatistiksel sonuçlar, artan elektrik alan şiddeti ile fiber lif çapı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Polimer çözeltisine uygulanan gerilimin artmasıyla birlikte daha küçük çapa sahip fiber lif yapıları elde edilmiştir.



Şekil 1.6 Fiber lif çaplarının elektrik alan şiddeti ve polimer çözelti yoğunluğuna bağlı değişimi [12]

Polimer çözeltisinin derişimi ile fiber çapları arasında ise istatistiksel olarak bir ilişki olduğunu söylemek mümkün görülmemektedir. Şekil 1.7'de elde edilen nano lif ağ yapısının TEM görüntüleri görülmektedir.



Şekil 1.7 %25 derişime sahip polimer çözeltilisine 21kV gerilim uygulandığında elde edilen fiber liflerinin SEM görüntüsü. Şırınga-merdane arası mesafe 21cm [12]

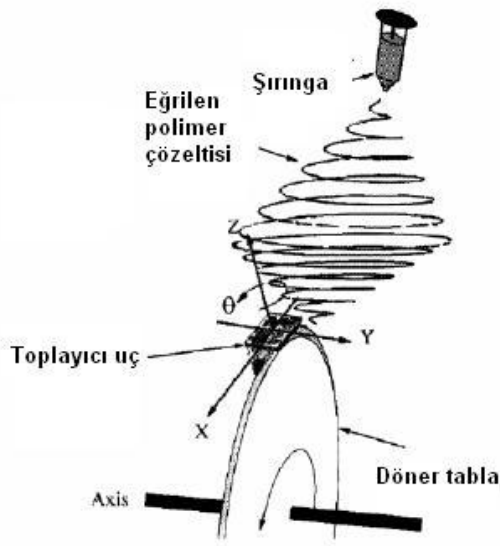
Yürütölen çalışma sonucunda, Şekil 1.8'de de göröldüğü üzere, hareketli merdana üzerinde toplanan polimerlerin nano ölçekte karmaşık yapılarını koruduğu gözlenmiştir.

Yarin [17] 2004 yılında gerçekteştirdiğı çalışmada çeşitli toplayıcı yüzeylede oluşan karmaşık nano lif yapılarını ayırştırmak ve düzenli bir yapıda toplayabilmek amacıyla farklı bir mekanik sistem kullanmıştır. Şekil 1.8'de görölen düzenek şırınga ucundan ayrışan polimer çözeltilisini çok ince bir kalınlığa sahip döner merdane üzerinde toplamayı amaçlamaktadır.

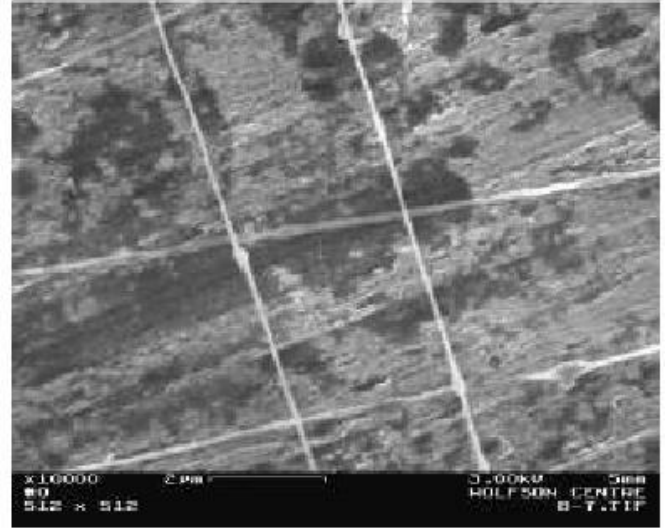
Deneylerde 1kV/cm elektrik alan oluşturulmuş ve 100nm civarında fiber yapıları elde edilmiştir. Şekil 1.8b'de de göröldüğü gibi döner merdane üzerindeki keskin uç yardımıyla toplanan nano lifler daha önceki çalışmalara göre daha düzenli bir dizilime sahiptir.

1.2 Problem Tanımı

Elektrostatik eğirme tekniğı alternatif nano lif üretim yöntemlerine göre düşük maliyet, tekrar edilebilirlik ve fiber kalınlığının kontrolü gibi alanlarda avantajlar sağlamasına rağmen fiberin yapısı ve dizilimi açısından rastgelelik içermektedir.



(a)



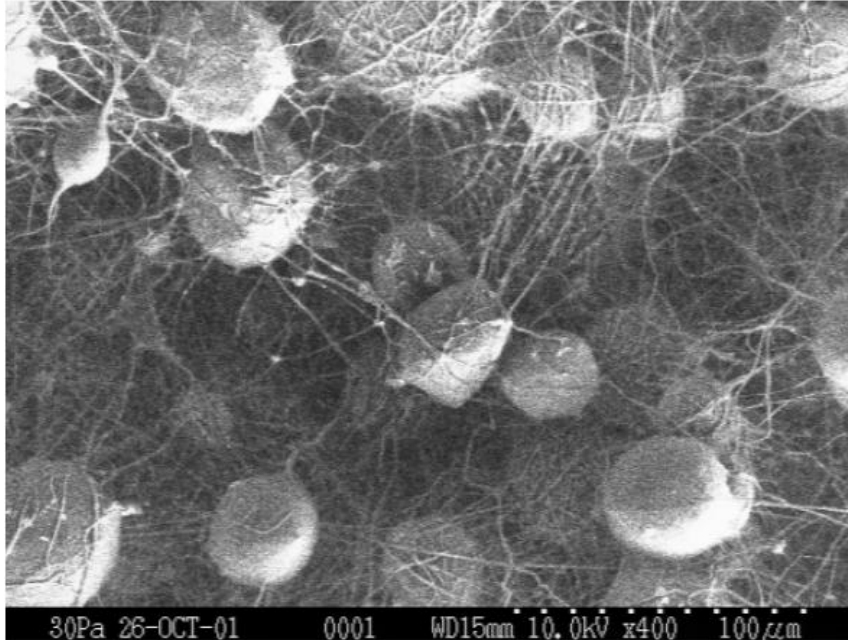
(b)

Şekil 1.8 (a) Elektrostatik eğirme düzeneği (b), Nano liflerin SEM görüntüsü [17]

Şekil 1.9'da böyle bir oluşuma örnek olarak Abvay [12] tarafından gerçekleştirilen Elektrostatik eğirme düzeneğine ait TEM görüntüsü yer almaktadır. Sentezlenen fiber ağ yapısı; elektrik alan şiddeti, çözelti derişimi ve şırınga-toplayıcı plaka arası mesafeye bağlı olarak karmaşık bir yapı oluşturmuştur.

Kontrollü ve düzgün dizilimli lifler elde etmek amacıyla yapılan birçok çalışmada kullanılan mekanik düzenek gibi çözümler fiber yapılarının çok düşük çaplara sahip olması ve bu hassasiyette toplayıcı düzeneklerinin üretiminin zorluğu nedeniyle uygulama açısından güçlükler getirmektedir. Bu nedenle elektrostatik eğirme tekniği kullanılarak sentezlenen ağ yapılarının kullanılabilirliğinin artırılması günümüzde aktif bir çalışma alanı olarak literatürde önemli yer tutmaktadır.

Gerçekleştirilen çalışma ile birçok araştırmada nano lif üretimde başarılı bir şekilde uygulanmış olan Elektrostatik Eğirme tekniğinin kaotik yapısının yardımcı elektrik alan plakaları kullanılarak bastırılması ve bu yapının teorik ve benzetim modellerinin çıkarılması hedeflenmiştir.



Şekil 1.9 19 kV, 21 cm şırınga-toplayıcı mesafesinden elde edilen lif yapısı [12]

Çalışma sonucunda, Elektrostatik Eğirme düzeneği ile düzgün dağılımlı nano fiberler sentezlenerek, bu yapılara endüstriyel olarak kullanılabilirlik kazandırılması amaçlanmıştır.

1.3 Çalışmanın İçeriği

Yürütülen çalışma üç aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk aşama olarak, literatürde standartlaşmış ve başarılı bir şekilde uygulanmış olan Elektrostatik Eğirme yöntemi referans alınarak, özgün sistem tasarımı ile karmaşık nano lif sentezi gerçekleştirilmiş ve yüksek büyütme kapasitesine sahip mikroskoplar yardımı ile gözlenmiştir. Deneysel çalışmalar, tüm değişkenlerin etkin ve verimli bir şekilde denetlenebilmesi doğrultusunda yüksek gerilim kaynağı, elektrik alan üretici ve polimer jetlerinin pompalanması için gerekli olan mekanik sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

İkinci aşamada yardımcı elektrik alan plakaları elde edilen bir fiber ağ yapısı oluşumu, akışkanlar mekaniği ve elektrostatik kavramları kullanılarak teorik olarak modellenmiştir. Ayrıca, oluşturulan teorik model referans alınarak Elektrostatik Eğirme sisteminin bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasının son adımı olarak ise, düzenli ağ yapılarının elde edilmesi amacıyla polimer jetlerinin hareket doğrultusu boyunca yerleştirilen iletken plakalar yardımı ile ikincil elektrik alanlar oluşturularak kontrol edilebilir ve saçılımı bastırılmış nano lif yapılarının elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatür çalışmaları ve deneyler ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir [2;3]. Elektrostatik Eğirme ile sentezlenen nano lif yapılarının oluşumu sırasında incelenen işlem değişkenleri; yüksek gerilim, toplayıcı ile besleme ünitesinde arasında mesafe, farklı elektrik alan oluşumlarıdır.

1.4 Elektrostatik Eğirme Sistemi ile Denetlenebilir Nano Lif Sentezi Üzerine Yapılan Çalışmalar

Elektrostatik eğirme ile düzenli ağ yapılarının elde edilmesi üzerinde geçmiş dönemlerde yapılan birçok çalışma mekanik sistemlerin kullanımına odaklansa da elektrik alanın değişken olarak kontrollü ağ yapılarının oluşturulmasında kullanıldığı dört önemli çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar tarih sırasıyla: J.M. Deitzel et al. [19], Geun Hyung Kim [20], Belan ve Craighead [18] ve Ishii et al. [11] tarafından gerçekleştirilmiştir.

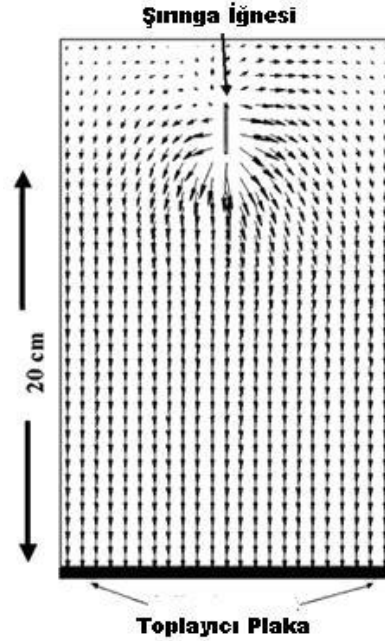
1.4.1 PEO (Poli-etilen Oksit) ile yarı-kontrollü fiber sentezi

2001 yılında M. Deitzel et al. [19] tarafından yayınlanan çalışmada şırınga iğnesi ile toplayıcı plaka üzerinde oluşan elektrik alanın yapısı incelenmiş ve elde edilen teorik sonuçlardan yola çıkarak alternatif bir sistem modeli oluşturulmuştur.

Elektrostatik eğirme hareketinin oluşumu, elektrik alan etkisi altında kalan şırınga iğnesi içersindeki, polimer iyonlarının pozitif olarak kutuplanarak toprak doğrultusunda hareket etmesiyle başlamaktadır. Bu etkileşim sonucunda pozitif yükler iğne ucunda toplanır. Eğer uygulanan gerilim yeteri kadar büyükse elektrostatik kuvvet polimer yüzey gerilimini yenerek toprağa doğru akışı başlatır. M. Deitzel et al. [19] çalışmalarında Quick field programını kullanılarak tipik bir elektrostatik eğirme sisteminde, polimer jetinin hareket yörüngesi boyunca, oluşan elektrik alanının yapısının bilgisayar benzetimini gerçekleştirmişlerdir (Şekil 1.10).

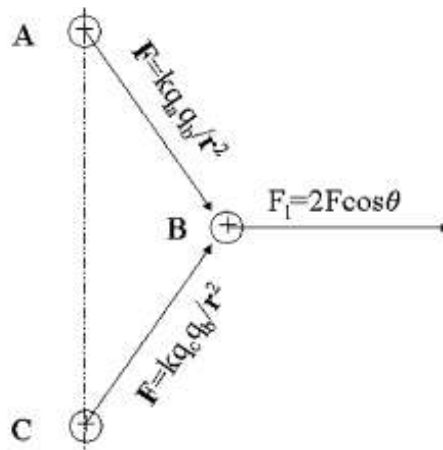
Toplayıcı plakaya doğru gerçekleşen akış, başlangıçta şırıngadan çıkan çözelti üzerindeki elektrik alan şiddetinin büyüklüğüne bağlı olarak bir süre düzgün

doğrultuda gerçekleşir. Bu hareket sırasında Polimer jetinin içersinde bulunan eş yüklü iyonlar arasında elektrostatik etkileşimler meydana gelir. Söz konusu elektrostatik kuvvet, elektrostatik eğirme tekniğinde görülen kaotik ve spiral hareketin başlamasını tetikler.



Şekil 1.10 Elektrostatik Eğirme Düzeneği Elektrik alan oluşumu [19]

Şekil 1.11 jet yapısı içerisinde oluşan elektrostatik kuvveti basit bir örnekle açıklamaktadır.

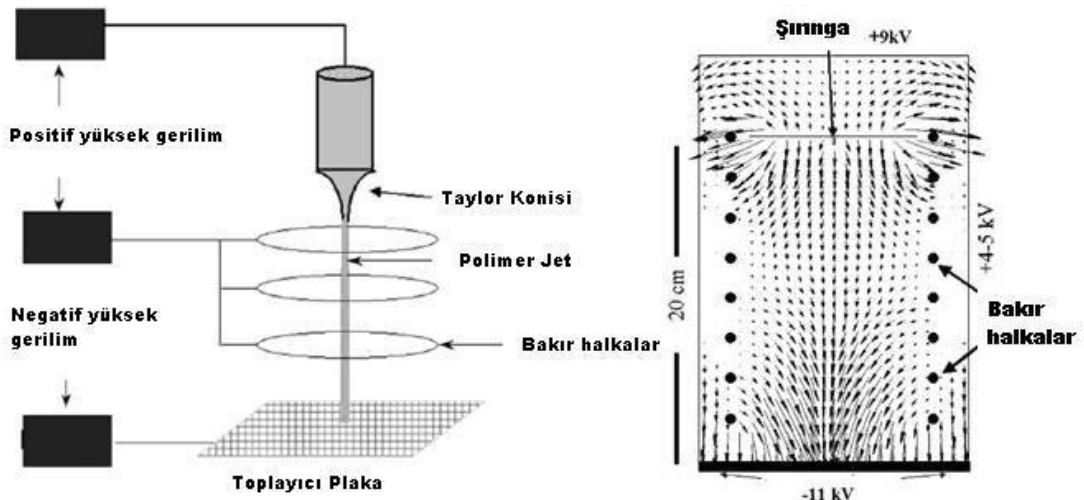


Şekil 1.11 Eş yüklü parçacıklar arasında oluşan elektrostatik kuvvet.

Eş yüklü A ve C parçacıkları ile B parçacığı arasında $F_l = 2F \cos \theta$ ile ifade edilen bir elektrostatik kuvvet oluşur. Benzer şekilde jet içerisinde bulunan tüm parçacıklar arasında oluşan bu F_l kuvveti karşıt dengeleyici bir kuvvet ile karşılaşmadığında katlanarak artar ve jet'in kaotik ve spiral hareketinin başlamasına neden olur.

J.M. Deitzel et al. [19] Elektrostatik eğirme sisteminde ortaya çıkan kaotik hareketin yüklü parçacıklar arasındaki elektrostatik etkileşim kaynaklı olması nedeniyle sisteme uygulanan elektrik alan yapısını değiştirerek kaotik hareketin bastırabileceği fikrini ortaya atmışlardır. Şekil 1.12.'de çalışmada kullanılan deneysel düzeneğe ait şematik çizim ve Quik Field programı ile benzetimi yapılan elektrik alan yapısına yer verilmiştir.

Çalışmada oluşturulan yeni sistem ile elektrik alan bakır halkalar yardımıyla toplayıcı plakaya doğru odaklanarak polimer jetinin kaotik hareketinin bastırılması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde elektrik alanının etkisi kuvvetlendirmek için toplayıcı plaka negatif gerilimle yüklenmiştir. Odaklama sistemi için 10'ar cm çapında 8 adet bakır halka, 1.9cm aralıklarla jetin hareket yörüngesi doğrultusunda toplayıcı plakaya paralel olarak yerleştirilmiş ve 4-5kV değerlerinde gerilim uygulanmıştır.

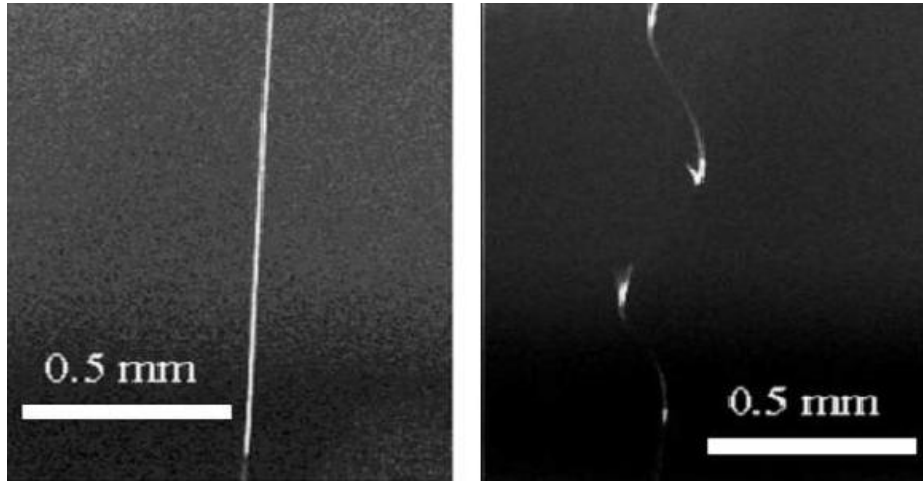


Şekil 1.12 Elektrostatik Eğirme düzeneği [19]

Şekil 1.13.'de deneysel sistemin çalışma anında iki farklı besleme gerilimi kullanılarak çekilen polimer jeti resimleri bulunmaktadır. Yüksek hızlı kamera

kullanılarak toplayıcı plakadan 10cm yükseklikteki bir noktada elde edilen görüntüler bakır halkalara uygulanan gerilim artırıldığında jet yapısındaki kaotik hareketin bastırıldığı ortaya koymuştur.

Araştırma sonucunda sentezlenen nano fiber lif çaplarının standart elektrostatik eğirme tekniklerine oranla azaldığı (400nm'den – 270nm'ye) ve jet saçılmasının indirgenmesi ile oluşan fiber yığın çapının 7cm'den yaklaşık 2cm'ye düştüğü görülmüştür.

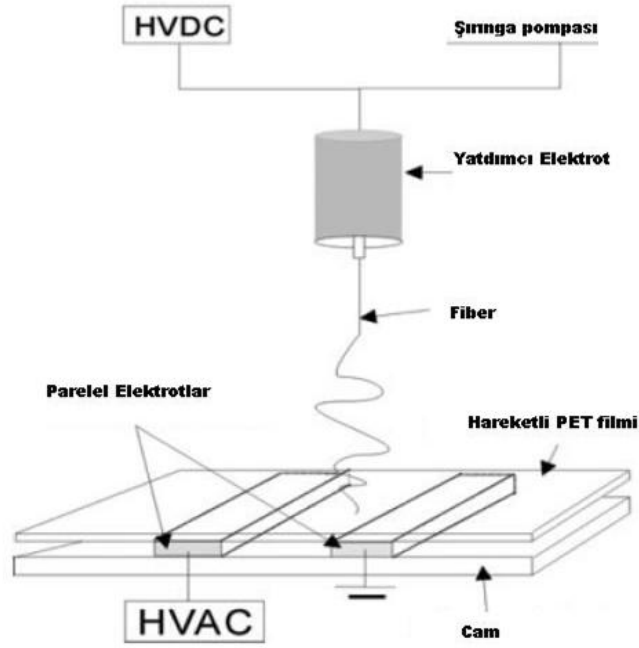


Şekil 1.13 (a) Bakır halkalara 5kV gerilim uygulandığında 10cm yükseklikteki jet yapısı, **(b)** 2.5kV gerilim uygulandığında 10cm yükseklikteki jet yapısı [19]

1.4.2 Yardımcı elektrotlar kullanılarak nano lif üretimi

Geun Hyung Kim [20] tarafından 2005 yılında yayınlayan araştırmada polimer jet'inin tek eksenli düzgün doğrultuda diziliminin sağlanması hedeflenmiştir. Nano fiber lif yapısının elde edilmesi amacıyla kurulan deneysel sistem iki ana bölüme ayrılmıştır:

- Yardımcı bir elektrot aracılığı ile şırınga iğnesinden saçılan polimer jet'inin kaotik hareketinin bastırılması, (Şekil 1.15)
- Toplayıcı plaka üzerine yerleştirilen paralel elektrotlar tarafından oluşturulan değişken elektrik alan ile fiber lif oluşumunun kontrol edilmesi, (Şekil 1.14)



Şekil 1.14 Elektrostatik Eğirme düzeneği [20]

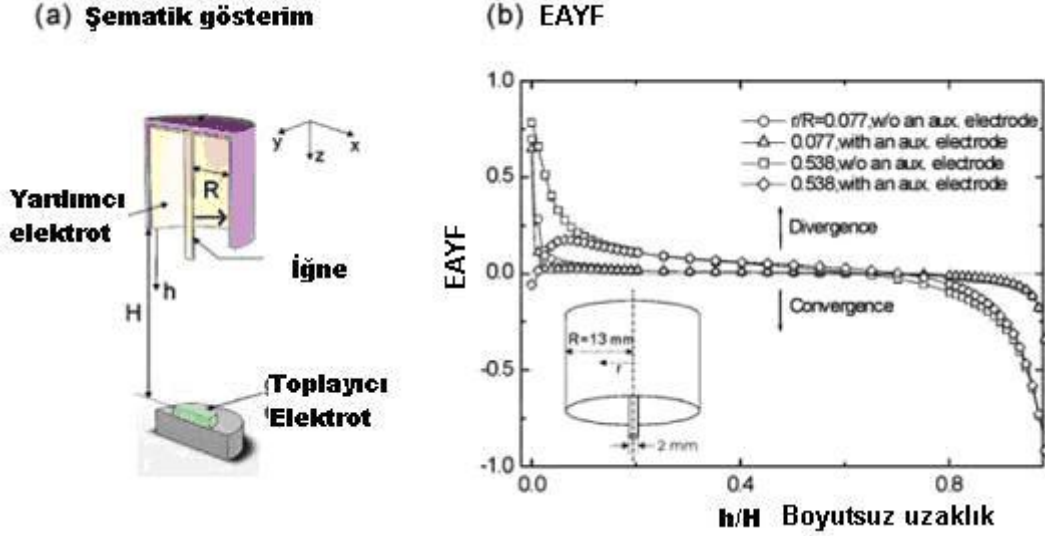
1.4.2.1 Polimer jet'in kaotik hareketinin bastırılması

Şırınga iğnesinden toplayıcı plakaya doğru hareket eden yüklü parçacıkların Taylor konisi yapısından ayrıldıkları andaki kararlılığı, jet yapısındaki akışkanlık, yüzey gerilimleri, elektrostatik kuvvet, hava sürtünmesi ve yer yer çekimi gibi sınır değer değişkenlerine bağlıdır. Jet'in başlangıç anından toplayıcı plakaya kadar olan yol boyunca iç ve dış kuvvetlerin etkisi altındaki davranışını tanımlamak için elektrik alan yoğunlaşma faktörü, EAYF, (EFCF, Electric field concentration factor) kullanılabilir. EAYF, kaotik hareket yapan çözeltinin spiral eksen boyunca yakınsama derecesinin bir ölçütü olarak ifade edilir.

$$EAYF = \left(\frac{E_x}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}}, \frac{E_y}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}}, \frac{E_z}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}} \right) \cdot \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (1.1)$$

E_x, E_y, E_z Elektrik alan bileşenlerini, x ve y ise sistemin merkezine olan uzaklığın Kartezyen koordinatlar cinsinden ifadesini göstermektedir. EAYF -1 ila 1 arasında değerler almaktadır. Pozitif değerler, elektrik alan vektörlerinin ilgili koordinatlarda

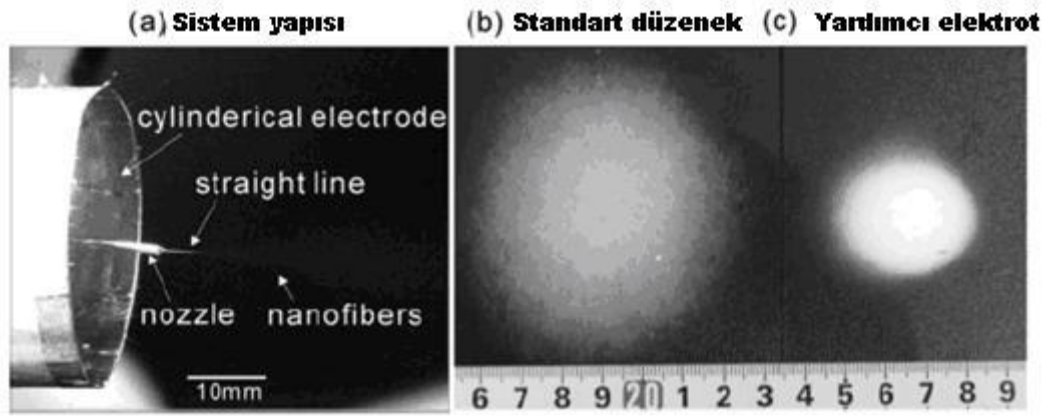
dışa doğru yönelim, negatif değerler ise de içe doğru yönelim gösterdiğini ifade etmektedir. Şekil 1.15.'da Elektrostatik eğirme düzeneği için hesaplanan EAYF değerleri yer almaktadır.



Şekil 1.15 (a) Elektrostatik eğirme düzeneği, **(b)** Silindirik yardımcı elektrot bulunan ve bulunmayan düzeneğe ait EAYF değerleri [20]

İlgili çalışmada elektrostatik eğirme sistemi için EAYF değerlerinin hesaplanmasında ANSYS/Emag-3D yazılımı kullanılmıştır. Benzetim adımlarında elektrik alan şiddeti 0.8 kV/cm olarak alınmış ve 1mm yarıçapında (r) - 15mm uzunluğunda şırınga iğnesi ile 1mm kalınlığında - 13mm yarıçapında (R) silindirik yapıda olan bir yardımcı elektrot kullanılmıştır. Çalışma neticesinde yardımcı elektrot kullanılarak gerçekleştirilen benzetimlerde, polimer çözeltisinin şırınga iğnesinden ayrılarak toplayıcı plakaya doğru yaptığı hareketi başlattığı anda sistemin yakınsama değerinin arttığı görülmüştür (Şekil 1.15b). r/R oranı arttırıldığında jet yörüngesinin başlangıç anlarındaki (~ 0.1) EAYF değerinin düzgün ve doğrusal jet hareketi için istenen değer olan 0'a yakınsadığı gözlenmiştir (Şekil 1.15b).

Şekil 1.16.'da Kim [20] tarafından bilgisayar benzetimleri ile ortaya konan sonuçların deneysel olarak da doğrulandığı düzenek (a) ve elde edilen fiber yapısının resimleri görülmektedir. Çalışma sırasında %8'lik derişime sahip PCL çözeltisi kullanılmıştır. Toplayıcı plaka ile iğne arasında mesafe 15cm'dir. İğne ucuna ise 14kV'luk bir gerilim uygulanmıştır.



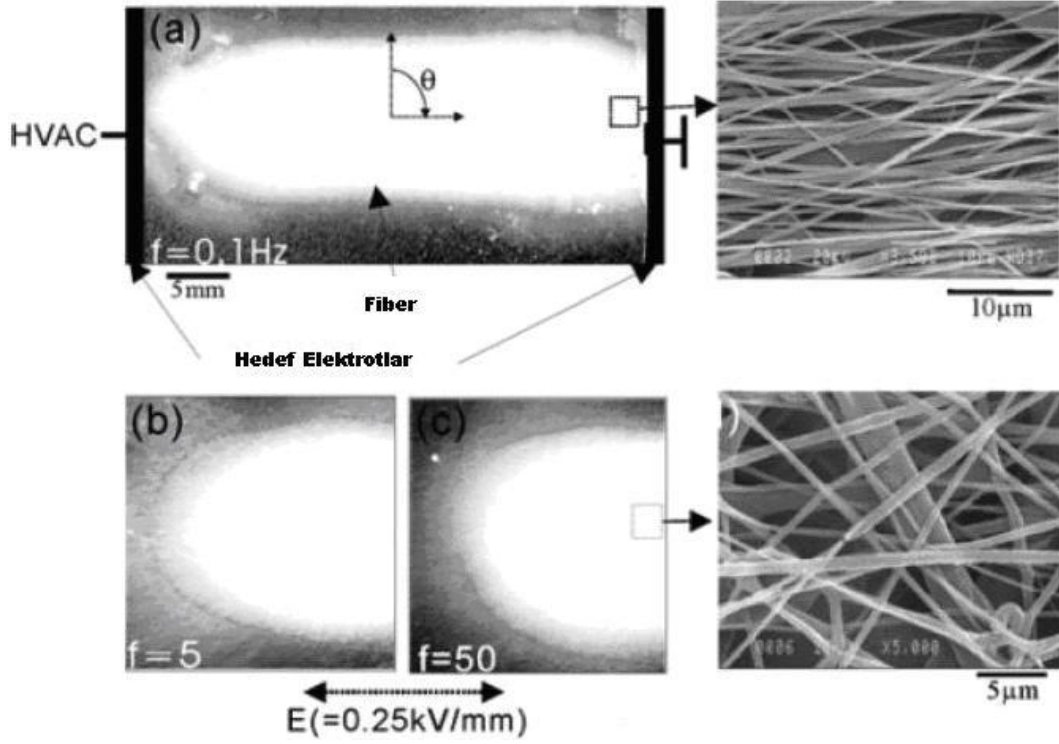
Şekil 1.16 (a) Yardımcı elektrot kullanılarak oluşturulan elektrostatik eğirme düzeneği, (b) standart sistem sonucu oluşan fiber ağ yapısına ait spot büyüklüğü, (c) Yardımcı elektrot sonucunda elde edilen fiber ağ yapısı [20]

Deneyisel sonuçlar bilgisayar benzetimi ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda gerçekleşmiş ve jet yapısının kararlılığının arttığı gözlenmiştir.

1.4.2.2 Paralel elektrotlar yardımı ile fiber lif oluşumunun kontrol edilmesi

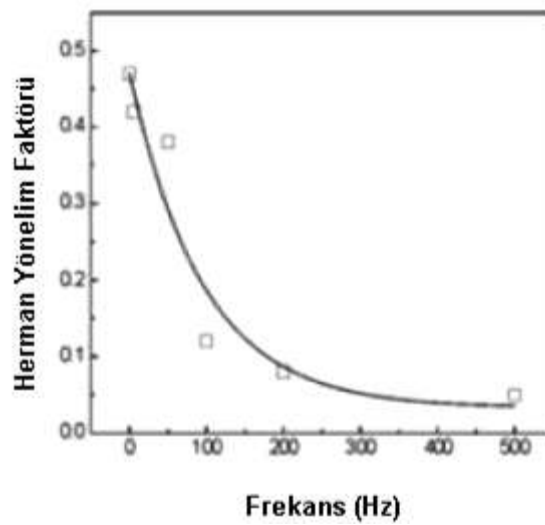
Elektrik alan içerisinde toplayıcı plakaya doğru hareket eden jet'lerin dizilimi kullanıcı kontrolünden bağımsız olarak karmaşık bir yapıda olmaktadır (Şekil 1.9). Kim [20] çalışmasının ikinci kısmında bu kısıtın aşılması amacıyla alternatif gerilimle yüklenen iki adet yardımcı plaka ile değişken elektrik alan oluşturmuştur (Şekil 1.15). Uygulanan elektrik alan şiddeti $0.25kV/mm$ ve frekans aralıkları $0.1, 5, 50, 500$ Hz olarak uygulanmıştır (Şekil 1.17). Elde edilen sonuçlar fiber ağ yapısı yöneliminin, uygulanan frekansla ilişkili olduğunu göstermiştir.

Bu ilişkinin ifadesi Herman yönelim faktörü hesaplanarak Şekil 1.18'de gösterilmiştir [23]. Herman yönelim faktörü $-0.5 - 1$ arasında değerler almaktadır. 1 değeri referans yön ile bire bir ilişkiyi gösterirken, 0 rastgelelik, -0.5 ise referans yöne dik yönelimi ifade etmektedir.



Şekil 1.17 Paralel yardımcı elektrotlar ile oluşturulan elektrostatik eğirme sistemi ile sabit elektrik alan (11kV şırınga iğnesi – toplayıcı plaka, 0.25kV/mm paralel elektrotlar arası) ve değişik frekans değerlerinde oluşturulan fiber dizilimleri (a),(b),(c). [20]

Şekil 1.18’de hesaplanan Herman faktörünün artan frekans ile azaldığı ve 500 Hz’de 0.05 değerini aldığı göstermiştir. Şekil 1.17 (a) ve (c)’de elde görüntüler, teorik yapılan hesaplamalarla paralel sonuçlar vermiştir.



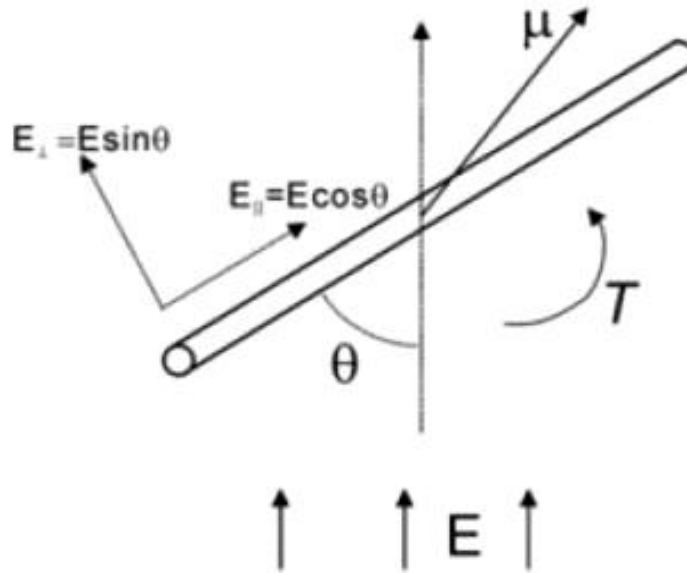
Şekil 1.18 Değişken frekans değerlerinde elde edilen Herman yönelim faktörü [20]

Kim [20] çalışmasında paralel elektrotlar yardımıyla oluşan fiber ağ yapısının teorik olarak analizini nano fiberler üzerine düşen elektrostatik tork ifadesini kullanarak gerçekleştirmiştir. Fiber parçacıkların dipol momentleri, uygulanan elektrik alan ile elektromekanik bir etkileşim gösterirler. Bu fiziksel etkileşim nano fiber yapısında oluşan tork ifadesi ile açıklanabilir.

$$T = 0.5V\varepsilon_0 K_T(\omega) E^2 \sin 2\theta \quad (1.2)$$

V fiber hacmi, ε_0 dielektrik sabiti, E elektrik alan, ω uygulanan frekans, θ dönüş açısı, $K_T(\omega)$: fiberin birbirine dik eksenleri arasındaki depolarizasyon faktörünü ifade etmektedir. Şekil 1.19.'da fiber yapısında oluşan tork ifadesinin şematik gösterimi verilmektedir.

Parçacıkların polarizasyonu ile oluşan tork, fiberin elektrik alan doğrultusunda yönelimine neden olmaktadır. Tork ifadesi (1.2)'den de açıkça görüldüğü üzere en yüksek değerini 45 derecelik açı da almaktadır. Tork değeri polimer ve havanın dielektrik katsayıları (PCL: 2.2, Hava: 1) kullanılarak yüksek ve alçak frekans limit değerlerinde hesaplandığında (0.1 Hz – 500 Hz) $T_L \gg T_H$ olarak bulunur [21]. Elde edilen teorik çıkarımlar Şekil 1.17.'de elde edilen deneysel sonuçlarla paralellik göstermiştir [20].



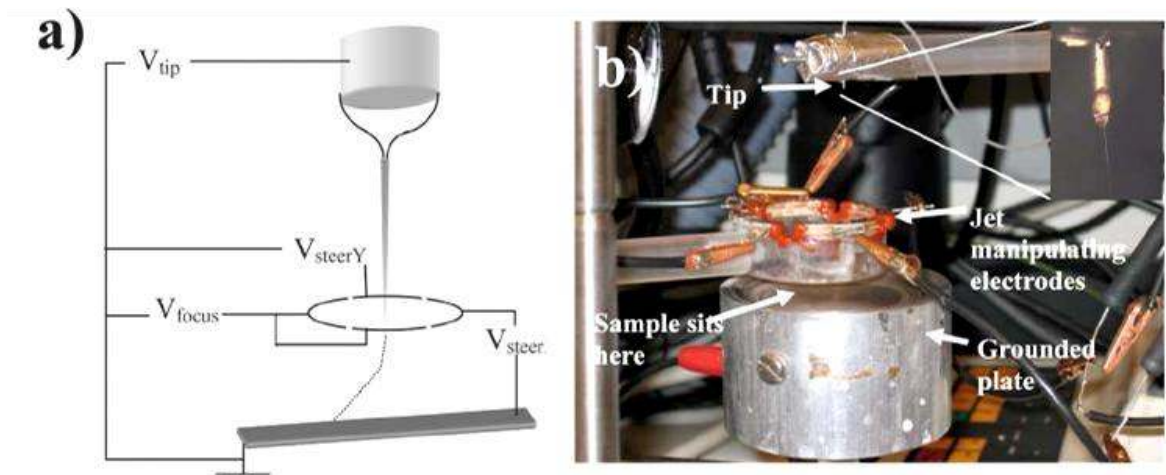
Şekil 1.19 Elektrik alan içersindeki polarize fiberin şematik gösterimi [20]

1.4.3 Odaklayıcı ve yönlendirici alanlar yardımı ile Elektrostatik Eğirme sisteminin kaotik hareketinin bastırılma çalışmaları

Elektrik alanın polimer jetlerinin kontrolü amacıyla kullanıldığı bir başka çalışma da Belan and Craighead [18] tarafından 2006 yılında gerçekleştirilmiştir. Araştırmada polimer çözeltisini barındıran şırınga ile toprak arasındaki bölgeye, jetlerin gösterdiği kaotik davranışı denetim altına almak için bir elektrot yerleştirilmiştir. Böylelikle daha küçük çaplarda fiber liflerinin kontrol edilebilir bir şekilde sentezi hedeflenmiştir. Sisteme eklenen elektrot aracılığıyla zamana bağlı değişen ikincil elektrik alan oluşturularak kamçılı bir davranış göstererek toplayıcı plakaya yönelen yüklü polimer jetlerinin yönlerinin değiştirilebilirliği araştırılmıştır.

Şekil 1.20.'de Belan and Craighead [18]'in tasarladığı düzeneğin şematik gösterimi ve fotoğrafı görülmektedir. Sistemde %20 derişimli PEO (Polyethylene Oxide) çözeltisi, şırınga pompası yardımı ile dakikada 2-3 μ l hızla 6 cm uzaklıkta bulunan toplayıcı plakaya doğru hareket ettirilmiştir. Çözeltiye 18kV değerinde yüksek gerilim uygulanmıştır.

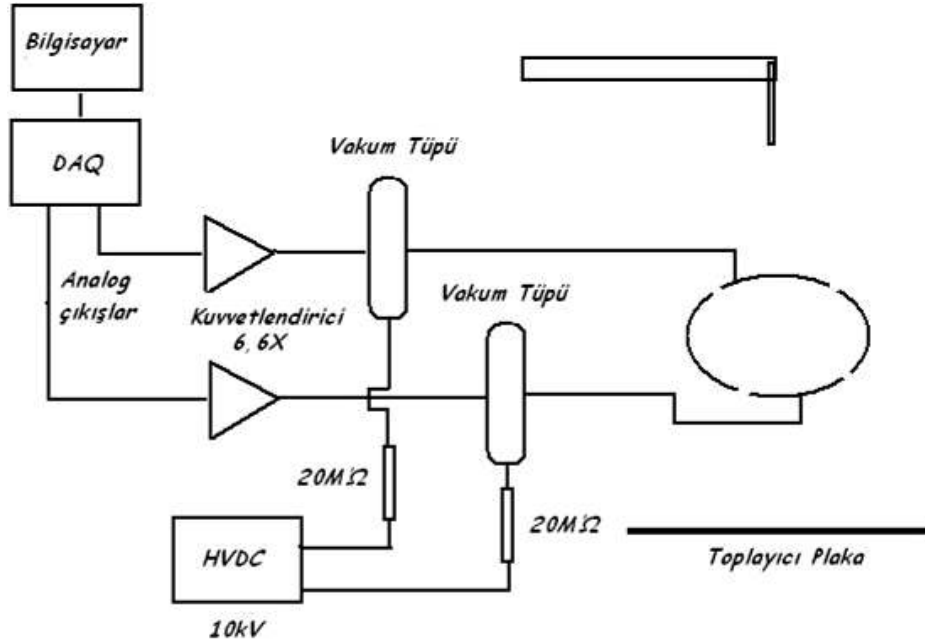
Yürütölen çalışmada standart elektrostatik eğirme yapısına ek olarak polimer çözeltisinin bulunduğu iğne ucundan yaklaşık 3.5cm uzaklığa, 3,5cm çapında ve üst kısmı 4 boğumdan oluşan bakır bir conta yerleştirilmiştir. Contanın 2 bölümüne polimer jetini odaklamak amaçlı yüksek DC gerilim uygulanırken diğör bölümlere jetin hareketini yönlendirmek için zamanla değışken gerilim uygulanmıştır. Sistemde jet hareket doğrultusunu uygulanan zamana değışken gerilim değıştirmektedir.



Şekil 1.20 (a) Şematik Elektrostatik eğirme düzeneği , (b) Düzenek fotoğrafı [18]

Çalışmada kullanılan odaklama/yönlendirme sistemi için iki farklı yapı oluşturulmuştur. İlk sistemde VTK (Veri toplama kartı) aracılığıyla bilgisayar üzerinden kontrol edilen 2 adet yüksek voltaj rölesi aracılığıyla odaklama gerilimi (10kV) ile toprak arasında anahtarlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan bakır conta kalınlığı ise 2mm olarak seçilmiştir.

İkinci yapıda ise daha yüksek jet saptırması elde etmek amacıyla conta kalınlığı 4mm'ye çıkarılmış ve Şekil 1.21'de verilen elektronik devre yapısı oluşturulmuştur. Sistemde VTK'nın analog çıkışları kuvvetlendirilerek vakum tüpüne bağlanmış ve yüksek gerilimin anahtarlanması için kullanılmıştır. Yüksek gerilim kaynağından gelen hat üzerine 20M Ω direnç konularak sistemden akan akım sınırlandırılmıştır. (Eklenen direnç, sistemin zaman yanıtına ait zaman sabitini 0.5ms ile kısıtlamıştır.)



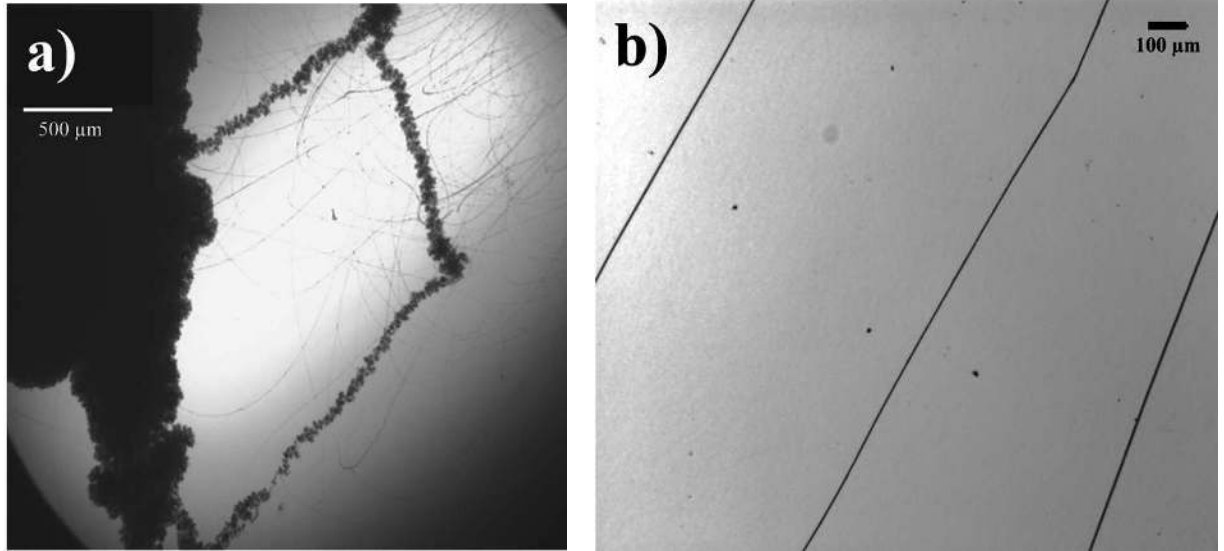
Şekil 1.21 Elektrostatik Eğirme polimer Jet yönlendirme düzeneği [18]

Deneyler sonucunda elde edilen fiber yapıları TEM ve Atomik Kuvvet Mikroskobu, AKM, (AFM, Atomic Force Microscope) kullanılarak görüntülenmiştir. Şekil 1.22.(a)'da ilk adımda oluşturulan elektronik odaklama/yönlendirme düzeneği kullanılarak elde edilen lif yığınları görülmektedir. Görüntüler incelendiğinde, toplayıcı plaka üzerinde karmaşık ağ oluşumunun devam ettiği ve jet hareketinin yeterince iyi bir şekilde yönlendirilemediği görülmüştür. Fiber lifleri makro düzeyde

belirli bir düzlemi takip etmelerine rağmen mikro düzeyde karmaşık bir yapıda dizilmişlerdir.

İkinci elektronik düzenek (Şekil 1.21) ile gerçekleştirilen deney sonuçlarının TEM görüntüleri incelendiğinde polimer jetinin yöneliminin iyileştirildiği gözlenmiştir (Şekil 1.22 (b)). TEM görüntülerinde yaklaşık 1cm uzunluğunda ve $\sim 1\mu\text{m}$ boyutunda oldukça doğrusal dizilime sahip fiber liflerinin oluştuğu görülmektedir.

Gerçekleştirilen gözlemler jetin istenen şekilde yönlendirilmesi amacıyla uygulanan döndürme hızının jetin toplayıcı plakaya doğru hareket hızından daha yüksek tutulması gerektiği ortaya koymuştur.



Şekil 1.22 (a) Odaklama/Yönlendirme ile elde edilen fiber lif yapısı (1. elektronik düzenek) **(b)** 2. elektronik düzenek [18]

Çalışma kapsamında tasarlanan elektrostatik eğirme sisteminde aşağıdaki kısıt ve sorunlar gözlenmiştir:

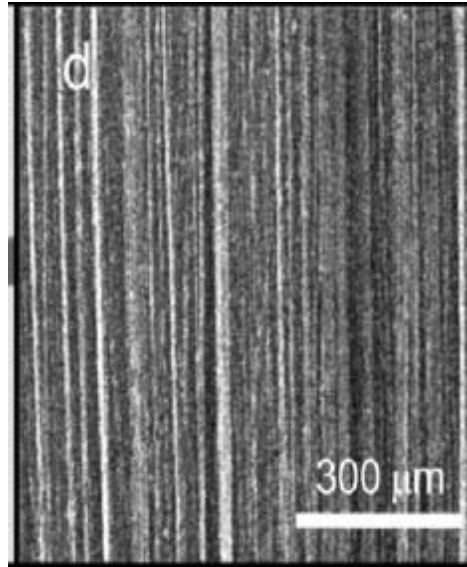
- VTK kartının sadece 1 kHz frekansına kadar kare dalga üretebilmesi daha yüksek frekansların kullanılmasını engellemiştir,
- Vakum tüplerinden akan akımı azaltmak amacıyla kullanılan direnç zaman sabitini 0.5ms civarında sınırlandırmıştır,
- Güç kaynağı ile uygulanan gerilim 18kV ve 10kV ile sınırlı kalmıştır,
- Şırınga iğnesinden saçılan polimer jet'inin kararlılığı kontrol altına alınmamıştır,

- Toplayıcı plakaya düşen yüklü parçacıkların boşalma süreleri 0.01-1 sn arası değiştiğinden bu durum fiber yapısının dizilimini olumsuz etkilemiştir,
- Bakır contanın çapı ve elektrik alanın şiddetine bağlı olarak fiber lifleri, tamamen sapmış ya da conta duvarlarına çarparak kontrolsüz bir dizilim oluşturmuşlardır.

Belan and Craighead [18]'in çalışmalarında elde ettiği sonuçlar yüksek gerilim altında yüklenen polimer jetlerinin yine başka bir elektrik alan oluşturan elektrot yardımı ile yönlendirilebileceğini göstermiştir.

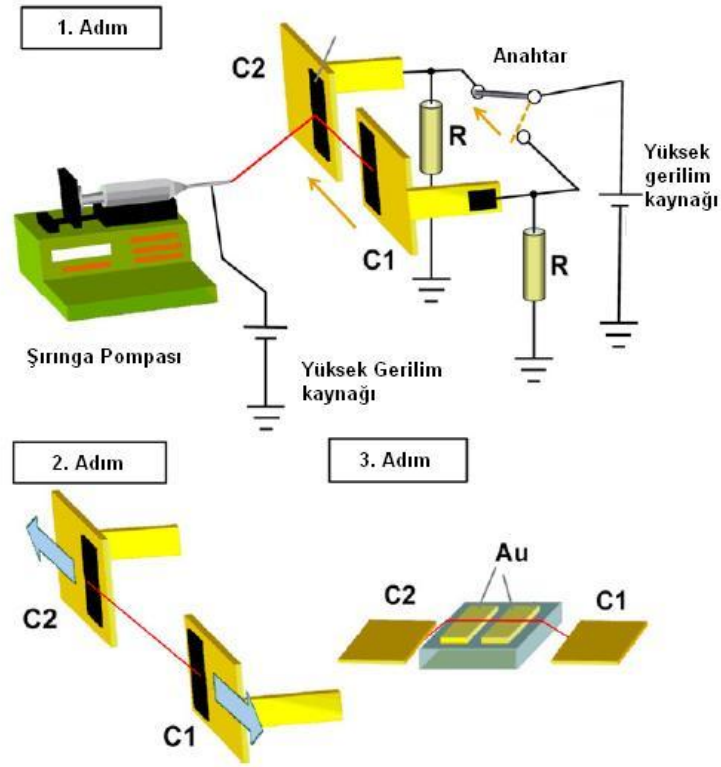
1.4.4 Hareketli ve farklı gerilim ile kutuplanan toplayıcı plakalar yardımıyla saçılımı azaltılmış fiber sentezi

Ishii et al. [11] fiber yapısının kontrol edilebilirliği üzerine gerçekleştirdikleri çalışma sonucunda tek eksenli benzeş dizilime sahip fiber yapıları elde etmişlerdir. Oluşturulan deneysel sistemde elektrostatik eğirme düzeneğinin toplayıcı bölümüne değişken davranış gösterebilen toplayıcı plakalar eklenerek, şırıngadan saçılarak ilerleyen polimer çözeltisinden Şekil 1.23.'de görülen yapıdaki nano lif oluşumu sağlanmıştır. Söz konusu araştırmada fiber ağ yapısının benzeşliği konusundaki ilerleme açıkça görülmektedir.



Şekil 1.23 Elektrostatik eğirme yöntemi ile paralel dizimli nano lif üretimi [11]

Çalışmada polimer çözeltisinin bulunduğu şırınga 6kV'lık bir gerilim kaynağı ile yüklenmiştir. Toplayıcı ile şırınga arasında 10cm'lik bir mesafe bırakılmış ve şırınga pompasının hızı 0.5l/saat olarak ayarlanmıştır. Düzeneğin literatürde yer alan diğer araştırmalardan ayrıran bölümü ise Şekil 1.24'deki şematik çizimde görülen iki farklı paslanmaz çelik malzemeden oluşan bir toplayıcı kısma sahip olmasıdır (C1 ve C2). Toplayıcılardan biri ikinci bir gerilim kaynağı ile (~500V) yüklenirken diğeri mekanik anahtar yardımı ile R direnci üzerinden topraklanmıştır. Deney sırasında polimer jetlerinin yüksek gerilime sahip olan toplayıcı plakalara yöneldiği gözlenmiştir. Mekanik anahtar yardımı ile C1 ve C2 plakaları arasında gerilim değişimi sağlanarak her iki plaka arasında fiber lif yapısı oluşturulmuştur. Oluşan yapı Şekil 1.24'ün ikinci adımında tariflenen germe işlemi ile fiber kalınlığının inceltilmesi sağlanmıştır. Bu iki adım sonunda 1 μ m ve altında kalınlığa sahip Şekil 1.23'de görülen dizilime sahip nano lifler elde edilmiştir.

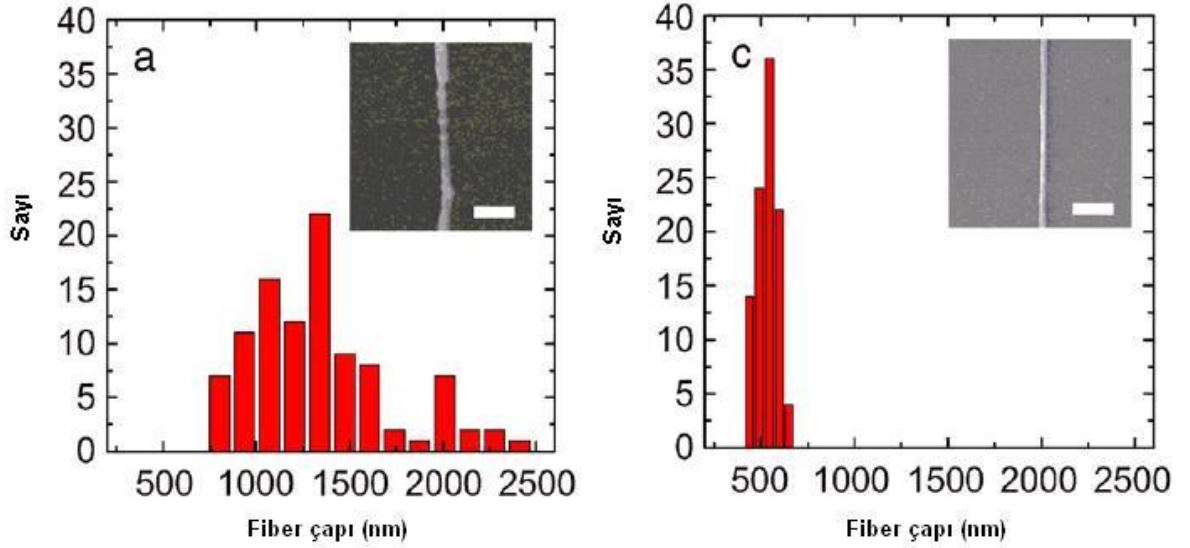


Şekil 1.24 Elektrostatik eğirme sistemi [11]

Şekil 1.25'de toplayıcı plakalar üzerinde gözlenen fiber kalınlılarının TEM yardımı ile yapılan ölçümlerin histogramları gösterilmiştir. Toplayıcılar arasında 50mm'lik bir germe uygulandığında standart eğirme sistemine oranla sentezlenen fiber

aplarında önemli oranda azalma görülmüştür. (Fiber kalınlıklarının dağılımı 750nm – 2500nm aralığından 500nm – 750nm aralığına indirgenmiştir).

Ishii et al. [11] yürüttüğü bu çalışma neticesinde, Elektrostatik eğirme tekniği ile elde edilen, nano lif yapılarının dizilim ve kalınlıklarının kontrol edilebilirliği konusunda önemli sonuçlar elde edilmiştir.



şekil 1.25 Toplayıcı plakalar üzerinde elde edilen fiber çapları **(a)** germe işlemi uygulanmamış, **(b)** germe işlemi uygulanmış [11]

Gerçekleştirilen tez çalışmasının ilk aşamasında zgn Elektrostatik Eğirme düzeneği tasarlanmış ve üretilmiştir. İkinci adımda Elektrostatik Eğirme yapısının malzeme ve sistem kaynaklı değişenkenlerin detaylı olarak analizlerinin olanaklı kılınması amacıyla, tasarım modelinin teorik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın nc aşamasında bir önceki adımda teorik modeli kurgulanan silindirik yardımcı elektrotlu eğirme sisteminin bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Son bölümde ise standart ve tasarlanan Elektrostatik Eğirme sistemleri kullanarak deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar teorik model ve literatür çalışmaları ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

2. ELEKTROSTATİK EĞİRME DÜZENEGİ TASARIMI

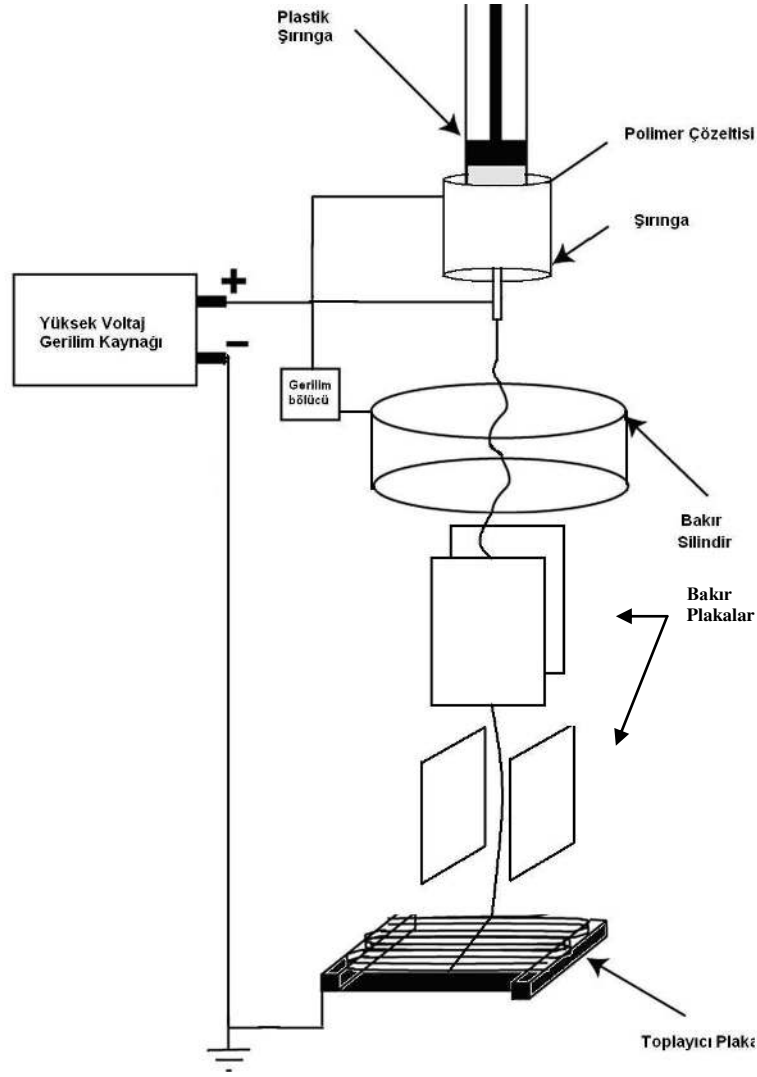
Elektrostatik Eğirme sistemi yapısı temelde yüksek gerilim kaynağı ve basit bir yönlendirme düzeneğinden oluşmaktadır. Bu sistemlerin uluslararası markette standartlaşmamış olması ve farklı araştırmalar için gereksinim duyulan yapısal esneklikten yoksun olmaları nedeniyle tez çalışması kapsamında özgün sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem tasarımı mekanik ve elektronik olmak üzere iki ana başlık altında incelenmiştir.

2.1 Mekanik Tasarım

Elektrostatik eğirme sisteminin mekanik bölümleri: Şırınga ve iğnesi, yüksek hassasiyette düşük hızda akış sağlayabilen pompa, toplayıcı ve ikincil elektrik alan oluşturan plakalar, kablo tutucuları, yükseklik ayarlanabilir laboratuvar ayaklığı ve sistemin dış etmenlerden etkilenmesini en aza indirmek için kullanılan koruyucu kaptan oluşmaktadır. Şekil 2.1.'de tasarlanan sisteme ait şematik çizim görülmektedir.

Literatür incelemelerinde elektrostatik eğirme sistemlerinde çok sayıda polimer çözeltisinin farklı farklı derişimlerde kullanıldığı görülmüştür. Bu nedenle tasarlanan özgün düzenek yapısında kullanılan polimer çözeltisi ve şırınga gibi çevresel birimlerin seçimi önem teşkil etmektedir. Polimerin düşük ısıda kolay çözülebilen bir yapıda olması ve ilk hareketin başladığı şırınganın polimerlerle tepkimeye girmemesi gerekmektedir. Bununla birlikte şırınganın yüksek tork değerlerine sahip bir şırınga pompası tarafından hareket ettirileceği göz önüne alarak sağlam bir yapıya sahip olması yapılacak olan seçiminde önemlidir. Bu amaçla ilk etapta 10 ve 20 cc'lik çelik şırıngalar tercih edilmiştir.

Elektrostatik eğirme işleminde önemli noktalardan biri de iğnenin polimerin yüksek gerilimle yüklenebilmesi için iletken bir malzemeden imal edilmesi ve kesit alanının yeterli polimer akışkanlığı sağlayabilecek özellikte olmasıdır. İğnenin bu özellikleri, oluşacak olan Taylor konisi yapısını ve toplayıcı plakada birikecek olan nano fiberin homojenliğini etkilemektedir. Bu doğrultuda başlangıç olarak 0.3mm kalınlığında şırınga iğnesi tercih edilmiş ve yüksek gerilim kaynağına iğne ucundan bağlanmıştır.



Şekil 2.1 Elektrostatik Eğirme sistemi

Sistemin toprağını oluşturan alüminyum plaka ise aynı zamanda polimer nano liflerin toplanacağı plakadır. Tasarlanan sistemde toplayıcı plakası sabit yalıtkan bir yüzeyin üzerinde sabit durmaktadır fakat şırınga sistemi laboratuvar ayaklığı üzerinde yüksekliği ayarlanabilir şekilde sabitlenmiştir. Böylelikle değişken toplayıcı plaka-şırınga ucu mesafeleri oluşturularak yükseklik değişiminin fiber çapları ve dizilimi üzerindeki etkileri incelenebilmiştir.

Polimer çözeltileri çok yüksek hızlarda şırınga ucundan ayrıştığında toplayıcı plakalar üzerinde nanometre kalınlığında lif yapıları oluşturamamaktadır. Bu nedenle akış hızları ml/saat seviyesinde olan pompalama sistemine gereksinim duyulmaktadır. Böyle bir düzenek redüksiyonlu DC motor ve bu motor tarafından sürülen sonsuz dişli sistemi ile elde edilmiş ve oluşturulan sistemin bulunduğu

bölümde zemine paralel olarak monte edilmiştir. Polimer çözeltisinin taşınması ise kılcal boru yardımıyla gerçekleştirilmiş ve laboratuvar ayaklığındaki iğneye bağlanmıştır.

Elektrostatik eğirme düzeneğinde toplayıcı plaka olarak ise aynı zamanda yüksek gerilim kaynağını topraklanmasında da kullanılabilecek olan alüminyum bir levha tercih edilmiştir. Literatürde yer alan pek çok çalışmada da toplayıcı malzeme olarak alüminyumun tercih edildiği görülmüştür. Deneysel gözlemlerde buna benzer bir şekilde, TEM görüntülemelerin de kolaylıkla yapılabilmesi için, özel olarak kesilen cam bir parça alüminyum folyo ile kaplanarak toplayıcı plaka olarak kullanılmıştır.

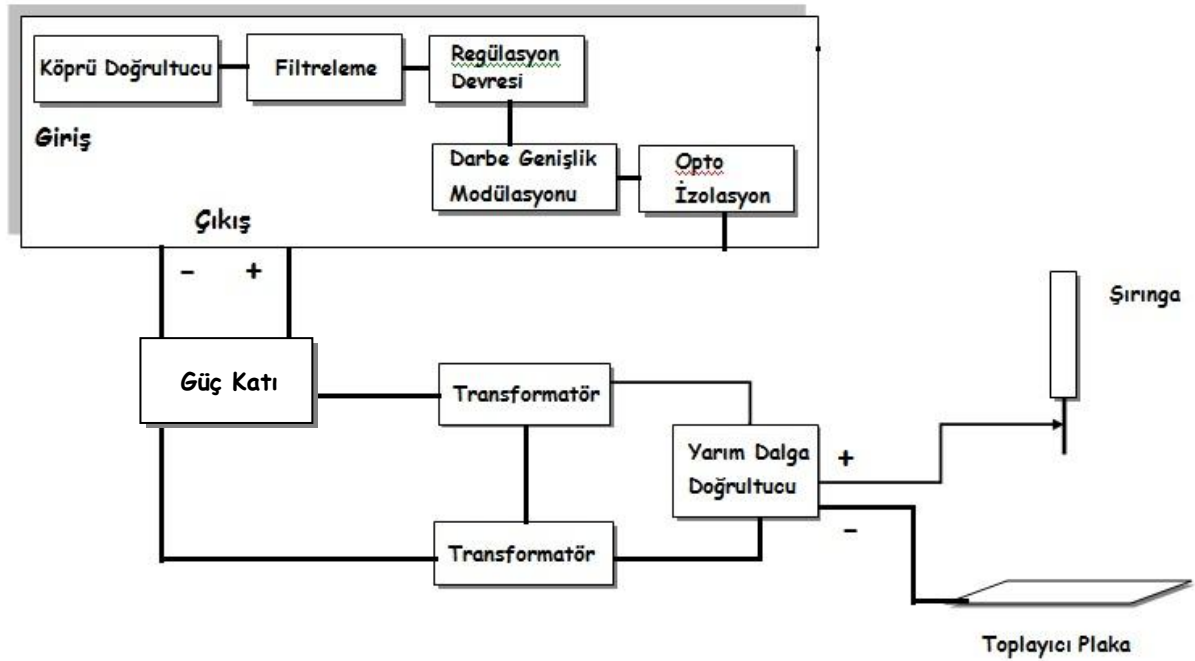
Kablo tutucuları, yüksek gerilimden dolayı önem kazanmaktadır. 6–20 KV seviyesindeki gerilimlerin taşınması için en az 3–4 mm et kalınlığına sahip silikon yalıtımlı kablolar kullanılmış ve bunların arasında havada oluşabilecek olan deşarjlara karşı birbirinden yeterince uzak (en az 10KV/15mm) olmasına dikkat edilmiştir.

Elektrostatik eğirme düzeneğinde yüklü polimer moleküllerinin iletim ortamının hava olması nedeniyle dış etmenlerdeki değişikliklerden etkilenmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu nedenle sistemin laboratuvar ortamında ve kontrollü bir şekilde yapılması önem arz etmektedir. Tasarlanan sistemde iletim ortamının yalıtılması amacıyla saydam bir tür plastik türevi malzeme kullanılarak kapaklı bir koruyucu düzenek imal edilmiştir.

İkincil elektrik alanlar ise iki farklı plaka yapısı kullanılarak oluşturulmuştur. Fiber saçılımının bastırılması amacıyla içi boş ve sonlu uzunluktaki silindirik iletken bakır levhalar standart sistemle bütünleştirilmiştir ($r_{silindir} = 1 \sim 10 \text{ cm}$, $l_{silindir} = 1 \sim 5 \text{ cm}$). Silindirik levhalar yüksek gerilim kaynağı üzerinden gerilim bölücü kullanılarak farklı voltaj değerleri ile yüklenmiştir. Düzenli ağ oluşumunun gerçekleştirilmesi için ise polimer jetinin hareket eksenine doğrultusuna paralel ve birbirlerine dik paralel bakır plakalar kullanılmıştır ($l_{plaka} = 7.5 \sim 15 \text{ cm}$, $w_{plaka} = 1 \sim 2 \text{ cm}$). Plakalar üzerine düşen gerilim farklı bir yüksek gerilim üreticinden elde edilmiştir [43].

2.2 Elektronik Bölümler

Tüm Elektrostatik Eğirme sistemleri temelde yüksek gerilim güç kaynağı aracılığıyla oluşturulan elektrostatik alan ile polimer çözeltisinin yönlendirilmesi esasına dayanmaktadır. Eğirme sisteminin elektronik olarak en temel bölümü ise yüksek gerilim güç kaynağıdır. Özgün olarak üretilen güç kaynağı ile DC yüksek gerilim beslemesi olarak 20KV_{DC}'a kadar olan değerler elde edilebilmektedir. Sistemin şematik çizimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Tasarlanan yüksek gerilim kaynağı, doğrultma bölümü, kontrol kartı bölümü, güç kartı ve yüksek gerilim olmak üzere dört ana bölüm altında incelenebilir.



Şekil 2.2 Güç kaynağı şematik diyagramı

2.2.1 Doğrultma bölümü

Bu bölümde yüksek gerilim kaynağı içerisinde bulunan güç katı ve kontrol katını beslemek amacıyla AC gerilimi DC gerilime çeviren birbirinden bağımsız iki adet güç kaynağı devresi tasarlanmıştır.

Güç katı için tasarlanan besleme devresi transformatör, köprü diyot ve kapasitelerden oluşan ve yaklaşık 300W gücünde, 40-50V değerinde gerilim üreten basit bir kaynaktır. Kontrol ünitesi için tasarlanan güç kaynağı ile oluşturulan besleme gerilimi ise güç katı bölümünde kullanılan her bir N kanal

MOSFET'in birbirinden elektriksel olarak izole edilmiş olarak sürülmesi gerektiğinden birbirinden bağımsız 5 sargıdan oluşan bir transformatör yardımı ile elde edilmiştir.

Elde edilen gerilimleri doğrultmak üzere ise her sargıda ayrı bir köprü doğrultucu, süzgeç kapasitörü ve gerilim düzenleyici kullanılmış, böylelikle birbirinden bağımsız beş ayrı güç kaynağı elde edilmiştir. Her bir sargı $15V_{AC}$ ve yaklaşık 1 A verebilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu kaynaklardan bir tanesi kontrol kartını beslemek, diğerleri ise optik yalıtımlı MOSFET sürücülerini beslemek için kullanılmıştır.

2.2.2 Kontrol kartı bölümü

Kontrol kartı bölümü temelde anahtarlama güç kaynakları için tasarlanmış bir tümleşik devre olan LM3524 entegresinin darbe genişlik modülatörü olarak kullanılması esasına dayanmaktadır. LM3524 tümleşik devresi kendi üzerinde dışarıdan ayarlanabilir bir osilatör bulundurmaktadır. Osilatörün çalışma frekansı dışarıdan 6 ve 7 nolu pinler üzerinden bağlanan direnç ve kapasitörler aracılığı ile belirlenir. (Şekil 2.3). Entegre yapısının katalog bilgisi EK-1'de verilmiştir.

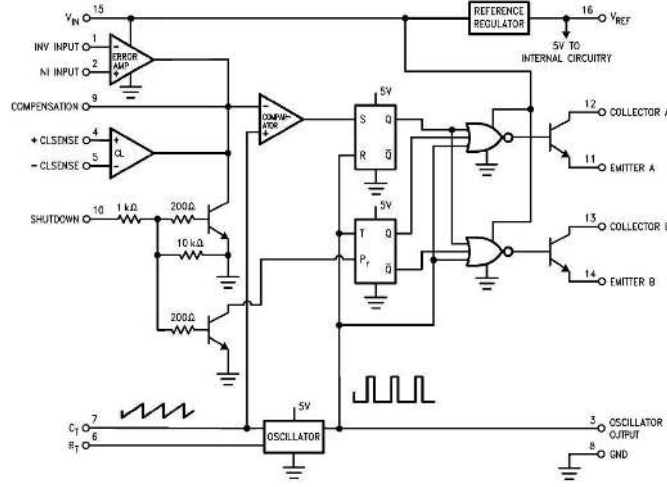
Çalışma frekansının direnç ve kapasite ile değişimi yaklaşık olarak aşağıdaki ifade ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$f_{osc} \approx \frac{1}{R_T C_T} \quad (2.1)$$

Teorik hesaplamalardan yola çıkılarak LM3524 tüm devresine 10nF ve 100k Ω trimpot bağlantısı yapılmış (Şekil 2.4) ve sistemin frekansının 1kHz-50kHz arasında değişmesi sağlanmıştır.

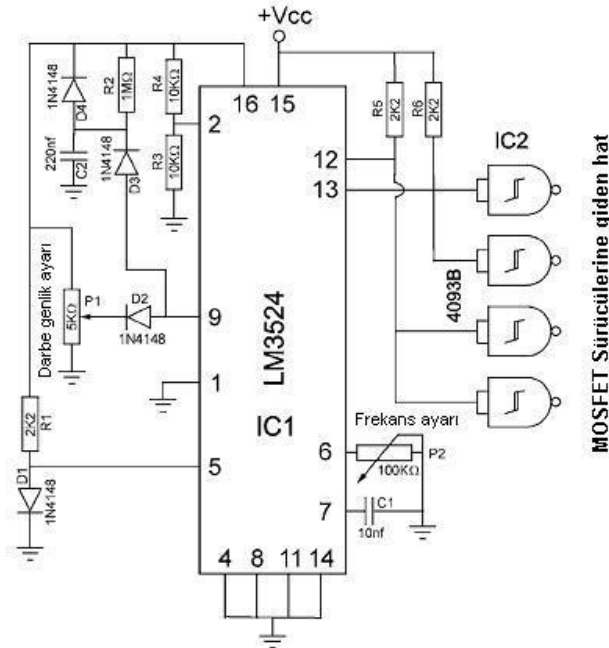
Kullanılan tümleşik devrede hata kuvvetlendiricisi çıkış direncinin 5M Ω gibi yüksek bir değerde olması nedeniyle, oluşturulan devre yapısına bağlı olarak devre dışı bırakılabilir. Tasarlanan kontrol kartı devresinde sabit ve maksimum darbe-genişlik oranı elde etmek amacıyla tümleşik devrenin bu özelliğinden faydalanılmıştır. Tümleşik devrenin hata kuvvetlendiricisi, girişlerine uygulanan sabit DC gerilim

yardımla, bypass edilmiş ve darbe genişlik oranının elle kontrolünün sağlanabilmesi için 9 nolu kompanzasyon girişine trimpot bağlanmıştır (Şekil 2.4).

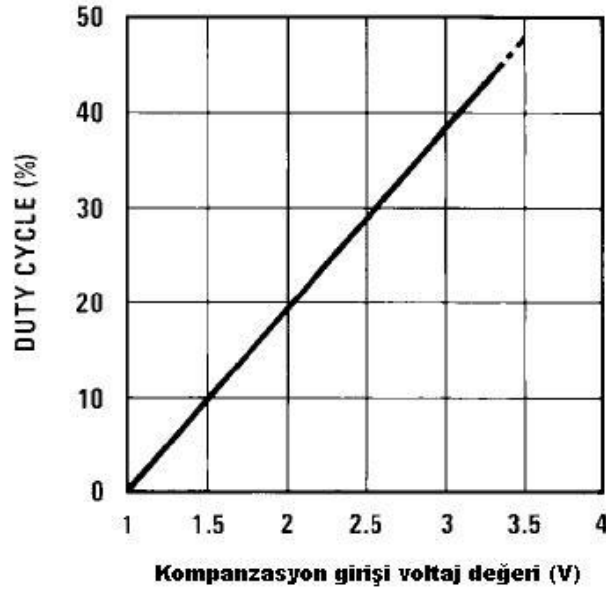


Şekil 2.3 LM3524 devre şeması [22]

Böylece darbe-genişlik modülasyonu regülasyon amaçlı değil, gücün istenilen değere elle ayarlanabilmesi için kullanılmıştır. Darbe-genişlik oranı, açılıp kapanma sırasında anahtarlama elemanlarının birbirini kısa devre etmemesi için, maksimum olarak %45 değerinde tümleşik devre üreticisi tarafından sınırlandırılmıştır. Şekil 2.5.'de kompanzasyon girişine uygulanan voltaj ile darbe-genişlik oranı değişimi “duty cycle” görülmektedir.



Şekil 2.4 Kontrol ünitesi devre şeması



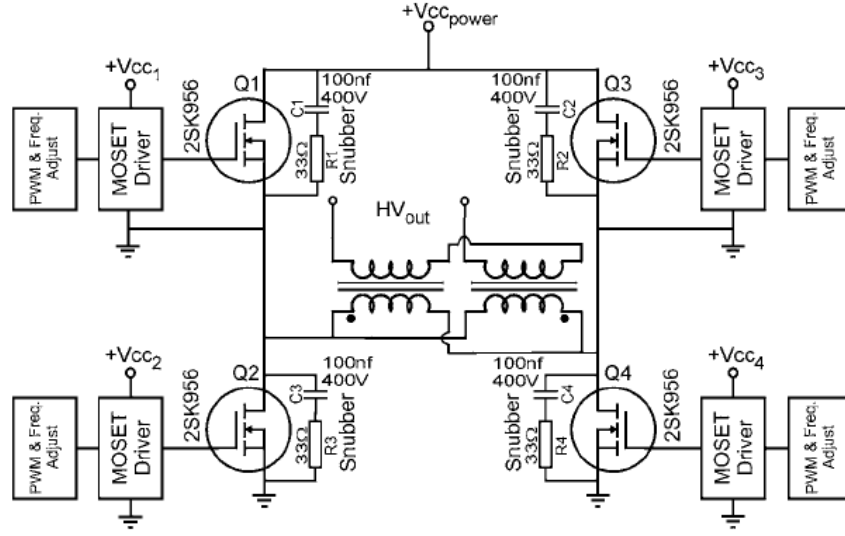
şekil 2.5 Kompanzasyon girişindeki gerilim, darbe-geşişlik oranı değeri [22]

Üretilen darbe-geşişlik sinyali tümleşik devre içindeki bir mantık devresi aracılığı ile aralarında 180° faz farkı bulunan iki çıkıştan dışarı verilmektedir. Bu sinyal faz farkını bozmayacak şekilde, tampon olarak kullanılan bir VEDEĞİL (4093B) kapısını beslemektedir. Ayrıca bu mantık kapılarının çıkışları da yarım köprü eşlenik anahtarlama düzenine sahip olduğu için kapasitif yüklerin şarj ve deşarj edilmesi, tırmanma ve inme zamanının iyileştirilmesi açasından kullanım kolaylığı sağlar. Bu da optik yalıtım elemanlarında ışık kaynağı olarak kullanılan LED'in hızlı açılıp kapanması için önemlidir.

2.2.3 Güç kartı bölümü

Anahtarlama yöntemi ile çalışan yüksek gerilim üretcinin güç katında, anahtarlama tekniğinde tam köprü olarak bilinen devreden yararlanılmıştır. Bu bölümün çalışma prensibi şekil 2.6'da verilmiştir. Optik yalıtımlı MOSFET sürücüler, kontrol, güç ve yüksek gerilim katlarını fiziksel olarak birbirinden ayırır. MOSFET'lerin girişi tamamen kapasitif davrandığı için, önceki bölümde anlatıldığı gibi hızla şarj ve deşarj edilmeleri gerekir. MOSFET'lerde tırmanma ve inme zamanları kayıp enerji miktarını artırmaktadır. Bu enerji transistörler üzerinde ısı enerjisine dönüşerek anahtarlama elemanlarının sıcaklığının hızlı ve aşırı bir şekilde artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle optik sürücülerin çıkışı da yarım

köprü düzeninde üretilmiştir. İstenmeyen kapasitanslar yüzünden ani yüksek gerilim değerleri transistörlerin kolaylıkla bozulmasına neden olmaktadır.



Şekil 2.6 Güç kartı bölümü

Bu nedenle kullanılan MOSFET'ler 40-50V gerilim altında çalışmasına rağmen 800V, 9A yük altında çalışabilecek özellikte seçilmişlerdir. Bu da yeterli olmadığından ayrıca (snubber) olarak bilinen RC süzgeçleri her MOSFET'e bir filtre paralel olacak şekilde bağlanmışlardır. Şekil 30.' da verildiği gibi Q1–4 mosfetleri aynı anda iletimdeyken Q2–3 mosfetleri kesimdedir. Daha sonra Q1–4 mosfetleri kesime, Q2–3 mosfetleri iletime geçmektedir [13]. Böylece transformatörler üzerinden sürekli birbirine zıt yönde akım geçmesi sağlanmıştır.

2.2.4 Yüksek gerilim bölümü

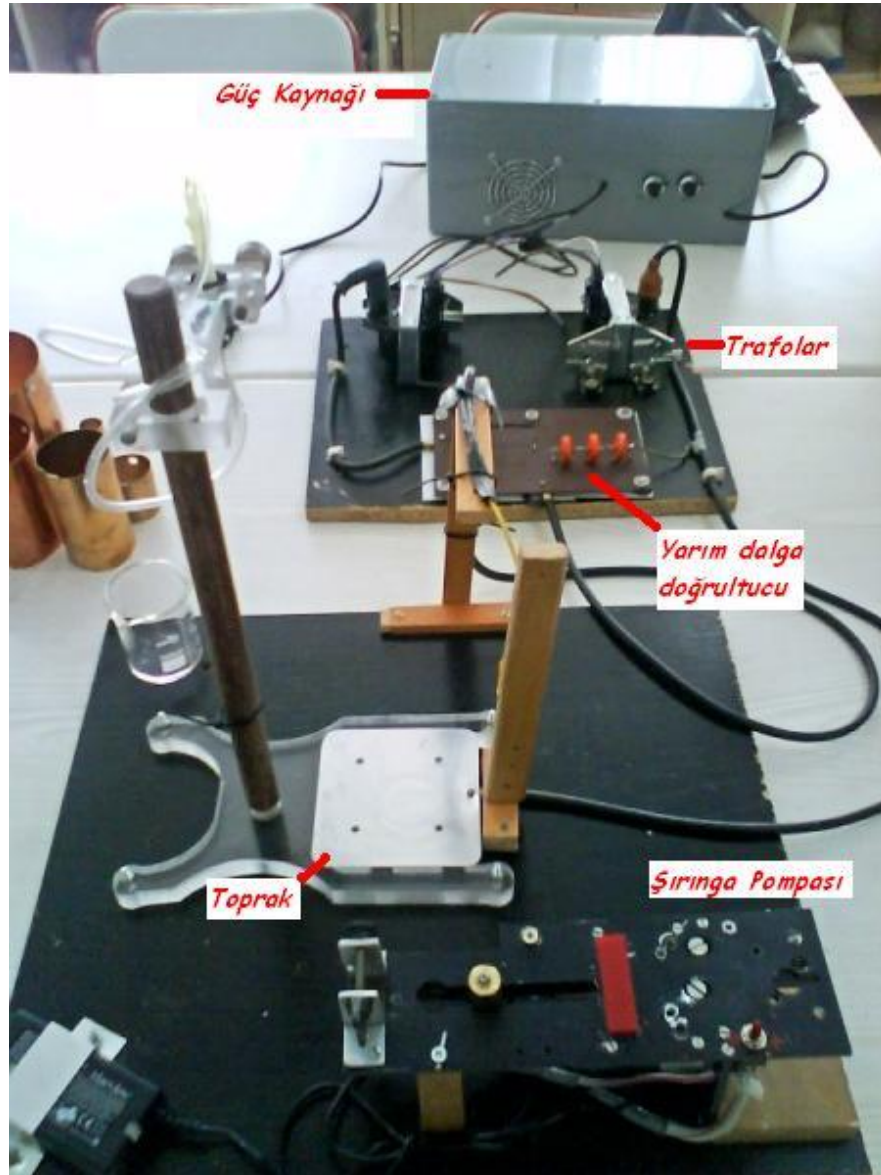
Bu bölümün tasarımında yüksek gerilim elde edilmesi amacıyla otomotiv endüstrisinde kullanılan 1:100 sarımlı transformatörler kullanılmıştır. Bu tür bobin yapılarında izolasyon açısından sağladıkları avantajlar nedeniyle polimer kaplama kullanılmaktadır. Güç kartı çıkış gerilimin 50 volt olduğu düşünüldüğünde bobin çıkışında tek bir transistör için 5000V gerilim elde edilebilmektedir. Daha sonra tam köprü güç yükselteci yapısıyla ve iki transformatörün seri bağlanmasıyla çıkışta elde edilen sinüzoidal gerilim tepeden tepeye 20kV olarak hedeflenmiştir.

Bu üretilen yüksek gerilim sinyali alternatif olduğundan, ek olarak, 3 adet (1nf, 20kV) yüksek gerilim kapasitesi ve 4 adet (16kV) diyot aracılığıyla oluşturulan

yarım dalga doğrultucu ile doğru akım sinyaline dđnüştürölmüşdür. Oluşabilecek en büyük akımı sınırlamak için yüksek güçlü 110 M Ω değesinde direnç toplayıcı plaka ile toprak arasına bağlanmıştır. Eklenen direnç zaman sabitini 37 ms ile sınırlandırmıştır.

2.3 Sistem Kurulumu

2.1. ve 2.2. bölümlerinde tasarım aşamaları özetlenen Elektrostatik Eğirme düzeneğinin temel bileşenleri Şekil 2.7.'de görölmektedir. Yardımcı alan plakaları gerçekleştirilen deney kurgusuna göre kullanıldığı için görüntüde yer almamaktadır.



Şekil 2.7 Elektrostatik Eğirme Düzeneğı

Sistem kurulumu aşamasında deneysel yapı tarafından üretilen yüksek gerilimin dış ortamdan yalıtılması amacıyla transformatörler yalıtkan bir malzemeden üretilen plaka üzerine monte edilmişlerdir. Ayrıca deneysel çalışmalar sırasında fiber saçılımının hava dolaşımı gibi bozucu etmenlerden korunması amacıyla sisteme yalıtkan koruyucu fleksi-glas kap eklenmiştir.

Yüksek gerilim kaynağından elde edilen voltaj değerlerinin ölçülmesi amacıyla Tektronix firmasına ait 20kV 'a kadar ölçüm alabilen yüksek voltaj probu düzeneğe dâhil edilmiştir.

Ayrıca sistemin gösterdiğini değişimin incelenmesi amacıyla Tektronix firmasına ait (TDS 2002) osiloskop yardımı ile ölçümler alınmıştır. Tüm deneysel çalışmalar Başkent Üniversitesi laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.

3. ELEKTROSTATİK EĞİRME TEKNİĞİNİN MODELLENMESİ

Elektrostatik eğirme sistemlerinde kullanılan polimer çözeltilerinin hareket yörüngeleri boyunca gösterdikleri davranış, uygulanan elektrik alanın etkisiyle karmaşık bir yapıda olmaktadır [24]. Kaotik yapı, çözeltilerde eriyik halde bulunan polimer moleküllerin yüksek gerilim ile kutuplanarak akışkanları bir arada tutan yüzey gerilim kuvvetini aşmasıyla birlikte ortaya çıkmaktadır. Bu oluşum akışkanlara ait matematiksel model yapıları ve elektrostatik alan denklemlerinin ortak çözümü ile modellenenebilir. Elektrik alanın etkisi altında toplayıcı plakaya doğru yönelen polimer jeti, kütle, momentum ve yük korunumu kanunlarına uygun hareket etmektedir.

Polimer jet hareketinin modellenmesi, deneysel çalışmalar ile gözlenmesi oldukça zor olan malzeme ve sistem kaynaklı değişkenlerin detaylı olarak analiz edilmesini olanaklı kılacaktır. Bunun yanı sıra oluşturulacak model yapıları, kaotik harekete neden olan parametrelerin çözümlenerek istenen yapıda ve özellikteki nano liflerin sentezlenmesinde önemli kazanımlar sağlayacaktır.

Polimer jetinin matematiksel ifadesi, akışkan yapının birbirlerine seri bağlı yapıdaki parçacıklardan oluştuğu yaklaşımı kullanılarak çıkarılabilir. Parçacık yaklaşımı, akışkan yapıların ağıdalık (viscosity), esneklik ve form değişimleri gibi özelliklerinin modellenmesinde başarılı bir şekilde uygulanmıştır [24].

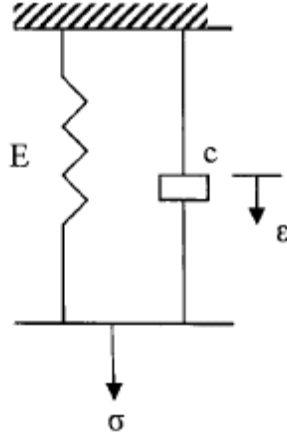
3.1 Parçacık Yapısının Modellenmesi

Parçacık modeli, temelde bir yay ve buna seri ya da paralel bağlı sönümlü amortisörün bir araya gelmesinden oluşmaktadır. Yay jetin esneklik, sönümlü amortisör ise ağıdalık, karakteristiğini sembolize etmektedir [25]. Kuvvetin seri bağlı yapılarda ortak, uzanım (strain) ise toplamsal olduğundan yola çıkarak parçacık yapısı için birkaç farklı model oluşturulabilir.

3.1.1 Kelvin-Voigt modeli

Kelvin-Voigt modeli, yay ve sönümlü amortisörün paralel olarak bağlanması ile elde edilen ve visko-elastik malzemelerin karakteristik davranışlarını sembolize

eden bir yapıdır. Sönümlü amortisör malzemenin ağırlık, yay ise esneklik özelliklerini betimlemektedir (Şekil 3.1).



Şekil 3.1 Kelvin-Voight parçacığı

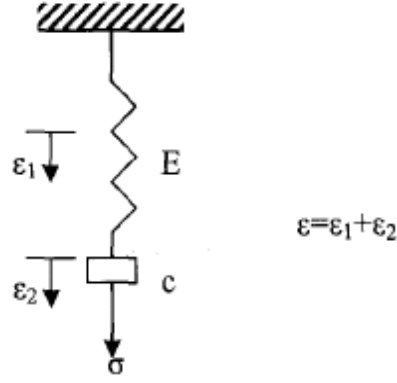
Akışkan olmayan (inviscid) ideal sıvıların modellenmesinde kullanılan sönümlü amortisörün stres ifadesi; ε uzama, c sürtünme katsayısı olmak üzere $\sigma = c \frac{d\varepsilon}{dt} = c \dot{\varepsilon}$, şeklinde verilir. Sistemin elastiklik özelliklerini modelleyen yay için ise gerilme ifadesi ise E elastik modülüs olmak üzere $\sigma = E\varepsilon$, şeklinde verilir. Model yapısında kuvvetin toplamsal, uzanımın ise ortak olduğu göz önünde bulundurularak Kelvin-Voight modelinin matematiksel ifadesi [44];

$$\sigma = c \frac{d\varepsilon}{dt} + E\varepsilon, \quad (3.1)$$

şeklinde verilir.

3.1.2 Maxwell Modeli

Maxwell modeli, yay ve sönümlü amortisörün seri olarak bağlanması ile elde edilen ve Kelvin-Voight modelinde benzer şekilde visko-elastik malzemelerin karakteristik davranışlarını sembolize eden bir yapıdır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2 Maxwell Parçacığı

Seri bağlı yapıda kuvvetin ortak ve uzanımın toplamsal ($\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$) olduğunda yola çıkarak modelin stres ifadesi;

$$\sigma + \frac{c}{E} \dot{\sigma} = c \dot{\varepsilon} \quad (3.2)$$

şeklinde verilir.

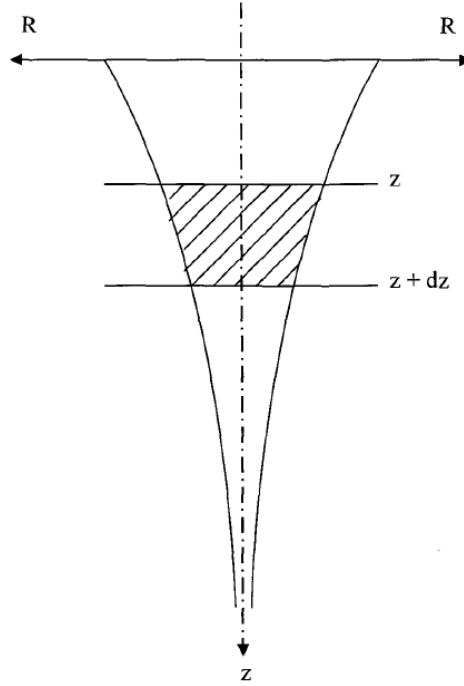
Her iki model yapısı incelendiğinde; Maxwell parçacığı, polimer jetinin hareket yörüngesi boyunca küçük bozulmalar ve sürekli uzanım (elongation) özelliği göstermesi nedeniyle, Elektrostatik eğirme sistemi davranışının incelenmesinde daha yüksek başarımlı sonuçlar vermiştir [24].

3.2 Kütle Korunumu

Akışkan hareketi doğrultusunun herhangi bir bölgesinde seçilen kontrol hacmine, birim zamanda giren ve çıkan kütle miktarı birbirine eşittir.

Şekil 3.3'deki gibi herhangi bir t anında polimer çözeltisine ait bir kesit alan seçildiğinde z ve $z+dz$ alanları arasında yer alan bölgedeki kütle $m = \rho \pi R^2 dz$ ile ifade edilebilir. Kütle korunumu ifadesi m 'in zamana bağlı değişiminin 0 olduğunu söylemektedir ($dm/dt=0$). Katılardan farklı olarak akışkanların hareket eksenini boyunca zamana bağlı türev ifadesi akışkanın hareket doğrultusu ve konumuna bağlı olarak değişmektedir [25]. Bu nedenle kütlenin zamana bağlı değişiminin

türev ifadesi, materyal türevi (*Material Derivative*) olarak adlandırılan matematiksel eşitlik kullanılarak oluşturulur.



Şekil 3.3 Polimer Jetine ait kesit alan [25]

Materyal Türev: Herhangi bir akışkan parçacığının (A) hız ifadesi $x_A(t)$, $y_A(t)$, $z_A(t)$, parçacık koordinatları olmak üzere (3.1)'deki gibi verilir;

$$V_A = V_A[x_A(t), y_A(t), z_A(t), t] \quad (3.3)$$

Zincir türev özelliği kullanılarak parçacıkların ivme ifadesi oluşturulursa;

$$a_A(t) = \frac{dV_A}{dt} = \frac{\partial V_A}{\partial t} + \frac{\partial V_A}{\partial x} \cdot \frac{dx_A}{dt} + \frac{\partial V_A}{\partial y} \cdot \frac{dy_A}{dt} + \frac{\partial V_A}{\partial z} \cdot \frac{dz_A}{dt} \quad (3.4)$$

elde edilir. İvme ifadesinde parçacığın x, y, z koordinatlarına ait hız denklemleri (3.4)'de yerine yazılırsa ($u_A = \frac{dx_A}{dt}$, $v_A = \frac{dy_A}{dt}$, $w_A = \frac{dz_A}{dt}$) materyal türev eşitliği türetilir;

$$a = \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{DV}{Dt} \quad (3.5)$$

(3.5) nolu denklemde hızın zamana bağlı değişimi kullanılarak türetilen materyal türevi ifadesi, akışkanlara ait *kütle*, *zaman*, v.b. birçok değişkenin analizine uygulanmaktadır [25].

Materyal türevi ifadesi, kütleinin zamana bağlı değişiminin analizi amacıyla yazılırsa, (u, v, w hızın Kartezyen koordinat bileşenleri olmak üzere).

$$\frac{Dm}{Dt} = \frac{\partial m}{\partial t} + u \frac{\partial m}{\partial x} + v \frac{\partial m}{\partial y} + w \frac{\partial m}{\partial z} \quad (3.6)$$

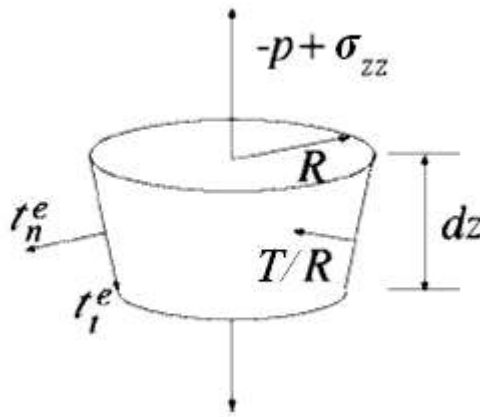
şeklini alır.

Kütleinin zaman bağılı değişimi (3.6) nolu denklem kullanılarak çözüldüğünde kütle korunumu aşağıdaki şekli alır;

$$\frac{\partial R^2}{\partial t} + \frac{\partial w R^2}{\partial z} = 0 \quad (3.7)$$

3.3 Momentum Korunumu

Akışkanın yeterince küçük bir kesit alanındaki momentum değişimi giriş ve çıkış yüzey alanlarındaki moment ve basınç kaynaklı kuvvetler arasındaki ilişki ile ifade edilir ($\Delta_t M = M_{in} - M_{out} + M_z - M_{z+dz}$). Polimer jeti z eksenini doğrultusunda hareket eden akışkan olarak modellenirse jete etki eden normal ve yanal stresler Şekil 3.4'deki gibi gösterilebilir (t_n^e, t_t^e elektrik alan sonucu oluşan normal, tanjant çekilme kuvvetleri, T yüzey gerilimi, p sıvı basıncı) [26].



Şekil 3.4 Polimer Jetine ait kesit alandaki momentum korunumu

z ekseninde hareket eden akışkanlar momentum korunumu için Newton'un ikinci hareket kuramından yola çıkılarak oluşturulan Navier-Stokes denklemi (w , z eksenindeki hız bileşeni, g yer çekimi ivmesi , f_{ext} dış kuvvetler olmak üzere) yazılırsa;

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \bullet \nabla w = -\frac{\nabla p}{\rho} + g + w \nabla^2 w + f_{ext} \quad (3.8)$$

ifadesi elde edilir.

Navier-Stokes denklemleri akışkanlara etki eden gerilmenin, basınç ve hareket eksenine zıt yönde oluşan ağıdalığın toplamından oluştuğu kabulünden yola çıkarak oluşturulmuştur [26]. Polimer jet ifadesi için Navier-Stokes denklemi yeniden yazılırsa [24;27];

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(w^2/2)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g + \frac{2\sigma E}{\rho h} + \frac{3w}{h^2} \frac{\partial(h^2 \partial_z w)}{\partial z} \quad (3.9)$$

eşitliği elde edilir. (Yeterince küçük akışkan parçacığı için moment ifadesi $M = \rho \pi R^2 w dz$)

3.4 Yük Korunumu

Sabit bir DC gerilim kaynağı tarafından oluşturulan elektrik alan etkisi altında kalan polimer jeti hareket eksenini doğrultusu boyunca yük korunumu prensiplerine uygun olarak ilerler. Yük korunumu $Q(t)$ herhangi bir t anındaki elektrik yükünü ifade etmek üzere;

$$Q(t_2) = Q(t_1) + Q_{in} - Q_{out} \quad (3.10)$$

şeklinde verilebilir. Maxwell denklemleri kullanılarak birim zamanda oluşan yük değişimi toplam akı ifadesi kullanılarak yapılabilir (K : elektriksel iletkenlik, D : elektrik deplasman alanı);

$$J_{total} = KE + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.11)$$

Elektrostatik eğirme düzeneğinde toplayıcı plakaya doğru hareket eden polimer jeti kesit alanı $A = \pi h^2$ olarak tanımlanırsa akım ifadesi;

$$I / A = KE \rightarrow I = \pi h^2 KE \quad (3.12)$$

olarak elde edilir. Jet yanal yüzeyleri için $\vec{u}_z dz = \partial \vec{u}_z$ kullanılarak akı eşitliği $(I / A = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t})$ yeniden yazılırsa, akım ifadesi;

$$I = 2\pi h dz \frac{\partial (K \vec{u}_z)}{\partial t} \quad (3.13)$$

şeklini alır. Yükün zamana bağlı değişimi sabit olduğundan akım ifadesi $I = 2\pi h K w$ olarak verilebilir. Her iki eşitlik yardımı ile elektrik alan altındaki akışkan jet'e ait akım ifadesi 3.11 nolu denklem kullanılarak çözümlendiğinde;

$$I = \pi h^2 KE + 2\pi h K w \quad (3.13)$$

eşitliği elde edilir.

3.5 Polimer Jetine Etki Eden Kuvvetler

Newton'un ikinci hareket kanunu bir kütle üzerine uygulanan kuvvetler toplamının kütle ve kütleye ait olan ivmeye bağlı olduğunu ortaya koymuştur ($F = ma$). Polimer jet'i için Newton kanunu ifadesi;

$$m \frac{d^2 P}{dt^2} = \Sigma f \quad (3.14)$$

Polimer Jet'ine etki eden kuvvetler ifadesi ise,

$$\Sigma f = f_C + f_E + f_V + f_s + f_G + f_A + \dots \quad (3.15)$$

C: Coulomb, E: Elektrik alan, V: Visco-elastik, S:Yüzey gerilimi, A:Hava sürtünmesi, G: Yer çekimi olmak üzere gösterilebilir. Çizelge 3.1'de tüm kuvvet ifadeleri verilmiştir.

Çizelge 3.1 Polimer jetine etki eden kuvvetler

Kuvvet ve Stresler	Matematiksel ifadeleri
Coulomb	$f_C = \frac{e^2}{R^2}$
Elektrik Alan	$f_E = -\frac{eV_o}{h}$
Visko-elastik	$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{G}{l} \frac{dl}{dt} - \frac{G}{\mu} \sigma$
Yüzey Gerilimi	$f_s = \frac{\alpha \pi a^2 k}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} [i x sign(x) + j y sign(y)]$
Yer Çekimi	$f_G = \rho g \pi a^2$
Hava Sürtünmesi	$f_A = 0.65 \pi a \rho_{air} v^2 \left(\frac{2vR}{v_{air}} \right)^{-0.81}$

Elektrostatik eğirme sisteminde hareket yörüngesi boyunca ilerleyen polimer jetleri için oluşan hava sürtünmesi ve yer çekimi kuvveti elektrik alan, visko-elastik ve Coulomb kuvvetleri ile karşılaştırıldıklarında ihmal edilir derece küçük olmaktadır [24].

Hava sürtünmesi, herhangi bir yüksüz jet üzerinde oluşturduğu sıkıştırıcı basınç kuvveti ile akışkanda karmaşık burulmaların oluşmasını tetiklemektedir. Meydana gelen bu kararsızlık durumu, akışkanlar için $\rho_{air} v^2 > \alpha / a$ koşulu altında ortaya çıkmaktadır (ρ_{air} hava yoğunluğu, v hız, α yüzey gerilimi olmak üzere) [7-9]. Elektrostatik eğirme sisteminde kullanılan tipik polimer yapıları (PVA, PEO v.b.) için $\rho_{air} v^2 \ll \alpha / a$ durumu ortaya çıktığı için hava sürtünmesi kaynaklı bükülme kararsızlığı küçük olmakta ve ayrıca elektrik alan ve Coulomb kuvveti tarafından bastırılmaktadır [24].

Yer çekimi kuvveti, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, $a = 150 \mu\text{m}$, $g \cong 10 \text{ m/s}^2$ olmak üzere, $f_G = \rho g \pi a^2$ eşitliği kullanılarak hesaplandığında $f_G \cong 7 \times 10^{-2} \text{ kg/s}^2$ olarak bulunur. Elde edilen değerin jet üzerinde oluşturduğu germe etkisi elektrik alan, Coulomb ve visko-elastik kuvveti ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir ölçekte olmaktadır.

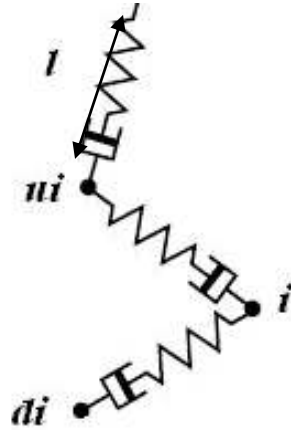
3.6 Polimer Jetinin Üç Boyutlu Dinamiğinin Oluşturulması

Polimer jetinin modellenmesinde kullanılan visko-elastik parçacıkların her biri, bir e yükü ve m kütlesine sahiptirler. Şekil 3.5'de jetin hareket yörüngesi boyunca herhangi bir andaki kesitine ait yapı gösterilmiştir.

Jeti oluşturan her bir parçacık i ifadesi ile tanımlanırsa, $(i+1)$.inci parçacık ui ile $(i-1)$. inci parçacık ise di ile betimlenebilir. l herhangi bir parçacık için uzunluk ifadesi olarak verilirse üst ve alt parçacık uzunlukları;

$$\begin{aligned} l_{ui} &= \left[(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2 \right]^{1/2}, \\ l_{di} &= \left[(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2 \right]^{1/2} \end{aligned} \quad (3.16)$$

(x, y, z parçacıkların Kartezyen koordinatları olmak üzere) şeklini alır.



Şekil 3.5 Visco-elastik parçacıklar

Parçacıklar arası visko-elastik kuvvet $\left(\frac{dl_{ui}}{dt} \right) / l_{ui}, \left(\frac{dl_{di}}{dt} \right) / l_{di}$ gerinimi ifade etmek üzere,

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{ui}}{dt} &= G \frac{1}{l_{ui}} \frac{dl_{ui}}{dt} - \frac{G}{\mu} \sigma_{ui}, \\ \frac{d\sigma_{di}}{dt} &= G \frac{1}{l_{ui}} \frac{dl_{di}}{dt} - \frac{G}{\mu} \sigma_{di}, \end{aligned} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilir.

i .inci parçacık için Coulomb kuvvetinin ifadesi Çizelge 3.1'deki $f_c = \frac{e^2}{R^2}$ ifadesi kullanılarak yazılırsa;

$$f_c = \sum_{\substack{j=1,N \\ j \neq i}} \frac{e^2}{R_{ij}^2} \left[i \frac{x_i - x_j}{R_{ij}} + j \frac{y_i - y_j}{R_{ij}} + k \frac{z_i - z_j}{R_{ij}} \right], \quad (3.18)$$

(i, j, k birim vektörler, x, y, z eksenler ve R_{ij} iki parçacık arası mesafe olmak üzere) eşitliği elde edilir.

Elektrik yüklü parçacık ile toplayıcı plaka arasındaki potansiyel farktan oluşan elektrik kuvveti z eksenine bağlı olarak (3.19)'daki gibi tanımlanır;

$$f_E = -e \frac{V_0}{h} \vec{k}, \quad (3.19)$$

Parçacıklar arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan net visko-elastik kuvvet, jetin hareket yörüngesi boyunca buharlaştığı ihmal edilerek, (3.20) nolu denklemdeki gibi ifade edilebilir. (a_{ui}, a_{di} parçacık yarıçapı)

$$f_{ve} = \pi a_{ui}^2 \sigma_{ui} \left[i \frac{x_{i+1} - x_i}{l_{ui}} + j \frac{y_{i+1} - y_i}{l_{ui}} + k \frac{z_{i+1} - z_i}{l_{ui}} \right] - \pi a_{di}^2 \sigma_{di} \left[i \frac{x_i - x_{i-1}}{l_{di}} + j \frac{y_i - y_{i-1}}{l_{di}} + k \frac{z_i - z_{i-1}}{l_{di}} \right], \quad (3.20)$$

i .nci parçacık üzerinde oluşan yüzey geriliminin ifadesi ise;

$$f_s = - \frac{\alpha \pi (a^2)_{av} k_i}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} [i |x_i| \text{sign}(x_i) + j |y_i| \text{sign}(y_i)], \quad (3.21)$$

(α yüzey gerilim katsayısı, k_i $i, (i+1), (i-1)$.inci parçacıklar arasındaki jet eğriliği, $(a^2)_{av} = (a_{ui} + a_{di})^2 / 4$, olmak üzere) şeklinde verilir.

Hareket halindeki ayrı parçacıklar için herhangi bir i anında (3.14) ifadesi (3.18),(3.19),(3.20),(3.21) eşitlikleri kullanılarak yeniden yazılırsa;

$$m \frac{d^2 r_i}{dt^2} = \sum_{\substack{j \neq i \\ j=1, N}} \frac{e^2}{R_{ij}^3} (r_i - r_j) - e \frac{V_0}{h} k + \frac{\pi a_{ui}^2 \sigma_{ui}}{l_{ui}} (r_{i+1} - r_i) - \frac{\pi a_{di}^2 \sigma_{di}}{l_{di}} (r_i - r_{i-1})$$

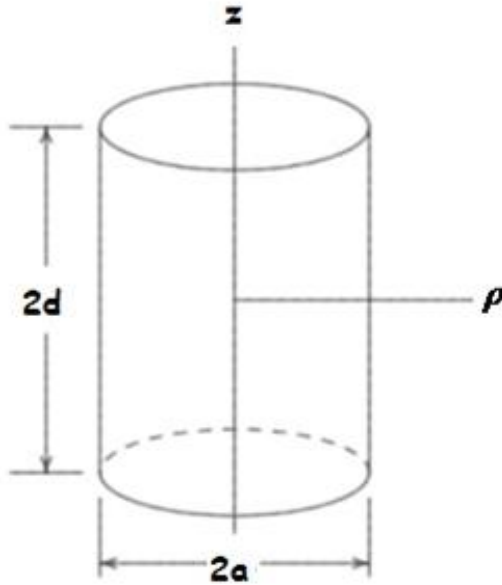
$$- \frac{\alpha \pi (a^2)_{av} k_i}{(x_i^2 + y_i^2)^{1/2}} x [i | x_i | \text{sign}(x_i) + j | y_i | \text{sign}(y_i) |]$$
(3.22)

polimer jetinin üç boyutlu dinamiğinin açık ifadesine ulaşılır.

3.7 Yardımcı Silindirik Elektrot Üzerinde Oluşan Elektrik Alan

Elektrostatik eğirme düzeneğinde polimer jetinin hareket eksenini boyunca oluşturduğu saçılımın azaltılması amacıyla ikincil elektrik alan oluşturan elektrotlar kullanılmıştır. Silindirik içi boş iletken plakadan oluşan yardımcı elektrotların üzerinde oluşan elektrik alanın çözümlenmesi yük dağılımının tüm yüzeylerde eş olmaması nedeniyle sınır-değer problemleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Şekil 3.6'da şematik çizimi yer alan içi boş silindirik iletken levha, V_0 (DC) potansiyeli ile kutuplandığında üzerinde oluşan elektrik alanı bulmak için öncelikli olarak gerilimin (ρ, z) 'de değişimi hesaplanarak, elde edilen ifade, $E = -\nabla \Psi$ dönüşümü yardımıyla çözümlenir.



Şekil 3.6 İçi boş iletken silindirik plaka

İletim ortamının yüksüz olduğunu kabulü altında, silindirik koordinatlarda potansiyel değişimi Ψ , Laplace denkleminin çözümü şeklinde verilebilir (Potansiyel silindirik koordinatlarda tüm ϕ eksenini boyunca sabit olmak üzere) [31].

$$\nabla^2 \Psi(\rho, z) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial \Psi}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.23)$$

Sınır değer ifadesi olarak gerilim $\Psi(a, z) = V_0$ ($|z| < d$) şeklindedir. Laplace diferansiyel denklemi, silindirik koordinat sisteminde değişkenlerin ayrıştırılması yöntemi kullanılarak oluşturulursa [34];

$$\Psi(\rho, z) = \int_0^{\infty} A(k) I_0(k\rho_{<}) K_0(k\rho_{>}) \cos(kz) dk \quad (3.24)$$

$$\rho_{>}^{\leq} = \min_{\max}(\rho, a)$$

(I_0 ve K_0 Bessel fonksiyon denklemleri, $A(k)$ fourier katsayısı olmak üzere) Fourier integrali elde edilir.

İletken plaka üzerinde oluşan yüzeysel yük dağılımı σ , ise gerilimin yeterince ince levha üzerindeki türevi olarak tanımlanırsa z eksenini boyunca değişimi;

$$\begin{aligned} \frac{\sigma(z)}{\epsilon_0} &= \frac{\partial \Psi(a^-, z)}{\partial \rho} - \frac{\partial \Psi(a^+, z)}{\partial \rho} \\ &= \int_0^{\infty} A(k) k [K_0(ka) I_0'(ka) - I_0(ka) K_0'(ka)] \cos(kz) dk \\ &= \frac{1}{a} \int_0^{\infty} A(k) \cos(kz) dk, \end{aligned} \quad (3.25)$$

(Bessel işlevlerinin sadeleştirilmesi $K_0(ka) I_0'(ka) - I_0(ka) K_0'(ka) = 1/a$ olmak üzere) şeklinde bulunur [34].

Sırasıyla yük ve gerilim için sınır değer koşulları kullanılarak (3.24) ve (3.25) eşitlikleri bir araya getirilirse aşağıdaki hali alırlar;

$$\int_0^{\infty} A(k) \cos(kz) dk = \begin{cases} \frac{a}{\varepsilon_0} \sigma(z), & |z| < d, \\ 0, & |z| > d, \end{cases}$$

(3.26)

ve

$$\int_0^{\infty} A(k) I_0(ka) K_0(ka) \cos(kz) dk = \begin{cases} V_0, & |z| < d, \\ f(z), & |z| > d. \end{cases}$$

(3.26) nolu denklem seti matematiksel işlemlerin basitleştirilmesi amacıyla $x = z/d$ ve $B(k) = A(k)/V_0 d$ normalizasyonu yapılarak sınır değer koşulu altında tekrar oluşturulursa;

$$\int_0^{\infty} B(k) \cos(kx) dk = \begin{cases} \frac{a}{V_0 \varepsilon_0} \sigma(x), & |x| < 1, \\ 0, & |x| > 1 \end{cases} \quad (3.27)$$

$$\int_0^{\infty} B(k) I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) \cos(kx) dk = \begin{cases} 1, & |x| < 1, \\ f(x)/V_0, & |x| > 1 \end{cases}$$

ifadesi elde edilir.

Yüzey yük dağılımı iletken silindirik levhaya ait gerilim dağılımının çıkarımı (3.25-27) nolu eşitliklerle verilen integral ifadelerinin Galerkin yöntemi kullanılarak çözümlenmesi ile oluşturulabilir.

3.7.1 Galerkin yöntemi

Mühendislik problemlerinde sınır değer koşulları ile tariflenen diferansiyel denklemlerin kapalı ifadeleri $D(U)=0$, $B(U)=0$, (D diferansiyel, B sınır değer koşulları olmak üzere) şeklinde verilmektedir. Bu tür eşitliklerin analitik çözümü ise mühendislik problemlerinin önemli bir bölümünde mümkün olamamaktadır. Bu nedenle pek çok çalışmada diferansiyel denklemlerin genel çözümün araştırılması yerine yakınsama teknikleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de Boris Grigoryevich Galerkin tarafından bulunan ve literatürde yine kendi ismi ile anılan Galerkin yöntemidir [33].

Galerkin yaklaşımı, temelde işlev uzayına ait baz fonksiyonlar ile işlevler arası iç çarpımın birlikte kullanılarak analitik çıkarıma yakınsak bir çözüm kümesi inşa edilmesi esasına dayanmaktadır.

Herhangi iki işlev için $[a,b]$ aralığındaki iç çarpım;

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f(x)g(x)dx \quad (3.28)$$

şeklinde tanımlanır. Her iki işlevin birbirlerine dik olduğu durumda $\langle f, g \rangle = 0$ değerini almaktadır.

V bir işlev uzayı olmak üzere bu uzayda tanımlı herhangi bir işlev, uzaya ait baz fonksiyonların $(S = \{\phi_i(x)\}_{i=0}^{\infty})$ doğrusal kombinasyonu ile ifade edilebilir;

$$f(x) = \sum_{j=0}^{\infty} c_j \phi_j(x) \quad (3.29)$$

$D(U)=0$ diferansiyel ifadesi $B(U)=[a,b]$ koşulu altında ve $U(x)$ eşitliğin çözümü olmak üzere yeniden tanımlanırsa;

$$D(U) = L(U(x)) + f(x) = 0 \quad (3.30)$$

(L diferansiyel operatör, f tanımlı işlev olmak üzere) şeklini alır.

Galerkin yakınsama işleminde ilk adım olarak $U(x)$ için tahmini bir çözüm oluşturulur;

$$U \approx u(x) = \phi_0(x) + \sum_{j=1}^n c_j \phi_j(x) \quad (3.31)$$

($\phi_j(x)$ sonlu sayıda baz işlevler, $c_j(x)$ bilinmeyen katsayılar olmak üzere)

$u(x)$ çözümü kullanılarak (3.30) eşitliği yeniden oluşturulursa, aşağıdaki şekli alır;

$$R(x) = D[u(x)] = L(u(x)) + f(x) \quad (3.32)$$

İkinci adımda rastgele ağırlık işlevleri ($w(x)$) seçilerek $\langle w, R(x) \rangle = \langle w, D(u) \rangle$ iç çarpım ifadesi diferansiyel eşitlik için yeniden tanımlanır;

$$\langle w, D(u) \rangle = \int_a^b w(x) \{D[u(x)]\} dx \quad (3.33)$$

İç çarpımının 0'a eşit olduğu durumda $u(x)$ çözüm tahmini, diferansiyel denklemi kısmi olarak sağlamaktadır [33]. Ağırlık işlevleri, ϕ_j baz fonksiyonlarından seçilmek üzere (3.33) nolu denklem yeniden oluşturulursa iç çarpım ifadesi;

$$\langle w, R \rangle = \int_a^b \phi_j D[u(x)] dx = \int_a^b \phi_j(x) \left\{ D[\phi_0(x) + \sum_{j=1}^n c_j \phi_j(x)] \right\} dx = 0 \quad (3.34)$$

şeklini alır. (3.34) ifadesi n. dereceden doğrusal eşitliklerden oluşmaktadır. c_j katsayıları bu eşitlikler yardımıyla çözümlenir ve çözüm tahmininde yerine yazılırsa diferansiyel denklemin yaklaşık çözümü elde edilmiş olur.

3.7.2 Silindirik levha üzerinde oluşan yük dağılımının Galerkin metodu ile çözümlenmesi

İletken silindirik plaka ve ince teller üzerinde oluşan yük yoğunluğu ifadesinin çıkarılması amacıyla yapılan birçok çalışma; yük değişimi ifadesine, sabit bir değer ile iletken şerit yapısı için tanımlanmış olan yük dağılımının doğrusal birleşiminden faydalanılarak yakınsabileceğini göstermiştir [35;36;37]. Amir and Matzner, [34] ise benzer bir yaklaşımla, Galerkin yöntemini kullanarak, yüklü tüp için oluşturdukları ikili baz işlevi yardımıyla silindirik levha üzerinde oluşan normalize yük dağılımı ifadesine yaklaşık çözüm kümesi oluşturmuşlardır (3.35).

$$\frac{a}{V_0 \epsilon_0} \sigma(x) = c_0 + \frac{c_1}{\sqrt{1-x^2}} \quad (3.35)$$

c_0 ve $\frac{c_1}{\sqrt{1-x^2}}$ ikili baz işlevleri olmak üzere (Baz işlev sayısı ile istenen çözüme olan yakınsaklık arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır).

(3.27) nolu eşitlikte yer alan yük dağılımı ve gerilim ifadeleri ikili baz işlevleri kullanılarak yeniden yazılırsa;

$$\begin{aligned}
B(k) &= \frac{2}{\pi} \int_0^1 \left[c_0 + \frac{c_1}{\sqrt{1-x^2}} \right] \cos(kx) dx \\
&= \frac{2c_0}{\pi} \frac{\sin k}{k} + c_1 J_0(k),
\end{aligned} \tag{3.36}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{2c_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin k}{k} I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) \cos(kx) dk \\
&+ c_1 \int_0^\infty J_0(k) I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) \cos(kx) dk = 1 \quad (|x| < 1)
\end{aligned} \tag{3.37}$$

şeklini alır. $\int_0^1 dx$ ve $\frac{2}{\pi} \int_0^1 \frac{dx}{\sqrt{1-x^2}}$ integral operatörleri (3.37) nolu potansiyel ifadesinin çözümlemesinde kullanılırsa (3.38) ve (3.39) nolu denklem çifti elde edilir;

$$\begin{aligned}
&\frac{2c_0}{\pi} \int_0^\infty \left[\frac{\sin k}{k} \right]^2 I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) dk \\
&+ c_1 \int_0^\infty \frac{\sin k}{k} J_0(k) I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) dk = 1
\end{aligned} \tag{3.38}$$

$$\begin{aligned}
&\frac{2c_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\sin k}{k} J_0(k) I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) dk \\
&+ c_1 \int_0^\infty J_0^2(k) I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) dk = 1
\end{aligned} \tag{3.39}$$

Oluşturulan denklem seti katsayılar matrisi oluşturacak biçimde yeniden düzenlenirse aşağıdaki şekli alır [38]:

$$\begin{bmatrix} \Theta(\alpha) & \Omega(\alpha) \\ \Omega(\alpha) & \Lambda(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2}{\pi} c_0 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{3.40}$$

$$\Theta(\alpha) = \int_0^\infty \left[\frac{\sin k}{k} \right]^2 I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) dk,$$

$$\Omega(\alpha) = \int_0^\infty \frac{\sin k}{k} J_0(k) I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) dk,$$

$$\Lambda(\alpha) = \int_0^\infty J_0^2(k) I_0(k\alpha) K_0(k\alpha) dk.$$

Katsayılar matrisinin çözümlenmesi ile elde edilen c_0, c_1 sabit değerleri yardımı ile yüklü silindirik levha üzerindeki yük dağılımı ifadesine ulaşılabılır. Söz konusu sabit ifadelerinin matematiksel çıkarımlarının güçlüğü nedeniyle Şekil 3.6'da tanımlanan silindirik plaka için tanımlanan sınır koşullardaki değişimler incelenebilir [38]:

- Şekil 3.6'da tanımlanan silindirik plaka için (a: silindir yarıçapı, d: silindir yüksekliği) $\alpha = a/d \rightarrow \infty$ durumunda (kısık boylu ve büyük çaplı plaka) matris ifadesindeki katsayılar (3.41)'deki şekli alırlar;

$$\begin{aligned}\Theta(\alpha) &\rightarrow \frac{\ln(4\alpha) + 3/2}{2\alpha}, \\ \Omega(\alpha) &\rightarrow \frac{\ln(16\alpha)}{2\alpha}, \\ \Lambda(\alpha) &\rightarrow \frac{\ln(16\alpha)}{2\alpha},\end{aligned}\tag{3.41}$$

Bu koşullar altında c_0, c_1 katsayıları hesaplandığında $c_0 \xrightarrow{\alpha \rightarrow \infty} 0$, ve

$c_1 \xrightarrow{\alpha \rightarrow \infty} \frac{2\alpha}{\ln(16\alpha)}$ şeklinde bulunur.

Normalize yük dağılımı ise de;

$$\sigma(x) = \frac{2\alpha}{\ln(16\alpha)\sqrt{1-x^2}} x \frac{V_0 \epsilon_0}{a}\tag{3.42}$$

olarak hesaplanır.

- Şekil 3.6'da tanımlanan silindirik plaka için $\alpha = a/d \rightarrow 0$ durumunda (uzun ve dar plaka) matris ifadesindeki katsayılar (3.43)'deki şekle dönüşürler;

$$\begin{aligned}\Theta(\alpha) &\rightarrow \frac{\pi}{2} [\ln(4\alpha) - 1], \\ \Omega(\alpha) &\rightarrow -\frac{\pi}{2} \ln \alpha, \\ \Lambda(\alpha) &\rightarrow \frac{1}{2\pi} \ln^2(16/\alpha) + \frac{\pi}{24},\end{aligned}\tag{3.43}$$

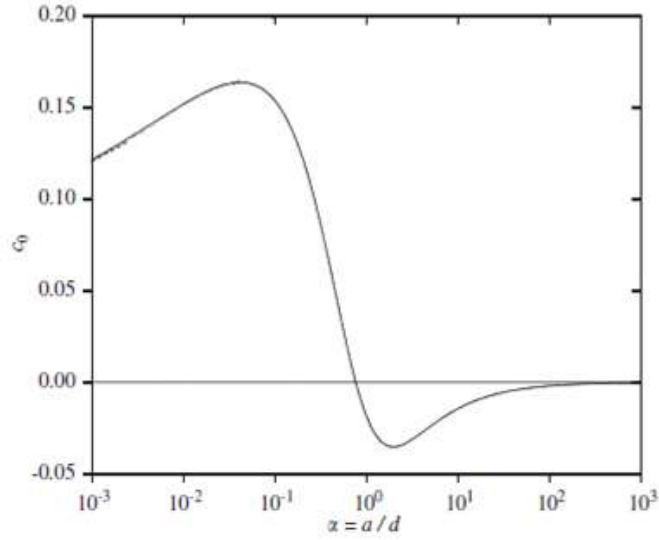
c_0, c_1 katsayıları hesaplanırsa;

$$\begin{aligned} c_0 &\xrightarrow{\alpha \rightarrow 0} \frac{\ln^2(16/\alpha) + \pi^2/12 + \pi^2 \ln \alpha}{[\ln(4/\alpha) - 1] \cdot [\ln^2(16/\alpha) + \pi^2/12] - \pi^2 \ln^2 \alpha}, \\ c_1 &\xrightarrow{\alpha \rightarrow 0} \frac{2\pi(\ln 4 - 1)}{[\ln(4/\alpha) - 1] \cdot [\ln^2(16/\alpha) + \pi^2/12] - \pi^2 \ln^2 \alpha}, \end{aligned} \quad (3.44)$$

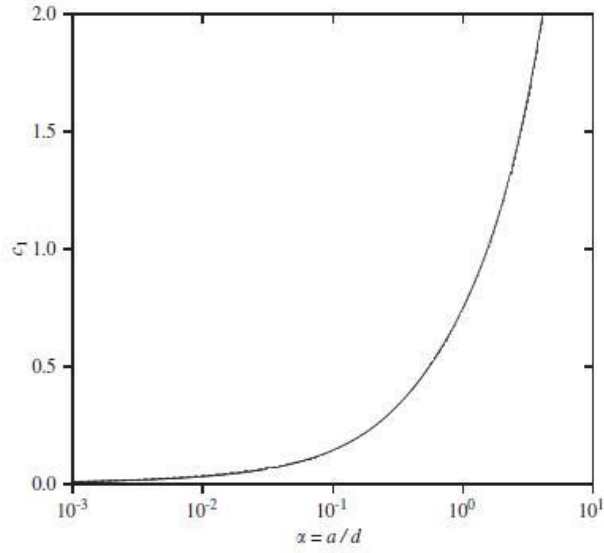
Normalize yük dağılımı ise de (3.45)'deki şekli alır:

$$\begin{aligned} \frac{a}{V_0 \varepsilon_0} \sigma(x) &= \frac{\ln^2(16/\alpha) + \pi^2/12 + \pi^2 \ln \alpha}{[\ln(4/\alpha) - 1] \cdot [\ln^2(16/\alpha) + \pi^2/12] - \pi^2 \ln^2 \alpha} \\ &+ \frac{2\pi(\ln 4 - 1)}{[\ln(4/\alpha) - 1] \cdot [\ln^2(16/\alpha) + \pi^2/12] - \pi^2 \ln^2 \alpha \sqrt{1 - x^2}} \end{aligned} \quad (3.45)$$

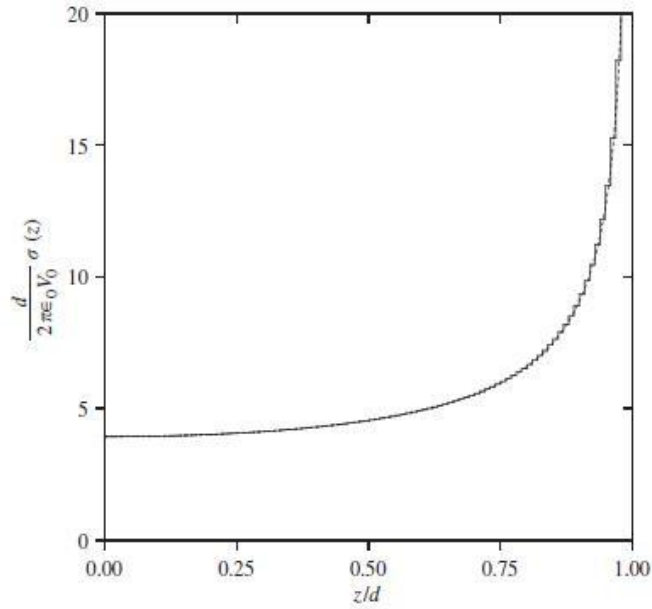
Elde edilen eşitlikler kullanılarak değişik boyutlardaki silindirik plakalar için yük dağılımının z eksenı boyunca bilgisayar benzetimleri çıkarılabilir. Scharstein [38] gerçekleştirdiği çalışmada farklı $\alpha = a/d$ oranları için c_0, c_1 katsayılarının ve yük dağılımı değişiminin benzetim sonuçlarına yer vermiştir (Şekil 3.7-3.9).



Şekil 3.7 Galerkin yaklaşımı ile oluşturulan c_0 değerinin α 'ya bağlı değişimi [38]



Şekil 3.8 Galerkin yaklaşımı ile oluşturulan c_1 değerinin α 'ya bağlı değişimi [38]



Şekil 3.9 Normalize yüzey yük dağılımının $\alpha=10$ durumunda z/d 'ye bağlı olarak değişimi [38]

3.7.3 Silindirik levha üzerinde oluşan gerilim ve elektrik alan dağılımı

Sonlu uzunluktaki iletken silindirik levha üzerinde oluşan potansiyel dağılımı, önceki bölümde kapalı ifadesi elde edilen yük dağılımı eşitliği yardımıyla (3.24) ve (3.25) nolu denklemlerin çözümü ile gerçekleştirilebilir. Gerilim ifadesinin bu yöntemle matematiksel çıkarımının güçlüğü nedeniyle farklı bir yaklaşımla Galerkin metodu ile elde edilen c_0, c_1 katsayıları Green işlevine uygulanarak da potansiyel ifadesine ulaşılabilir [38,39].

Green işlevinin genel ifadesi aşağıdaki gibi olmak üzere:

$$\Psi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint_s \frac{\sigma(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} ds' \quad (3.46)$$

yüklü iletken silindirik levha için gerilim ifadesi yeniden oluşturulur;

$$\Psi(\rho, z) = \frac{a}{4\pi\epsilon_0} \int_{-d}^d \sigma(z') \int_{-\pi}^{\pi} \frac{d\phi'}{\sqrt{\rho^2 + a^2 - 2a\rho \cos \phi' + (z - z')^2}} dz' \quad (3.47)$$

ve Galerkin yöntemi kullanılarak tariflenen normalize yük dağılımı (3.35), (3.47) nolu denklemde yerine yazılırsa gerilim değişimi aşağıdaki gibi elde edilir:

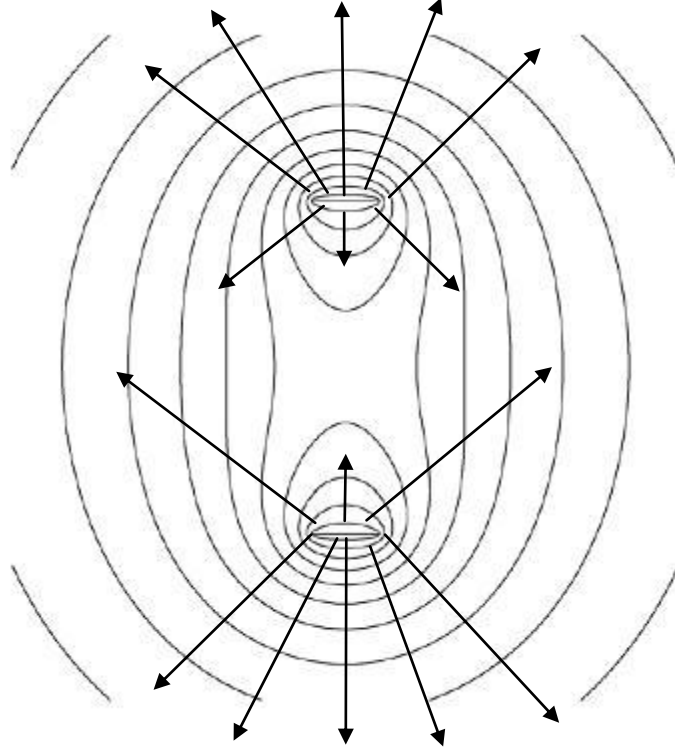
$$\begin{aligned} \Psi(\rho, z) &= \frac{V_0}{\pi} \int_{-1}^1 \left[c_0 + \frac{c_1}{\sqrt{1-z'^2}} \right] \int_{-\pi}^{\pi} \left[\left(\frac{\rho}{a} \right)^2 + 1 - 2 \frac{\rho}{a} \cos \phi' + \left(\frac{z - z'}{\alpha} \right)^2 \right]^{-1/2} d\phi dz' \\ &= \frac{V_0}{\pi} \int_{-1}^1 \left[c_0 + \frac{c_1}{\sqrt{1-z'^2}} \right] \frac{K \left[2\alpha^2 \frac{\rho}{a} \left(|z/d - z'|^2 + \alpha^2 (\rho/a + 1)^2 \right) \right]}{\left[|z/d - z'|^2 + \alpha^2 (\rho/a + 1)^2 \right]^{1/2}} dz' \end{aligned} \quad (3.48)$$

Silindirik plaka üzerinde oluşan Elektrik alan dağılımına ise (3.48) nolu eşitlik ile verilen potansiyel ifadesinin gradienti alınarak ($E = -\nabla\Psi$) oluşturulur:

$$E = -\nabla \left[\frac{V_0}{\pi} \int_{-1}^1 \left[c_0 + \frac{c_1}{\sqrt{1-z'^2}} \right] \frac{K \left[2\alpha^2 \frac{\rho}{a} \left(|z/d - z'|^2 + \alpha^2 (\rho/a + 1)^2 \right) \right]}{\left[|z/d - z'|^2 + \alpha^2 (\rho/a + 1)^2 \right]^{1/2}} dz' \right] \quad (3.49)$$

(3.48) ve (3.49) nolu ifadelerden yola çıkarak $\alpha = 5$ için silindirik plakanın potansiyel değişiminin bilgisayar benzetimleri Şekil 3.10.'da gösterilmektedir.

Gerilim ve yük dağılımının matematiksel çözümleri ve bilgisayar benzetimleri içi boş silindirik iletken plaka içinde oluşan elektrik alanın silindirin merkezinde 0 olduğu sonucu koymaktadır.



Şekil 3.10 $\alpha = 5$ için silindirik levha üzerinde oluşan eş potansiyel eğrileri ve elektrik alan vektörleri [38]

$\alpha = a/d \rightarrow 0$ durumunda (sonsuz uzunluktaki silindirik yapı) plaka içindeki potansiyelin ve buna bağlı olarak elektrik alanın 0'ya yakınsamaktadır. Silindirin köşelerinde oluşan potansiyel ve elektrik alan şiddeti ise artmaktadır [38,39]. Şekil 3.10, $\alpha = 5$ değerinde elde edilen bilgisayar benzetim sonuçları yüklü plaka tarafından oluşturulan potansiyel değişiminin sonsuz uzunluktaki levhaya yakınsadığını göstermektedir [38].

3.8 Yardımcı Paralel Elektrotlar Üzerinde Oluşan Elektrik Alan

Elektrostatik Eğirme düzeneğinde polimer jetinin toplayıcı plaka üzerinde oluşturduğu nano liflerin karmaşıklığın azaltılması amacıyla tasarım modelinde paralel elektrotlar kullanılmıştır (Şekil 2.1). İletken bakır plakalardan oluşan paralel elektrotların içinde oluşan elektrik alanın, plakalar arası mesafenin levha boyutuna oranla yeterince küçük olduğu durumda, düzgün dağılımlı olduğu kabul edilebilir [42].

Şekil 3.11’de şematik çizimi verilen paralel iletken levhalar, ΔV (DC) potansiyeli ile kutuplandığında oluşan elektrik alan $\vec{E}(\vec{r}) \cong -E_0 \hat{z}$ ifadesi ile tanımlanabilir.

Plakalar arasındaki potansiyel ifadesi,

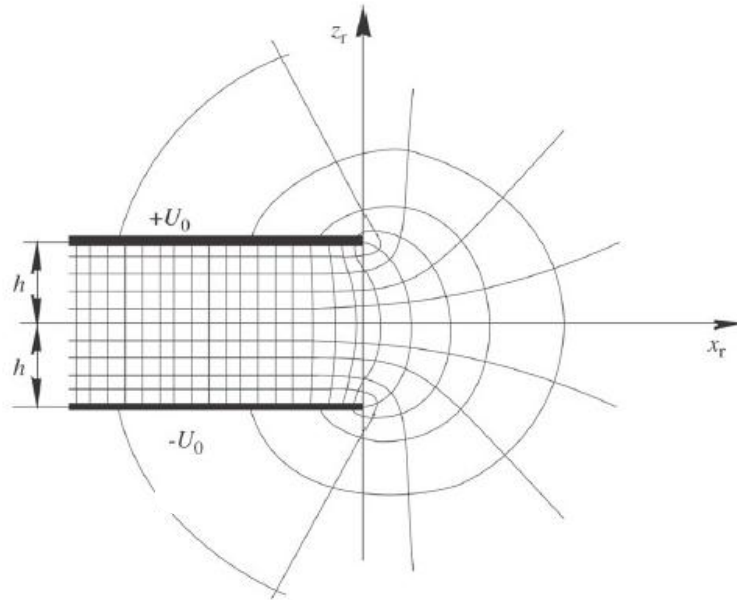
$$\Delta V = V(z = h) - V(z = -h) = - \int_{-h}^h \vec{E}(\vec{r}) \cdot d\vec{l} \quad (3.50)$$

şeklinde ifade edilir ve $\vec{E}(\vec{r}) \cong -E_0 \hat{z}$ koşulu altında (3.50) nolu denklem yeniden yazılırsa (3.51) nolu eşitliğe ulaşılır;

$$\Delta V = V_0 - (-V_0) = E 2h, \quad (3.51)$$

$$E = \frac{V_0}{h}$$

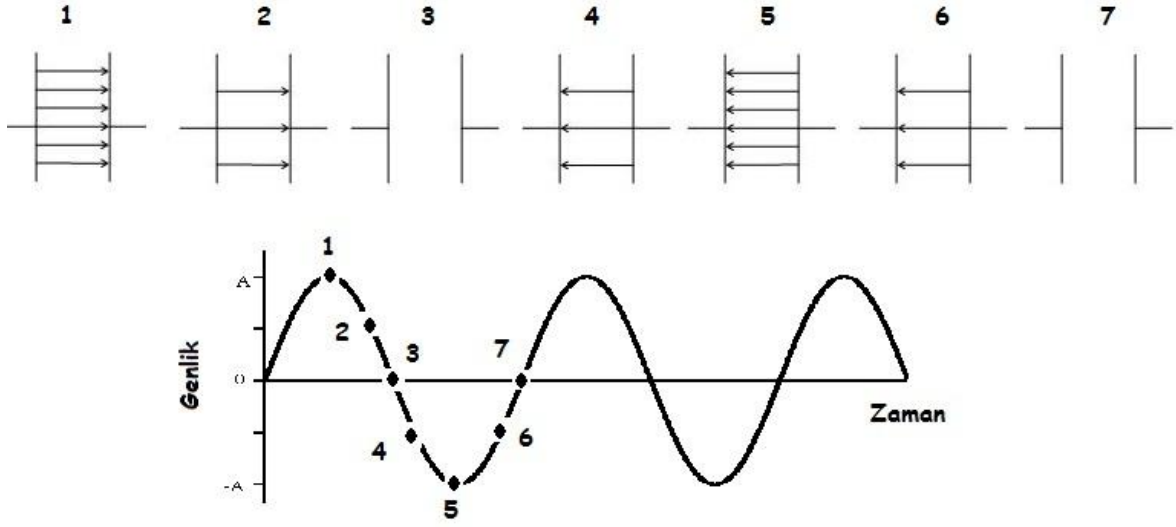
İletken paralel plakalar, zamana bağlı herhangi bir $V(t)$ gerilimi ile kutuplandığında ise elektrik alan, uygulanan işlev özelliğine bağlı olarak değişken bir davranış gösterir.



Şekil 3.11 Paralel levhalar arası oluşan elektrik alan dağılımı [42]

Şekil 3.12’de paralel plakalar arasında periyodik sinüs işareti ile oluşturulan elektrik alanın, şiddet ve doğrultusunun zamana bağlı değişimi şematik olarak

gösterilmiştir. Elektrik alanın yönü ve şiddeti uygulanan sinüs işaretinin herhangi bir andaki (1-7) genlik değerine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 3.12 Elektrik alan şiddet ve doğrultusunun zamana bağlı değişimi

Elektrik alan ifadesi, değişken işaretin tetiklediği manyetik alanın etkileri ve sınır değer koşulları ihmal edilerek açısal sıklığı ω , genliği A olan testere dişi dalgası için yazılırsa;

$$V(t) = \frac{2}{\pi} A \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{\sin(k\omega t)}{k}, \quad (3.52)$$

olmak üzere,

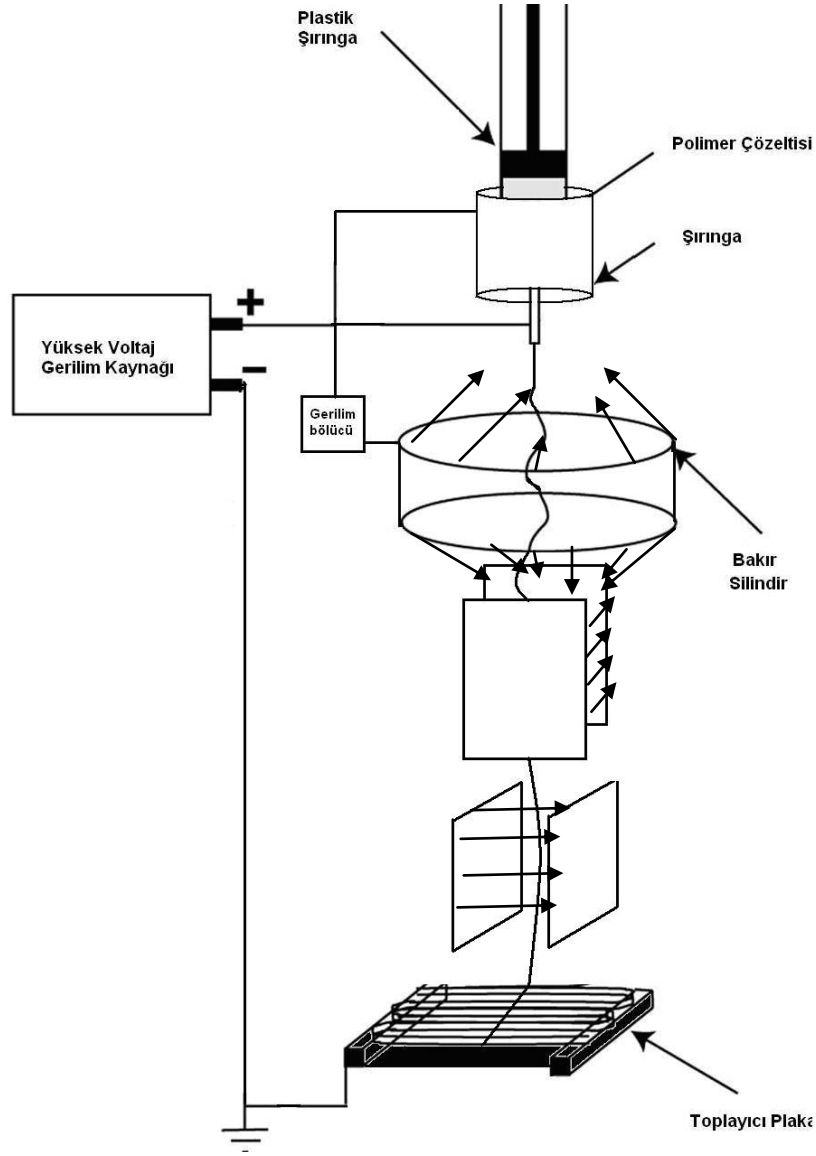
$$E(t) = \frac{V(t)}{h} = \frac{\frac{2}{\pi} A \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\sin(k\omega t)}{k}}{h}, \quad (3.53)$$

şeklinde tanımlanır [47].

3.9 Tasarlanan Elektrostatik Eğirme Düzeneği Matematiksel Modeli

Yukarıdaki bölümlerde verilen genel ifadeler yardımıyla, Şekil 3.13'de şematik gösterimi verilen, tasarım modelinin matematiksel çıkarımı gerçekleştirilebilir.

Tasarlanan Elektrostatik Eğirme düzeneğinin matematiksel model kurgusu; Newton'un ikinci hareket kanunu ile oluşturulan (3.22) nolu eşitliğe, (3.49) ve



Şekil 3.13 Elektrostatik Eğirme düzeneği

(3.53) nolu denklemler ile tanımlanan elektrik alan eşitliklerine ait kuvvet ifadelerinin eklenmesi ile gerçekleştirilir.

Elektrik alan kuvveti ifadesi $\vec{f} = Q_T \vec{E}$ olmak üzere silindirik ve paralel elektrotlar için kuvvet eşitlikleri (Q_T , toplam yük olmak üzere):

- Paralel plakalar tarafından oluşturulan elektrik alan kuvveti (f_{PE});

$$\begin{aligned}
f_{PE} &= Q_T E(t) \\
&= Q_T \frac{\frac{2}{\pi} A \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\sin(k\omega t)}{k}}{h}
\end{aligned} \tag{3.54}$$

- Silindirik elektrot tarafından oluşturulan elektrik alan kuvveti (f_{SE});

$$f_{SE} = Q_T E = -Q_T \nabla \Psi(\rho, z) \tag{3.55}$$

şeklinde ifade edilebilir. (Elektrik alan kuvveti polimer jetine x ve y eksenleri doğrultusunda etki etmektedir.)

Silindirik elektrot polimer jetinin kaotik davranışını bastırmak amacıyla saçılımın aksi yönünde kuvvetli bir elektrik alan oluşturacak şekilde seçilmelidir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler, en iyi saçılım bastırma oranına, silindirik elektrot çapının 5 cm ve yüksekliğinin 1 cm ($\alpha=5$) olduğu durumda ulaşıldığını göstermiştir.

Söz konusu plaka ölçüleri için $\alpha \rightarrow \infty$ koşulunun sağlandığı varsayımı kullanılırsa, Galerkin yaklaşımı ile çözümlenen c_0, c_1 katsayıları:

$$c_0 \rightarrow 0, \quad c_1 \rightarrow \frac{2\alpha}{\ln(16\alpha)} = 2,28 \tag{3.56}$$

değerlerini alır.

Hesaplanan c_0, c_1 katsayıları kullanılarak (3.49) nolu eşitlik yeniden yazılırsa elektrik alan ifadesi;

$$\Psi(\rho, z) = -\frac{2.28eV_0}{\pi} \int_{-1}^1 \left[\frac{1_1}{\sqrt{1-z'^2}} \right] \frac{K \left[2\alpha^2 \frac{\rho}{a} \left(|z/d - z'|^2 + \alpha^2(\rho/a + 1)^2 \right) \right]}{\left[|z/d - z'|^2 + \alpha^2(\rho/a + 1)^2 \right]^{1/2}} dz' \tag{3.57}$$

şeklini alır (K ikinci dereceden değiştirilmiş Bessel işlevi olmak üzere).

İkincil paralel ve silindirik elektrotlar tarafından oluşturulan elektrostatik kuvvetin ifadesi her bir yüklü polimer molekülü için $f = -e\nabla\Psi(\rho, z)$ şeklinde tanımlanırsa, tasarlanan Elektrostatik Eğirme sistemi için (3.15) nolu denklem seti aşağıdaki şekli alır:

$$m \frac{d^2 r_i}{dt^2} = f_C + f_E + f_V + f_S + f_{SE} + f_{PE} \quad (3.58)$$

C : Coulomb, E : Elektrik alan, V : Visco-elastik, S :Yüzey gerilimi, SE : Silindirik elektrot, PE : Paralel elektrot, olmak üzere gösterilebilir.

(3.58) nolu eşitlikte kapalı formülü oluşturulan Elektrostatik Eğirme sistemi tasarım modeli için her bir kuvvetin açık ifadesi Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Tasarım modelinde polimer jetine etki eden kuvvetler

Kuvvet ve Stresler	Matematiksel ifadeleri
Coulomb	$f_C = \frac{e^2}{R^2}$
Elektrik Alan	$f_E = -\frac{eV_o}{h}$
Visko-elastik	$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{G}{l} \frac{dl}{dt} - \frac{G}{\mu} \sigma$
Yüzey Gerilimi	$f_s = \frac{\alpha \pi a^2 k}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} [i x sign(x) + j y sign(y)]$
Silindirik Elektrot	$\frac{2.28eVo}{\pi} \nabla \left[\int_{-1}^1 \left[\frac{1}{\sqrt{1-z'^2}} \right] \int_{-\pi}^{\pi} \left[\left(\frac{\rho}{a} \right)^2 + 1 - 2 \frac{\rho}{a} \cos \phi' + \left(\frac{z-z'}{\alpha} \right)^2 \right]^{-1/2} d\phi' dz' \right]$
Paralel Elektrot	$\left[e \frac{\frac{2}{\pi} A \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\sin(k\omega t)}{k}}{h} i + e \frac{\frac{8}{\pi} A \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{\sin(k\omega t)}{k}}{h} j \right]$

4. POLİMER JETİNİN BİLGİSAYAR BENZETİMİ

Elektrostatik eğirme sistemi ile sentezlenen fiber ağ yapısı oluşumunun modellenmesi, yüklü polimer moleküllerinin kaotik davranışının bastırılması açısından önem arz etmektedir. Bu bölümde önerilen tasarım modelinin gerçek sistem dinamiğine olan yakınsaklığın ortaya çıkarılması ve alternatif çözümlerin üretilebilirliğinin araştırılması amacıyla teorik modeli oluşturulan jetin bilgisayar benzetimleri Matlab ortamında gerçekleştirilmiştir.

Bilgisayar benzetimlerinde ilk aşama olarak yardımcı elektrotların bulunmadığı durum için sistem çözümü oluşturulmuştur. Bu doğrultuda parçacık yapısı için çıkarımı gerçekleştirilen (3.22) nolu eşitlik ve her bir parçacık üzerindeki visko-elastik gerilmeye $(\frac{d\sigma}{dt} = \frac{G}{l} \frac{dl}{dt} - \frac{G}{\mu} \sigma)$ ait diferansiyel denklemler benzetimlerde esas alınmışlardır.

İkinci aşamada ise fiber ağ yapısının saçılımının bastırılması doğrultusunda tasarlanan içi boş silindirik iletken elektrodun kullandığı sistem modelinin benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla (3.49) eşitlikte çıkarımı gerçekleştirilen silindirik elektrot tarafından oluşturulan elektrik alan ifadesi kullanılmıştır.

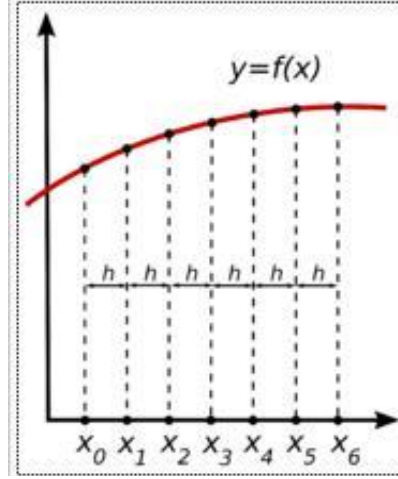
Matematiksel olarak çıkarımı gerçekleştirilen polimer jetine ait eşitlikler birinci ve ikinci dereceden diferansiyel denklemler içermektedir (Çizelge 3.1). Benzetimlerde bu tür diferansiyel denklemlerin nümerik çözümü amacıyla sonlu farklar (*finite difference*) tekniği kullanılmıştır.

4.1 Sonlu Farklar Yöntemi

Sonlu farklar, adi türev işlevlerinin belirli koordinat noktalarındaki fonksiyon değerleri için oluşturulan fark operatörleri yardımıyla çözümlenmesi esasına dayanmaktadır (Şekil 4.1). Fark operatörünün oluşturulmasının gösterimi, işlemsel kolaylığı nedeniyle, birinci derece türev eşitliği kullanılarak yapılabilir [40]:

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (4.1)$$

$f(x)$ herhangi bir işlev olmak üzere.



Şekil 4.1 Sonlu farklar yöntemi ile işlevin ayrıklaştırılması

$f(x)$ işlevinin $f(x_0 + h)$ anındaki n.dereceden Taylor açılımı yapılırsa:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + \frac{f'(x_0)}{1!}h + \frac{f''(x_0)}{2!}h^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}h^n + R_n(x) \quad (4.2)$$

eşitliği elde edilir ($R_n(x)$ kalan terim olmak üzere).

Birinci dereceden türev ifadesi dışında kalan tüm terimler kalan olarak kabul edilirse Taylor açılımı aşağıdaki şekilde verilir:

$$f(x_0 + h) = f(x_0) + f'(x_0)h + R_1(x) \quad (4.3)$$

$x_0 = a$, $(x - a) = h$ kabulü altında (4.3) eşitliği tekrar yazılırsa:

$$f(a + h) = f(a) + f'(a)h + R_1(x), \quad (4.4)$$

şekline dönüşür.

(4.4) eşitliğinin her iki tarafı h 'ye bölünürse:

$$\begin{aligned} \frac{f(a + h)}{h} &= \frac{f(a)}{h} + f'(a) + \frac{R_1(x)}{h}, \\ f'(a) &= \frac{f(a + h) - f(a)}{h} - \frac{R_1(x)}{h}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

İfadesi elde edilir.

Yeterince küçük $R_1(x)$ için türev ifadesine, işlev üzerinde bulunan herhangi a noktası için, yakınsak bir çözüm elde edilir:

$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \approx \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad (4.6)$$

Benzer şekilde $f(x)$ fonksiyonunun ikinci derece türevine ait sonlu farklar operatörü Taylor açılımı kullanılarak hesaplanırsa [41]:

$$f(x)'' \approx \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (4.7)$$

ifadesine ulaşılır.

4.2 Benzetim Dinamiğinin Oluşturulması

Şekil 3.11’de şematik gösterimi verilen elektrostatik eğirme düzeneğinin bilgisayar benzetim omurgası parçacık modeli tabanlı (3.22) ve (3.49) nolu denklem kümeleri kullanılarak oluşturulmuştur. Polimer jetinin herhangi andaki davranışını modelleyen eşitlik ifadelerinin çıkarımı, ikinci ve birinci dereceden türev işlevleri kullanılarak tanımlanan değişkenler olan stres ve konumunun çözümüne bağlıdır. Bu amaçla program algoritmasında diferansiyel denklemlerin çözümünde yaygın olarak kullanılan sonlu farklar yöntemi kullanılmıştır.

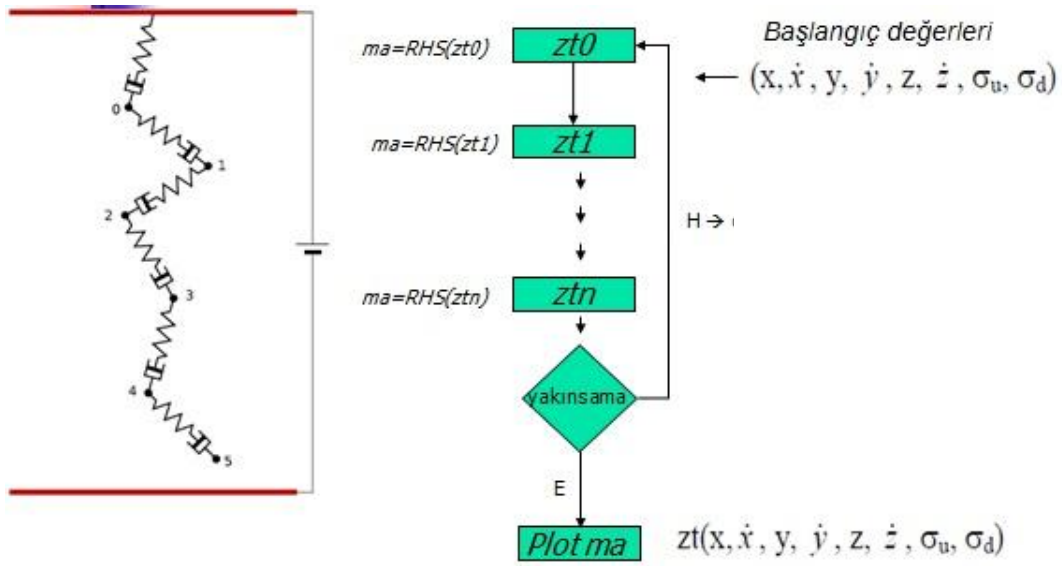
Her bir parçacık için konum bilgisi (x, y, z) değişken değerleri, hız ifadesi de ilgili değişkenlerin türevi (x', y', z') şeklinde tanımlanarak (3.22) nolu eşitlikte yer alan ivme ifadesinin çözümü için gerekli bilinmeyenler kümesi oluşturulur.

Visko-elastik stres ifadesinin çözümü için gerekli olan değişkenler ise hareket halindeki herhangi bir parçacık için komşu parçacıklarla olan etkileşimi ifade eden σ_u, σ_a değişkenleri ile tariflenir.

Hareket eksenini boyunca toplayıcı plakaya doğru ilerleyen parçacıklar için belirlenen tüm ifadeler bir arada getirildiğinde benzetim için 8 farklı $(x, x', y, y', z, z', \sigma_u, \sigma_a)$ değişkene bağlı bir yapı ortaya çıkmaktadır. Sistem modeli, şırınga ucundan ayrılan ilk parçacığa ait başlangıç anı değişken değerlerinin

$(0,0,0,0,h,0,0,0)$ her $t_0 + t$ anında (3.22) nolu ikinci derece diferansiyel denklemin çözümlenmesi ile güncellenerek hareket eksenini doğrultusunda hareket ettirilmesi temeline dayanır (Şekil 4.2).

Model algoritmasında $i=1$ şırınga ucundan ayrılan sonuncu başka bir ifade ile toplayıcı plakaya en yakın konumda olan parçacığı, $i=N$ ise şırıngadan ayrılan bir parçacığı temsil etmektedir.



Şekil 4.2 Benzetim algoritması şematik gösterimi

Elektriksel kuvvetler nedeniyle ortaya çıkan kaotik hareketin tetiklenmesi amacıyla da şırıngadan ayrılan polimer moleküllerini sembolize eden her bir parçacık için bir sarsım ifadesi benzetim yapısında kullanılmıştır. Sarsım, şırınga ucundan ayrılan parçacıkların x ve y koordinatlarının (4.8) nolu eşitlikte verilen yapı yardımıyla güncellenmesi ile elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} x_i &= 10^{-3} L \sin(\omega t), \\ y_i &= 10^{-3} L \sin(\omega t), \end{aligned} \quad (4.8)$$

ω sarsım frekansı olmak üzere.

Bilgisayar benzetimleri başlangıç anında 2 adet parçacıktan oluşan bir jet olmak üzere her bir t anında sisteme yeni parçacıklar eklenmesiyle gerçekleştirilebileceği gibi belirli sayıda parçacıktan oluşan jetin çözümlenmesi

ile de elde edilebilir [24]. Çalışma kapsamında belirli sayıda parçacıktan oluşan jet kullanılmış ve (4.9) nolu kararsızlık yapısı kullanılarak parçacıkların başlangıç anındaki koordinat bilgileri yeniden tanımlanmış ve benzetimler gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{aligned} x &= 10^{-3} L \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \frac{h-z}{h}, \\ y &= 10^{-3} L \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} z\right) \frac{h-z}{h}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

λ sarsım dalga boyu olmak üzere.

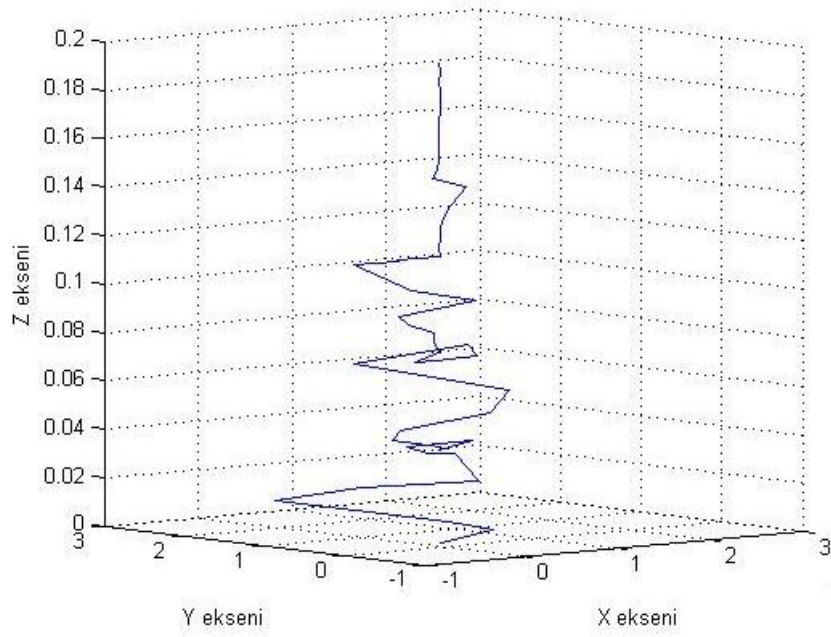
Benzetimlerde hareket eksenini doğrultusunda buharlaşmanın olmadığı (kütlenin korunduğu) ve toplayıcı plakaya ulaşan parçacıkların üzerindeki yükün boşalmasının ihmal edilebilir bir zamanda gerçekleştiği kabulü yapılmıştır. Ayrıca her bir parçacığın hızının hareket eksenini boyunca değişmediği öngörülmüştür.

4.3 Benzetim Sonuçları

Benzetim çalışmaları, iki farklı sistem modeli için Reneker and Yarin [24] tarafından oluşturulan parametre setine ait değerler kullanılarak gerçekleştirilmiştir: Polimer jetine ait parçacığın başlangıç anındaki çapı $a_0 = 150 \mu m$, uzunluk ölçütü $L = 3.19 mm$

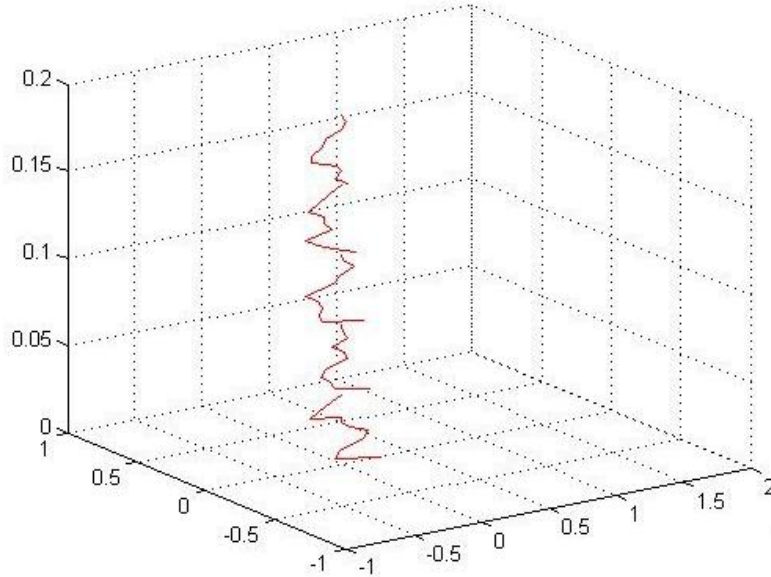
yüzey gerilimi $\alpha_0 = 0.7 kg/m^2$, dinamik sürtünme $\mu = 1000 kg/m.s$, şırınga ile toplayıcı arası mesafe $h = 20 cm$, yoğunluk $\rho = 1000 kg/m^3$ olmak üzere.

Şekil 4.3.'de yardımcı elektrodun bulunmadığı durum için gerçekleştirilen benzetim sonuçları yer almaktadır. Uygulamada polimer jetine uygulanan gerilim $V_0 = 10 kV$ ve parçacık sayısı da 50 adet olarak seçilmiştir. Elde edilen grafik, deneysel ve literatürde yer alan çalışmalara paralel sonuçlar vermiştir (yaklaşık 2.5 cm çapında bir saçılma gözlenmiştir).



Şekil 4.3. 50 parçacıklı, $V_o = 10\text{kV}$, $h = 20\text{ cm}$

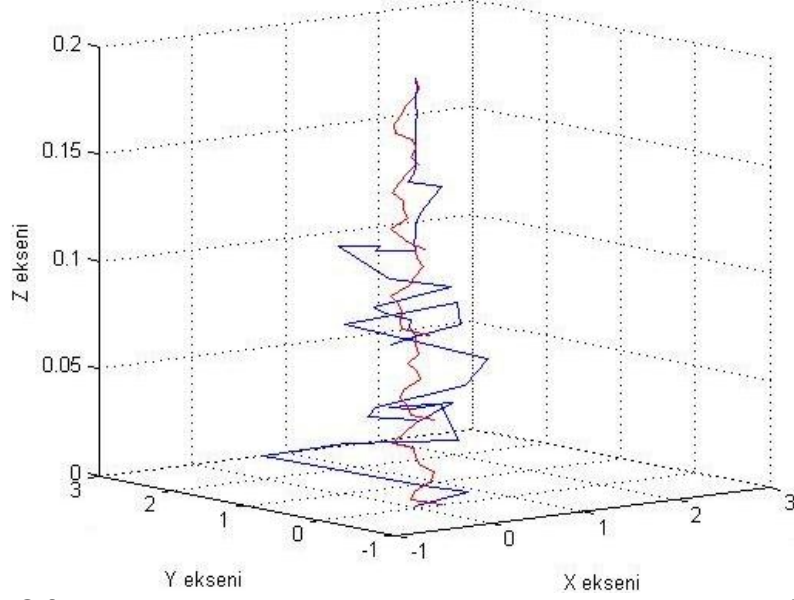
Şekil 4.4.'de ise $h = 20\text{cm}$ yüksekliğine yerleştirilen yardımcı elektrodun kullanıldığı durum için gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri gösterilmektedir. Benzetimlerde standart elektrostatik sistemine ait çalışmaya benzer şekilde 50 adet parçacık kullanılmış ve yüksek gerilim değeri olarak da $V_o = 10\text{kV}$ seçilmiştir.



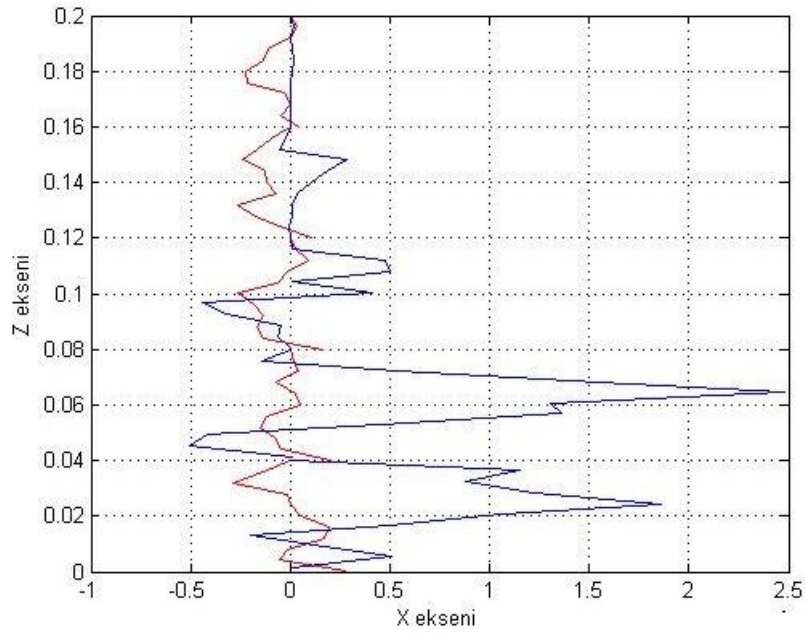
Şekil 4.4 50 parçacıklı, yardımcı elektrodlu düzenek, $V_o = 10\text{kV}$, $h = 20\text{ cm}$

Sonuçlar standart elektrostatik eğirme sistemine oranla saçılmanın önemli oranda bastırıldığını ortaya koymuştur (%75).

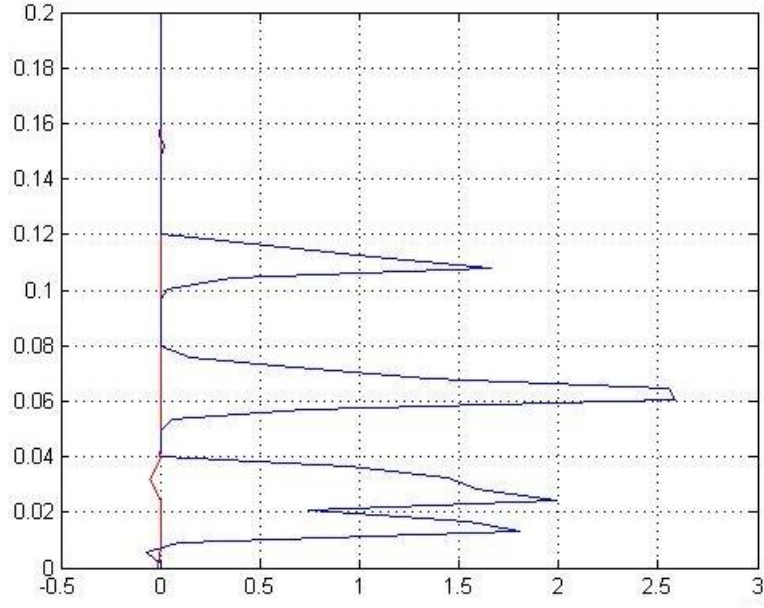
Şekil 4.3 ve 4.4.'de ayrı ayrı verilen her iki sisteme ait bilgisayar benzetimlerin daha detaylı karşılaştırılması amacıyla x-z, y-z ve x-y-z eksenleri baz alınarak 3 ve 2 boyutlu benzetim çizimleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5-4.7).



Şekil 4.5 Çift elektrotlu sistem (içile tek elektrotlu sistemin x-y-z eksenlerinde karşılaştırılması)



Şekil 4.6 X eksenindeki saçılma miktarı
(Standart sistem~2.5cm, çift elektrotlu sistem 1 cm)



Şekil 4.7 Y eksenindeki saçılma miktarı
(Standart sistem~2.5 cm, Çift elektrotlu sistem 0.25 cm)

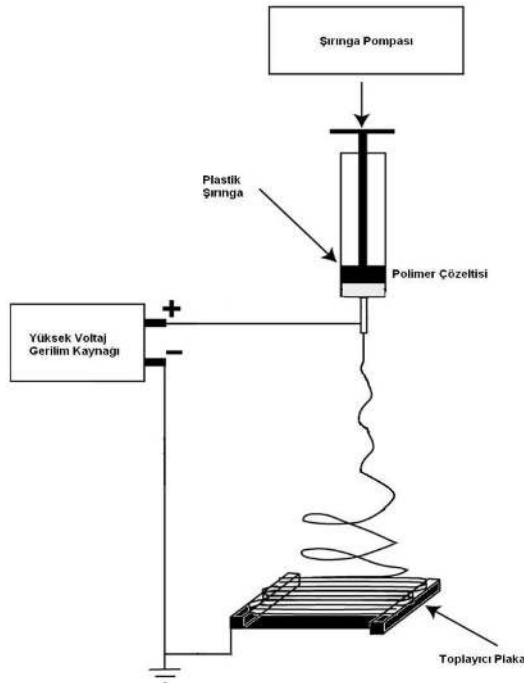
Elde edilen benzetim sonuçları incelendiğinde yardımcı elektrodun kaotik saçılma miktarlarını önemli ölçüde azalttığı görülmüştür. Y ekseninde %90'a yaklaşan bir bastırma görülürken bu oran X ekseninde %60 civarında gerçekleşmiştir. Üç boyutlu düzlemde ise saçılmanın %75 oranında azaldığı görülmektedir [45].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Elektrostatik eğirme sistemi kullanılarak nano fiber ağ yapısının sentezlenmesi, yüklü polimer molekülleri için oluşturulan jet hareketi modelinin doğrulanması ve geliştirilmesi için önem arz etmektedir. Bu doğrultuda standart ve önerilen tasarım modelleri için deneysel çalışmalar yürütülmüş ve teorik çıkarımlarla, alternatif çözümlerin üretilebilirliğinin araştırılması amacıyla, olan ilişkisi incelenmiştir.

Elektrostatik eğirme sistemlerinde yüklü moleküllerin hareket yörüngeleri boyunca gösterdikleri davranış, kullanılan çözelti türüne ve uygulanan elektrik alan şiddetine bağlı olarak değişmektedir [24]. Kaotik yapı, eriyik halde bulunan polimer moleküllerin yüksek gerilim sonucu yüzey gerilim kuvvetini aşmasıyla birlikte ortaya çıkmaktadır.

Yürütülen deneysel çalışmalar iki kısımda gerçekleştirilmiştir. İlk bölümde standart elektrostatik eğirme sistemine ait düzenek kullanılarak nano fiber elde edilmiştir (Şekil 5.1). İkinci kısımda ise tasarlanan sistem kullanılarak nano ağ yapısındaki değişimler gözlenmiştir (Şekil 2.1).

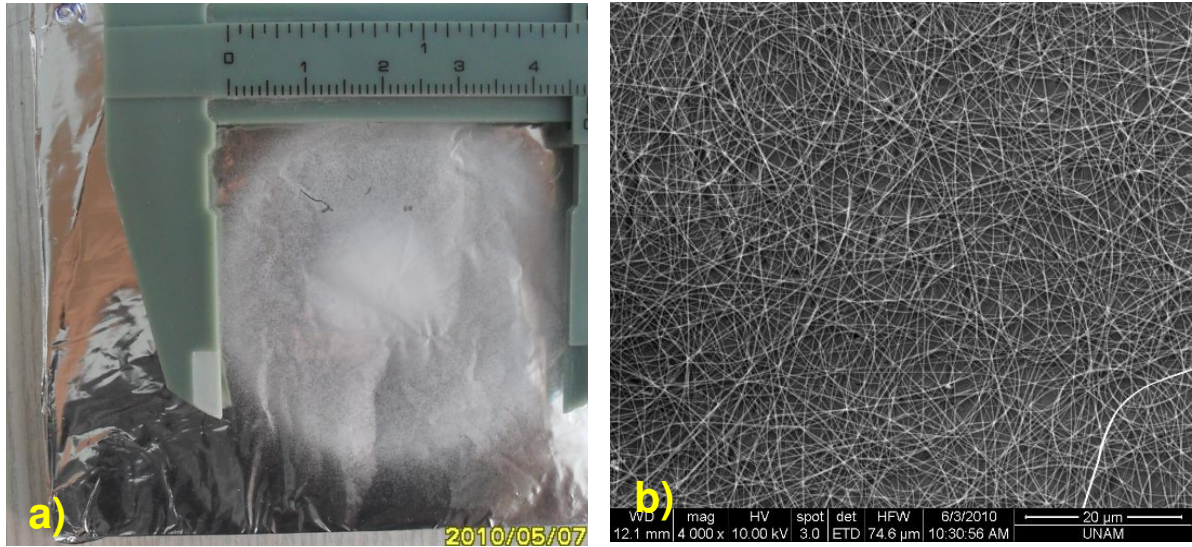


Şekil 5.1 Elektrostatik Eğirme düzeneği

5.1 Standart Elektrostatik Eğirme Sistemi Deneyleri

Elektrostatik Eğirme sistemi ile yapılan deneysel çalışmalar, literatürdeki birçok çalışmada da kullanılan, PVA ve PEO çözeltileri ile gerçekleştirilmiştir. PVA ve PEO kolay çözünbilmeleri ve literatür çalışmalarıyla karşılaştırılabilmeleri nedeniyle tercih edilmişlerdir.

İlk olarak moleküler ağırlığı 30.000 Mwa olan PVA polimeri kütlece %25 oranında 80 derecede suda çözülerek 0.965mm çapındaki şırıngaya yerleştirilmiştir. Toplayıcı plaka ile şırınga arasındaki mesafe de 10 cm olarak ayarlanmıştır. Özgün güç kaynağı yardımıyla oluşturulan elektrik alan şiddeti kademeli olarak kadar artırılmış ve elde edilen ilk görüntülere Şekil 5.2’de yer verilmiştir.



Şekil 5.2 a) PVA çözeltisine 12kV uygulanarak elde edilen fiber yapısı (R=4.5cm), **b)** SEM tarafından 4K büyütme ile oluşturulan ağ yapısına ait görüntü.

PVA için gerçekleştirilen deneyler benzer şekilde oda sıcaklığında hazırlanan kütlece %10 oranında, 300.000 Mwa moleküler ağırlığa sahip, PEO içeren sulu çözelti kullanılarak 15 cm yükseklikte ve 0.635 mm çapındaki şırınga ile tekrar edilmiş ve Şekil 5.3’deki sonuç elde edilmiştir.



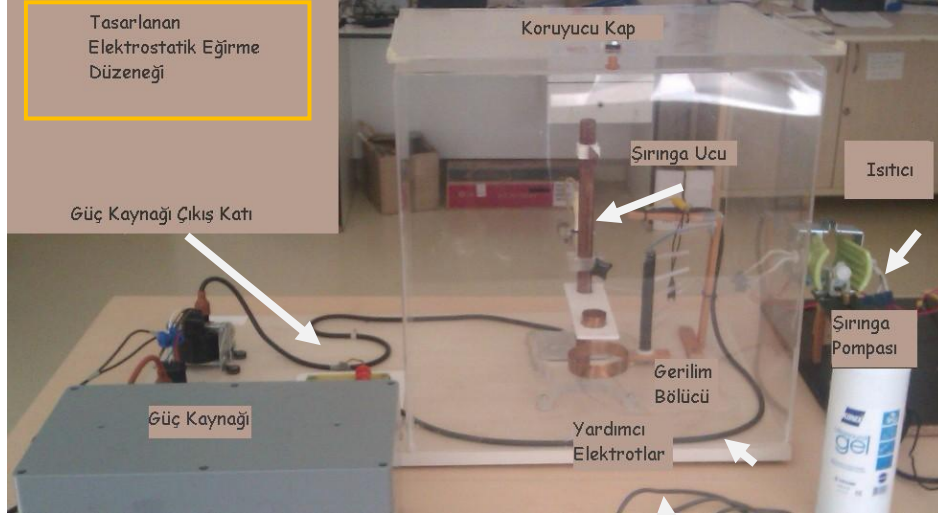
Şekil 5.3 PEO çözeltisine 20kV uygulanarak elde edilen fiber yapısı (R=8 cm)

Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar:

- Özgün elektrostatik eğirme düzeneğinin nano lif üretimde literatür çalışmalarına paralel sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [20;24;25].
- Nano lif oluşumunun uygulanan gerilim değerinin 5kV ve elektrik alan şiddetinin $\sim 1\text{kV/cm}$ civarındaki değerler aşıldığında başladığı görülmüştür.
- PEO çözeltisi ile elde edilen ağ yapısı saçılımının artan şırınga-toplayıcı plaka arası mesafesiyle paralel oranda arttığı gözlenmiştir. PVA; R=4.5 cm, PEO; R=8 cm.
- TEM görüntüleri oluşan nano lif çaplarının $\sim 150\text{ nm}$ civarında olduğunu ortaya koymuştur.

5.2 Tasarlanan Elektrostatik Eğirme Sistemi Deneyleri

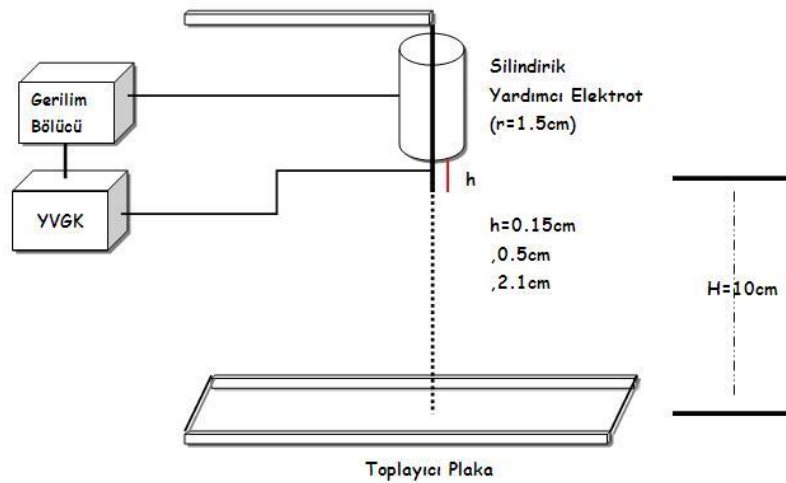
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen özgün Elektrostatik Eğirme düzeneği (Şekil 5.4) ile yapılan deneyler iki bölüm halinde gerçekleştirilmiştir. İlk bölümde sentezlenen fiber ağ yapısı saçılımının Şekil 5.1'deki standart düzeneğe oranla bastırılması amacıyla silindirik elektrotlar kullanılmıştır. İkinci bölümde ise düzenli ağ yapılarının elde edilmesine yönelik olarak, paralel elektrotlar eğirme sistemiyle bütünleştirilmiştir.



Şekil 5.4 Yardımcı elektrotlar kullanılarak oluşturulan Elektrostatik Eğirme düzeneği

5.2.1 Silindirik yardımcı elektrot kullanılarak gerçekleştirilen deneyler

Tasarlanan Elektrostatik Eğirme düzeneği ile gerçekleştirilen ilk deneyler, tekli ve ikili, içi boş silindirik iletken bakır halkaların (yardımcı elektrotlar) kullanıldığı sistem ile gerçekleştirilmiştir. İlk gözlemler PVA çözeltisi ile literatürde yer alan çalışmalara paralel olarak tek bir yardımcı elektrot kullanılarak yapılmıştır (Şekil 5.5) [20]. Yardımcı elektrot şırınga iğnesini içine alacak şekilde sisteme yerleştirilmiş ve deneyler elektrot konumunun ağ oluşumuna olan etkisini gözlemlemek amacıyla iletken plaka ile iğne ucu arası mesafenin farklı farklı değerler aldığı durumlar için tekrar edilmiştir.



Şekil 5.5 Tek yardımcı elektrotlu Elektrostatik Eğirme düzeneği

Sonuçlar sabit uzunluk ve çaptaki şırınganın kullanıldığı ($u_s = 5cm$, $r_s = 0.965mm$) ve şırınga ucu – iletken plaka arası mesafenin $h = 0.15cm$, $0.5cm$, $2.1cm$ olduğu durumlar için verilmiştir.

Elde edilen ağ yapısı çapları: $h = 0.5cm$ için yaklaşık 3cm, $h = 0.15cm$ için yaklaşık 3.5cm ve $h = 2.1cm$ için ise 4.5cm olarak ölçülmüştür. Şekil 5.6-5.8’de tek yardımcı elektrot kullanılarak PVA çözeltisi ile gerçekleştirilen çalışmalar sonunda elde edilen görüntüler yer almaktadır.



Şekil 5.6 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı. $h=0.5$ cm (PVA çözeltisi)



Şekil 5.7 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı. $h=0.15cm$ (PVA çözeltisi)



Şekil 5.8 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı, $h=2.1$ cm (PVA çözeltisi)

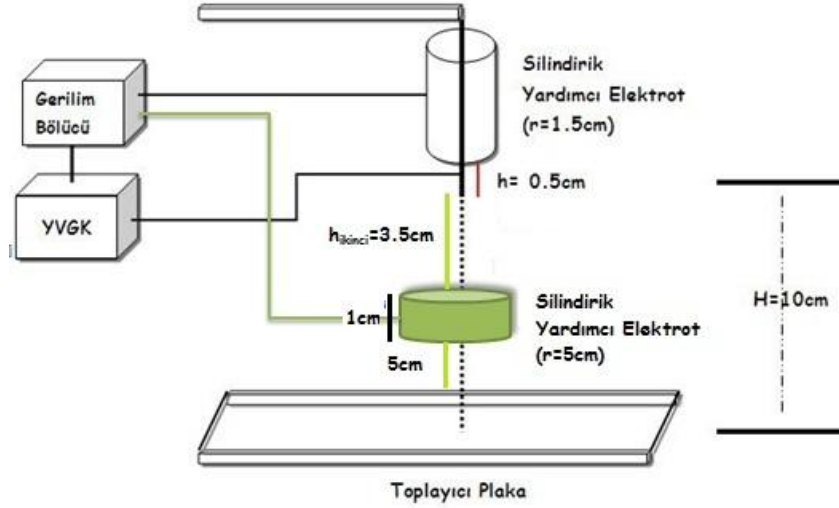
Yapılan gözlemler PEO çözeltisi ile şırınga-toplayıcı plaka arası mesafenin $H=15\text{cm}$ olduğu durumda tekrarlanmış ve optimum fiber ağ saçılımı çapı PVA çözeltisine paralel bir şekilde $h=0.5\text{cm}$ olduğu durumda elde edilmiştir (Şekil 5.9).



Şekil 5.9 Elektrostatik Eğirme ile elde edilen ağ yapısı, $h=0.5$ cm (PEO çözeltisi)

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda literatür çalışmalarına paralel olarak h/H oranı 0.1 değerine yakınsadığında fiber ağ yapısındaki saçılmanın en aza indirgendiği gözlenmiştir ($YVGK=12\text{kV}$) [20].

Elektrostatik eğirme düzeneğinde nano lif yapısının bastırma oranının daha da fazla artırılması amacıyla sisteme saçılma eksenine doğrultusunda ikincil bir elektrot bağlanmıştır (Şekil 5.10).



Şekil 5.10 Çift yardımcı elektrotlu Elektrostatik Eğirme düzeneği

İki elektrotlu sistem ile deneyler PVA çözeltisi kullanılarak tekrarlandığında nano lif yapısına ait çap değerlerinin yaklaşık olarak 1.5 cm'e kadar indirildiği gözlenmiştir (Şekil 5.11).



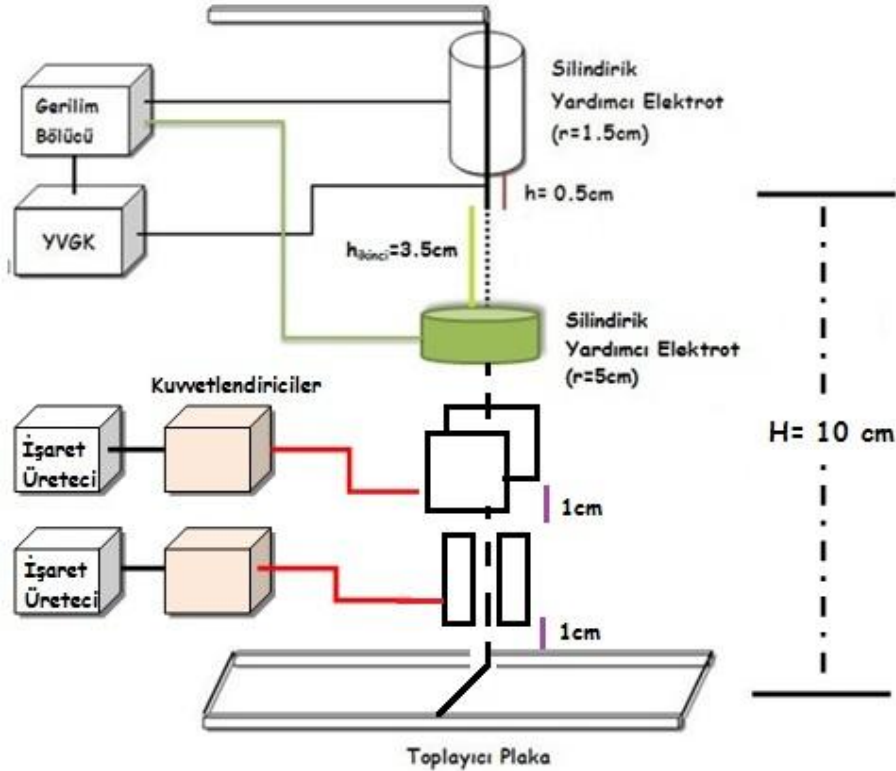
Şekil 5.11 İki silindirik elektrot kullanılarak oluşturulan Nano lif yapısı ($R = 1.5\text{cm}$), $h_{birinci} = 0.5\text{cm}$ $h_{ikinci} = 3.5\text{cm}$ $V_1 = 12\text{kV}$, $V_2 = 6\text{kV}$ (PVA çözeltisi)

Çalışmada optimum nano lif çaplarının elde edilmesi amacıyla yardımcı elektrot ile şırınga arasındaki mesafe daha önceki deneylerden yola çıkılarak 0.5cm olarak

alınmıştır. İkincil halka ile şırınga arası mesafe ise optimum değerini 3.5cm civarında almıştır. Öte yandan ikincil halka üzerine değişik gerilimler uygulanarak (12,9,6,4 ve 2kV) saçılma oranlarının değişimi gözlemlendiğinde, 6kV değerinin en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Düşük ve yüksek gerilim değerlerinde ağ yapısının çapı ~3cm civarında değişmiştir.

5.2.2 Paralel yardımcı elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneyler

Elektrostatik Eğirme düzeneği tasarım modelinde öngörülen denetlenebilir nano fiberlerin üretilmesi amacıyla iletken düzlemsel plakalar, silindirik yardımcı elektrotların kullanıldığı sistem ile bütünleştirilmiştir (Şekil 5.12). Kurgulanan sistem yapısı ikili ve dörtlü paralel levhaların polimer jeti hareket yörüngesi doğrultusunda yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Deney çalışmaları iletken levhaların ikili ve dörtlü halde kullanıldığı iki farklı aşamada gerçekleştirilmiştir.



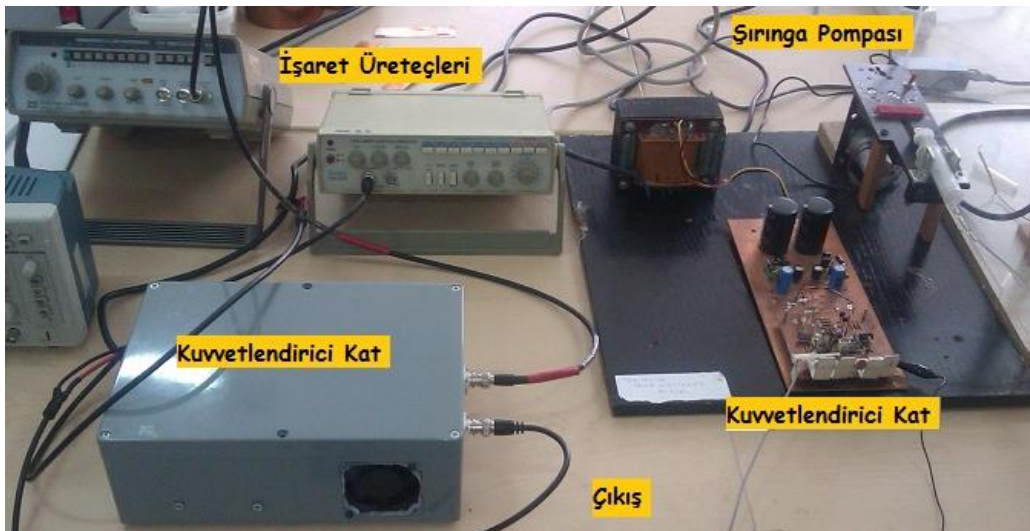
Şekil 5.12 Paralel yardımcı elektrotlu Elektrostatik Eğirme düzeneği

İlk olarak, 1cm genişliğinde ve 10cm uzunluğundaki düzlemsel iki plaka eğirme düzeneğine yerleştirilmiş ve fonksiyon üretici (Escort EFG-3210) aracılığıyla oluşturulan rampa işareti tarafından sürülmüştür. Bakır plakalar arasında oluşan

elektrik alan şiddetinin artırılması amacıyla da iletken levhalar ile işaret üretici katı arasına Koçum [43] tarafından tasarlanan yüksek gerilim kuvvetlendiricisi bağlanmıştır (Şekil 5.13). Çalışmalar sırasında farklı sıklık (1 Hz – 1 kHz) ve genlikteki (10 V – 300 V) gerilim değerleri kullanılarak en uygun sonuçların elde edilmesine çalışılmıştır.

Deneyler, düzlemsel paralel elektrotların konumunun ağ oluşumuna olan etkisini gözlemlemek amacıyla iletken plaka ile iğne ucu arası mesafenin farklı farklı değerler aldığı durumlar için tekrar edilmiştir ($h_{paralel}=1-9cm$). Paralel plakalar arası mesafe ise 10 cm olarak ayarlanmıştır. Çalışmalarda polimer çözeltisi olarak PVA kullanılmıştır.

İletken levhaların ile toplayıcı arası mesafenin $h_{paralel}=5cm$ ve plakalar üzerine düşen gerilimin 175V, sıklığın 100Hz olduğu durumda elde edilen sonuçlar Şekil 5.14’de görülmektedir. Elde edilen polimer liflerinin toplayıcı plaka yerine paralel elektrotlar arasında toplanması üzerine şırınga ile paralel elektrotlar arası mesafe arttırılarak deneyler tekrar edilmiştir ($h_{paralel}=8cm$, $g_{paralel}=11cm$). Yeni yapı ile gerçekleştirilen deneyler sonucunda polimer ağları toplayıcı plaka üzerinde oluşmuştur (Şekil 5.15).

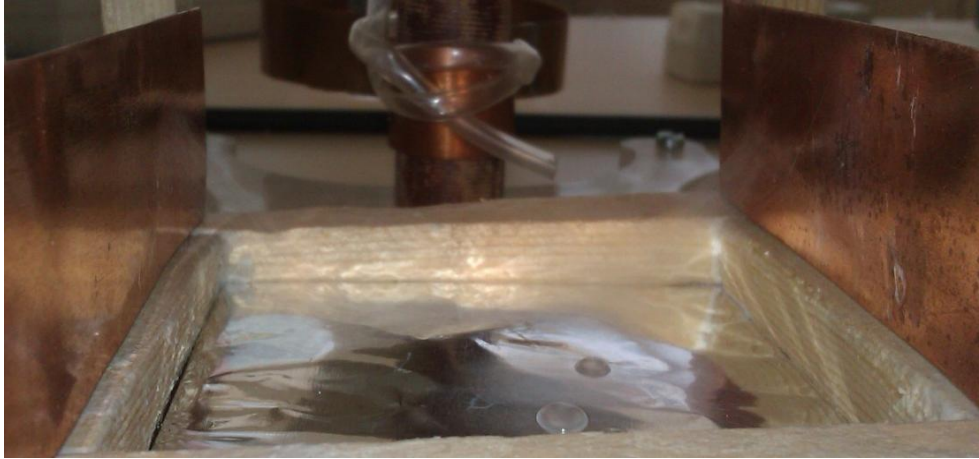


Şekil 5-13 Paralel elektrotlar sürücü katı



Şekil 5.14 İkili paralel elektrot ile PVA çözeltisi kullanılarak elde edilen fiber ağ yapısı. ($h_{paralel} = 5cm$, $g_{paralel} = 10cm$)

İkili plaka ile gerçekleştirilen deneylere ait gözlemler, her iki durumda da toplayıcı plaka üzerindeki ağ oluşumunun makro seviyede düzenli dizilime sahip olduğunu ortaya koymuştur.



Şekil 5.15 İkili paralel elektrot ile PVA çözeltisi kullanılarak elde edilen fiber ağ yapısı. ($h_{paralel} = 8cm$, $g_{paralel} = 11cm$)

Paralel elektrotlarla gerçekleştirilen deneylerin ikinci aşamasında ise iki çift düzlemsel iletken plaka birbirlerine dik ve jet hareketine paralel olacak şekilde eğirme düzeneğine yerleştirilmiştir. Paralel elektrotlar fonksiyon üreteçleri (Escort EFG-3210 , GW GFG-8015G) tarafından oluşturulan rampa işareti ile sürülmüştür (Şekil 5.13). Her iki plaka üzerine düşen gerilimin genlik ve sıklık değerlerinin ölçülmesi amacıyla çıkış katlarından Tektronix TDS 2002 osiloskobu yardımıyla ölçümler alınmıştır.

Deneyler, paralel plakalar arası mesafenin 1cm ve her iki çift levhanın şırınga ucuna göre referans uzaklığının sırasıyla 6cm ve 8cm olduğu durumda gerçekleştirilmiştir ($h_{paralel-1} = 6cm$, $h_{paralel-2} = 8cm$ $g_{paralel} = 11cm$). Her iki çift düzlemsel plaka üzerine düşen gerilimin 175V ve sıklığının 100Hz olduğu durumda oluşan ağ yapısı Şekil 5.16'da yer almaktadır.



Şekil 5.16 Dörtlü paralel elektrot kullanılarak elde edilen fiber ağ yapısı. PEO çözeltisi, ($h_{paralel-1} = 6cm$, $h_{paralel-2} = 8cm$ $g_{paralel} = 11cm$).

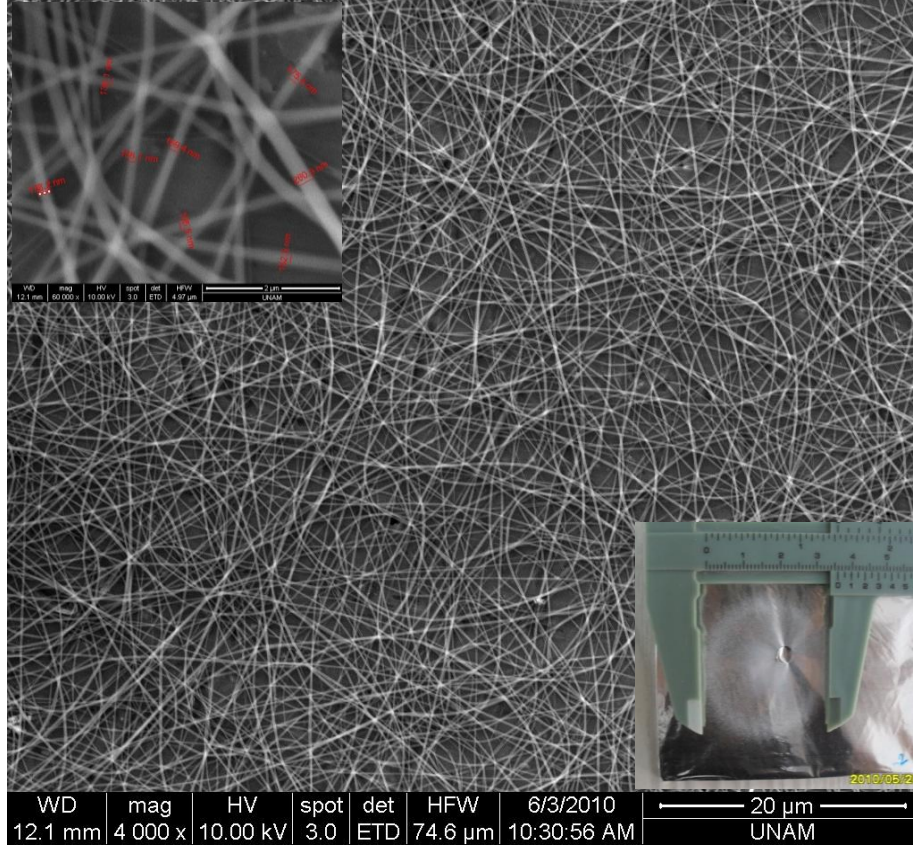
5.3 TEM Görüntüleri

DeneySEL çalışmalar sonunda elde fiber yapısının incelenmesinin sadece dış gözlemler üzerinden yapılması oluşan lif boyutlarının bilinmemesi nedeniyle anlamlı bilgi vermemektedir. Bu doğrultuda ağ yapısının detaylı olarak incelenebildiği TEM (ESEM-FEI Quanta 200) görüntüleri çekilmiştir.

5.3.1 Tek yardımcı elektrot

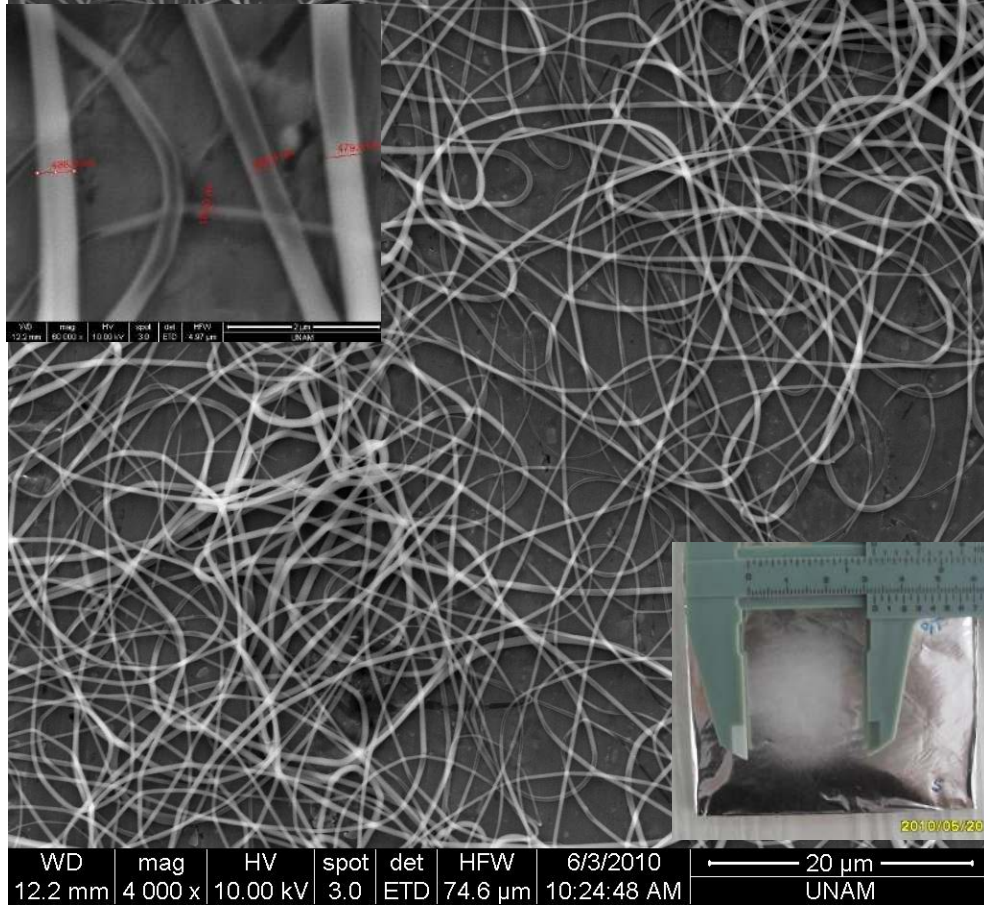
TEM görüntülemeleri ilk olarak tek yardımcı elektrotla gerçekleştirilen deney sonuçları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gözlemler için PVA çözeltisi ile elde edilen ve fiber saçılımının görece daha az, şırınga toplayıcı arası mesafenin 0.15/0.5 cm, olduğu durumlar seçilmiştir (Şekil 5.6 – 5.7).

Şekil 5.17 ve 5.18’de TEM tarafından 4000X büyütme oranında elde edilen görüntüler yer almaktadır. Yardımcı elektrot ile şırınga arasındaki mesafenin 0.15 cm olduğu durumda fiber çaplarının ~150 nm civarında olduğu görülmüştür (Şekil 5.17). Yardımcı elektrot şırınga arası mesafe 0.5cm’ye çıkarıldığında ise bu değerler ~350 nm civarına çıkmıştır (Şekil 5.18)



Şekil 5.17 Tek yardımcı elektrot ile (h=0.15cm) TEM görüntüsü

Sonuçlar yardımcı elektrot şırınga arası mesafe azaldıkça fiber yoğunluğu atarken fiber çaplarının azaldığını göstermiştir. Öte yandan oluşan yapısının saçılımı şırınga elektrot arası mesafenin 0.5 cm olduğu duruma göre artmıştır. Optimum ağ saçılımı ve nanolif çapının elde edilmesi, şırınganın elektroda olan mesafesine orantılı olarak değişirken, bu durum düzenli ağ yapısı sentezi için yeterli olamamaktadır.

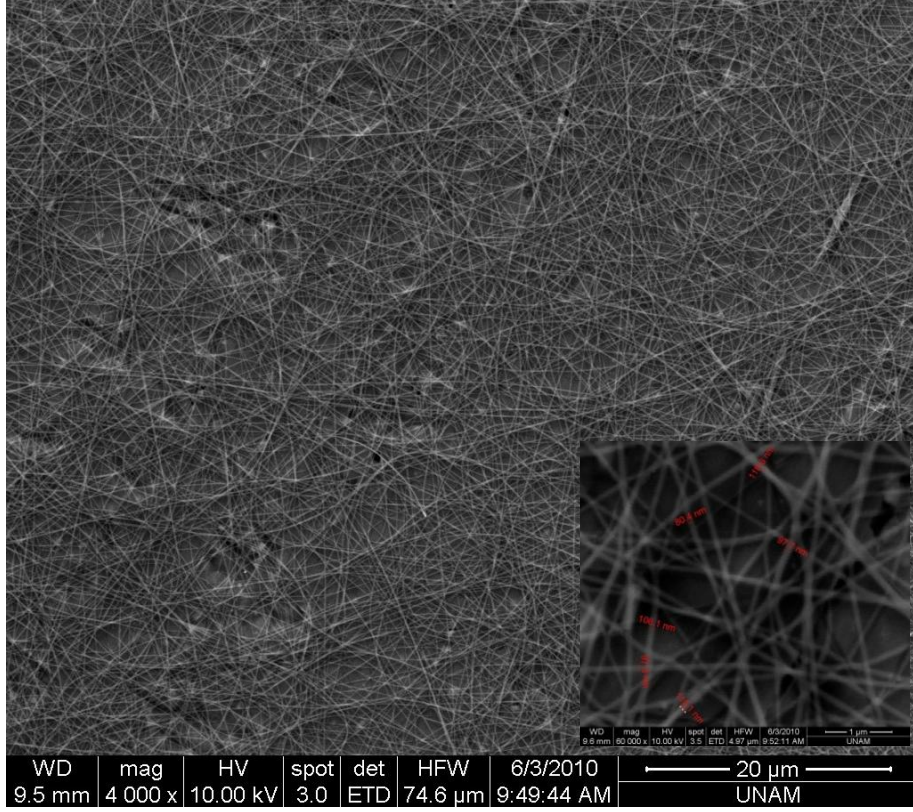


Şekil 5.18 Tek yardımcı elektrot ile ($h=0.5$ cm) TEM görüntüsü

5.3.2 Çift yardımcı elektrot

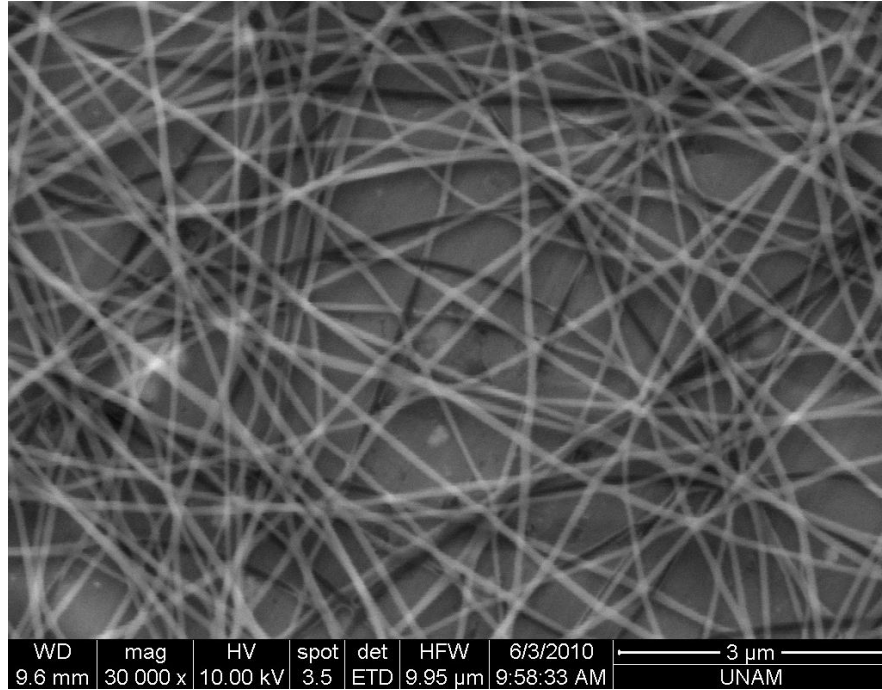
Nano lif yapısının hareket eksenini boyunca saçılımının yardımcı elektrotlar yardımıyla makro düzeyde azaldığı Şekil 5.10.'da görülmektedir. Elde edilen bu yapıdaki lif karakteristiğinin incelenmesi için alınan örnekler TEM yardımıyla incelendiğinde Şekil 5.19'daki yapılar gözlenmiştir.

4000X büyütme ile elde edilen görüntüler ikincil yardımcı elektrot ile ağ yapısı yoğunluğunun tek yardımcı elektrota oranla makro boyutun yanı sıra mikroyükte da arttığını göstermiştir. Büyütme oranı 60.000X değerine çıkarıldığında lif çaplarının ~ 100 nm civarında olduğunu görülmüştür. Söz konusu sonuçlar oluşturulan deneysel yapı ile daha az saçılımlı ve küçük boyutlu lif elde edildiğini göstermiştir. Şekil 5.20'de çift yardımcı elektrot ile oluşturulan lif oluşumunun dağılımının incelemek amacıyla alınan 30.000X büyütme görüntüleri yer almaktadır.



Şekil 5.19 İki yardımcı elektrot ile TEM görüntüsü, $h_{birinci} = 0.5cm$ $h_{ikinci} = 3.5cm$

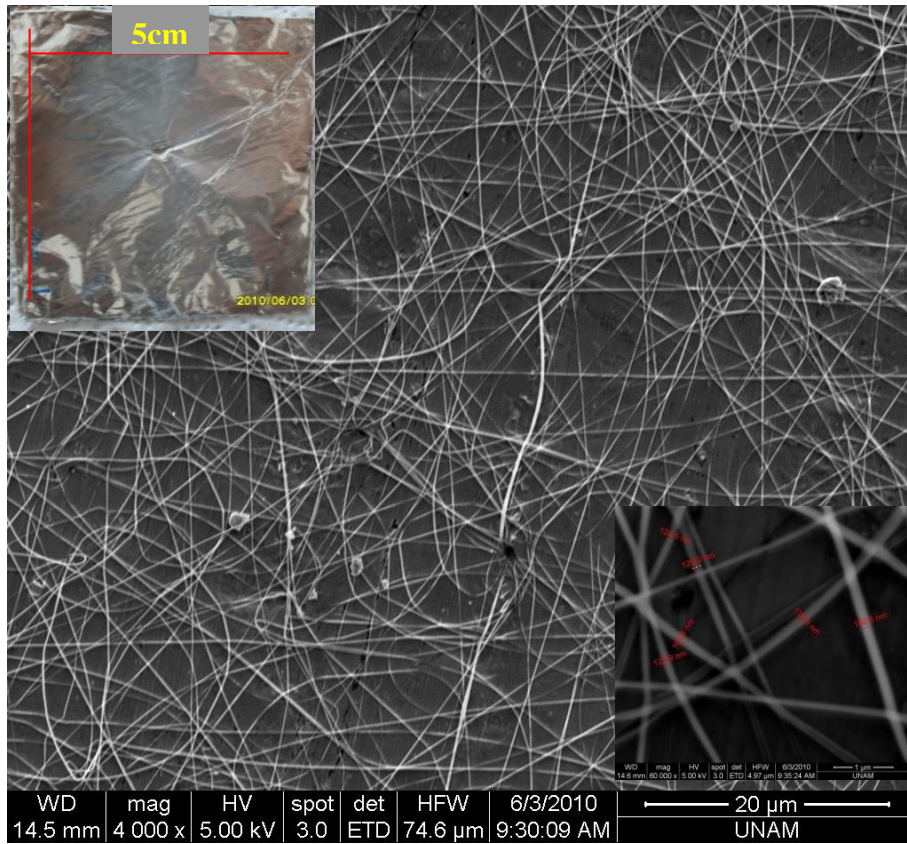
Elde edilen görüntüler fiber ağ yapısının karmaşık karakteristiğini koruduğunu göstermiştir. İkincil elektrot DC gerilim ile beslendiğinden oluşan elektrik alan fiber çözeltisini sadece saçılım ve lif çapı yönünden etkilemiştir.



Şekil 5.20 İki yardımcı elektrot ile 30.000X büyütme TEM görüntüsü

5.3.3 İkincil elektrot AC gerilim ile kutuplandırıldığında TEM görüntüleri

Deneyssel olarak çift Elektrotlu Elektrostatik Eğirme düzeneği ile DC gerilim kullanılarak yapılan çalışmalar ağ oluşumunda saçılımı azaltırken kaotik dizilimin azaltılmasında bir ilerleme sağlayamamıştır. Nano lif çaplarında dikkat çekici gelişmeler sağlanmakla beraber fiber ağların istenen doğrultularda dizilimin yapılamamıştır. Özgün tasarım güç kaynağının AC gerilim üretebilme yeteneği bulunmasından yola çıkılarak çalışmalara ikincil yardımcı elektrot üzerine AC gerilim (YVGK ~8.5kV sinüzoidal) verilerek devam edilmiştir (Şekil 5.21).

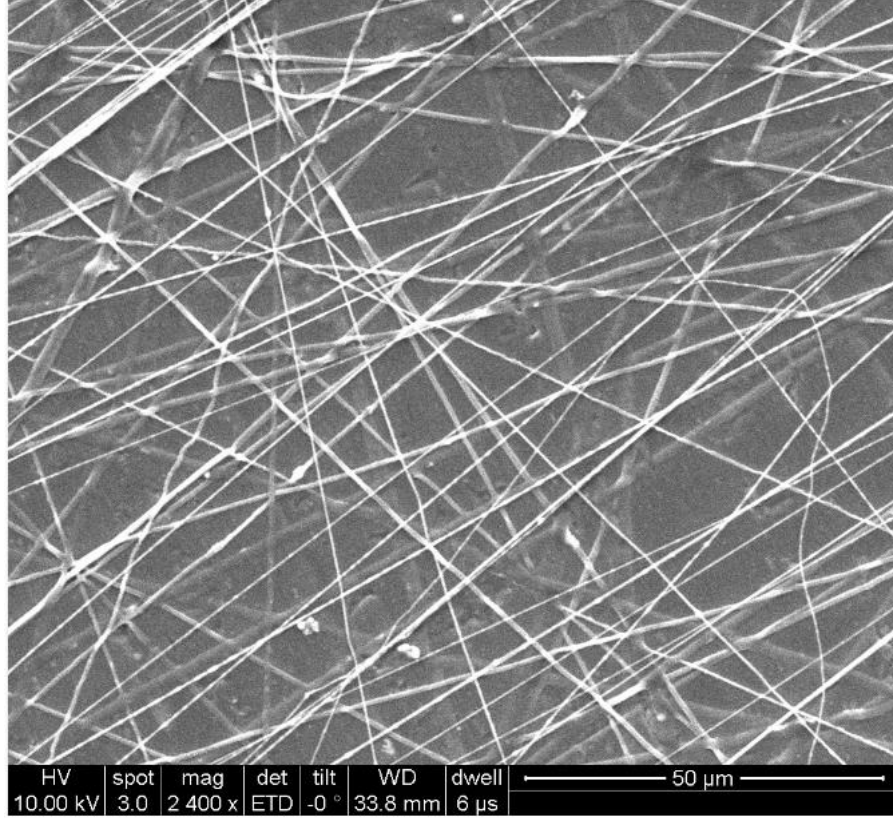


Şekil 5.21 İki yardımcı elektrot AC gerilim’le elde edilen TEM görüntüsü

AC gerilim ile yapılan deney sonuçları fiber ağ yapısındaki yoğunluğun azalırken saçılım çapının arttığını göstermiştir. Mikro boyutta (60.000X) fiber ağı incelendiğinde lif çaplarının ~140nm boyutlarında olduğu görülmüştür. Elde edilen sonuçlar ikincil elektrotta AC gerilim tarafından oluşturulan elektrik alanın değişken olması nedeniyle fiber saçılımının arttığını göstermiştir. DC gerilimden farklı olarak AC gerilim fiber çaplarında belirli bir oranda artışa neden olmuştur (~30 nm) .

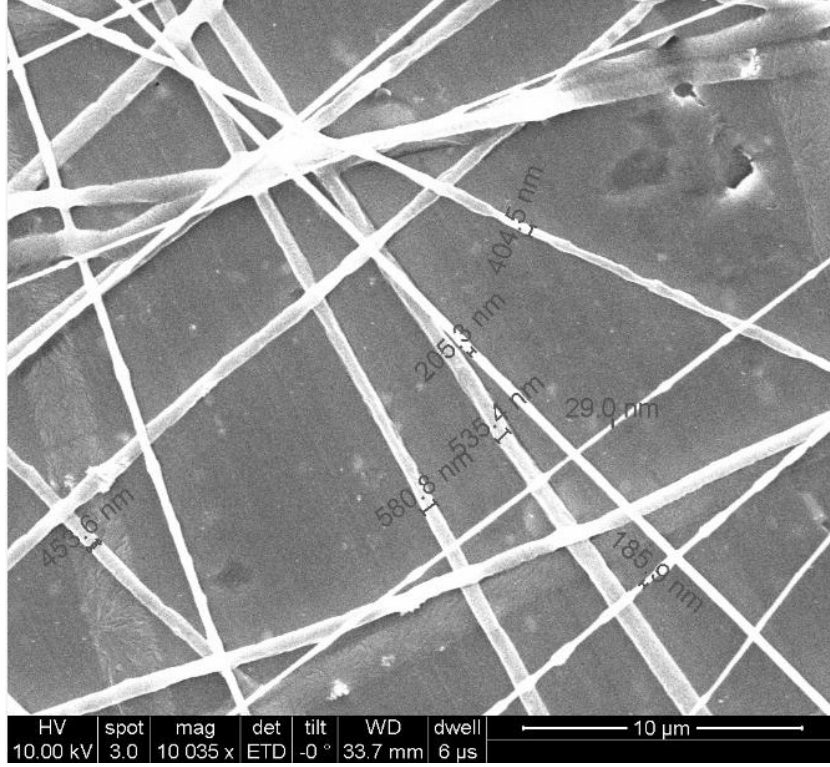
5.3.4 İkili paralel yardımcı elektrot

Düzenli ağ yapısının sentezlenmesi amacıyla ikili iletken düzlemsel elektrot kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde makro düzeyde fiberlerin dizilimde iyileşmeler görülmüştür (Şekil 5.14). Oluşan polimer yığınının nano boyuttaki yapısının incelenmesi amacıyla TEM görüntülemesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.22).



Şekil 5.22 İkili paralel elektrot ile elde edilen TEM görüntüsü (2.400x büyütme)

TEM görüntüsü incelendiğinde, standart ve silindirik plakaların kullandığında Elektrostatik Eğirme sisteme oranla fiber dizilimindeki karmaşık yapının önemli oranda azaldığı görülmektedir. Sonuçlar, paralel elektrotların etkisi altında oluşan fiber liflerinin doğrulsallığı artarken dizilimlerindeki karmaşıklığın da önemli oranda azaldığını göstermiştir. TEM ile 10.000X büyütme kullanılarak yapılan ölçümlerde ise lif çaplarının 200-500 nm aralığında olduğu görülmüştür (Şekil 5.23).

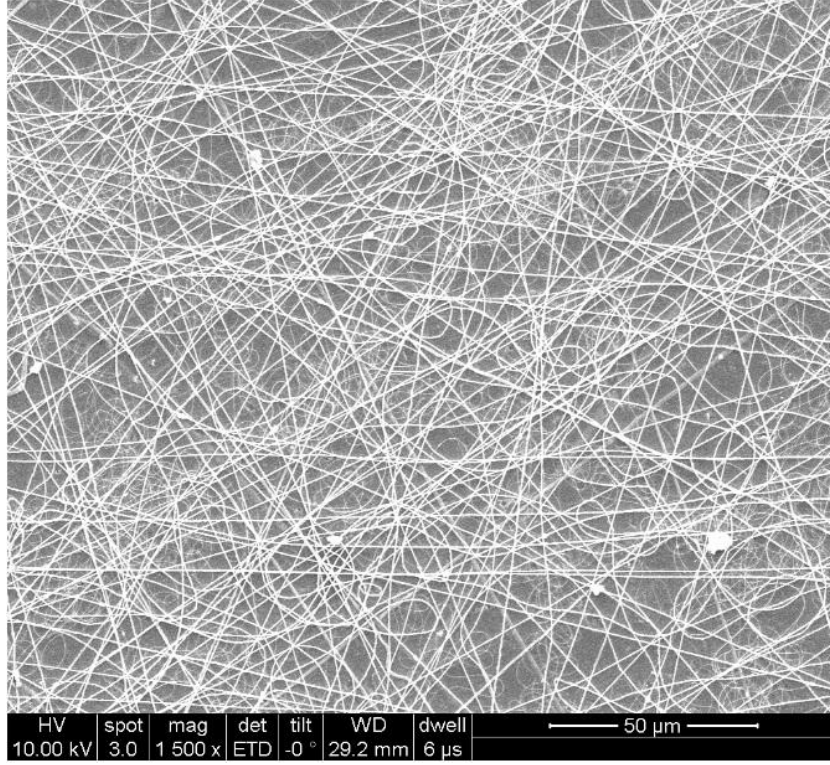


Şekil 5.23 İkili paralel elektrot ile elde edilen fiber çapları: $R_{fiber} = 200 - 500nm$

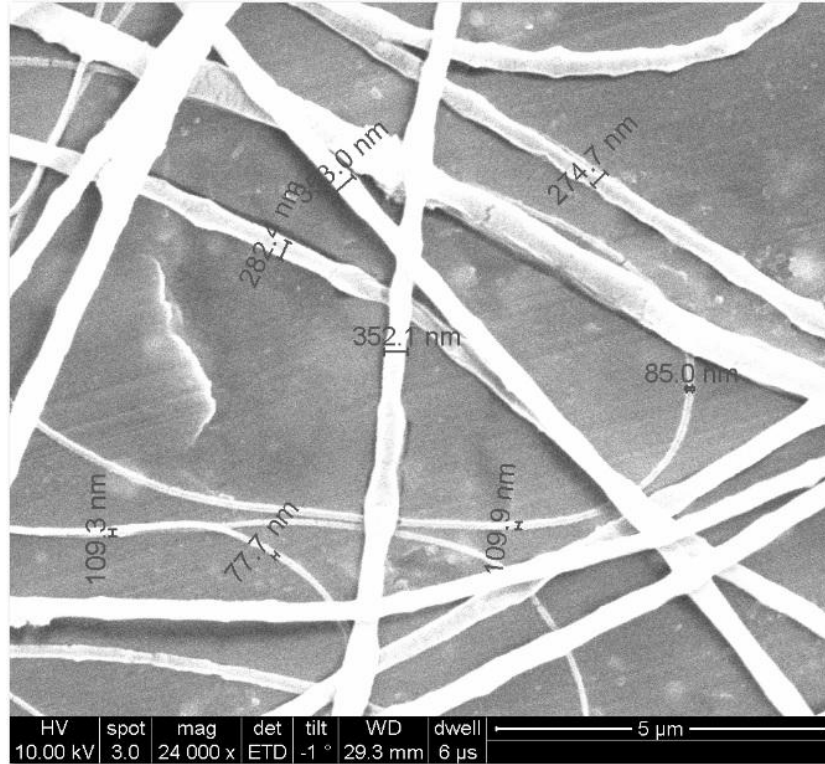
5.3.5 Dörtlü paralel yardımcı elektrot

Dörtlü paralel elektrotlar kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde toplayıcı plaka üzerindeki fiber ağ diziliminin yapısı makro düzeydeki görüntülemeler anlaşılamamaktadır (Şekil 5.16). Bu nedenle üretilen fiber liflerinin karakteristiğinin incelenmesi için TEM görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.24).

Sonuçlar, dörtlü paralel elektrotların etkisi altında oluşan fiber liflerinin doğrulsallık ve dizilim yönlerinden ikili paralel elektrodla sentezlenen liflere benzeştiğini ortaya koymuştur. Bununla beraber TEM görüntüleri, dörtlü elektrot yapısının kullanıldığı sistemle elde edilen ağ yapısı yoğunluğunun iki elektrolu sisteme oranla daha fazla olduğunu göstermiştir. Nano lif çaplarının ise 100-350 nm aralığında olduğu görülmüştür (Şekil 5.25).



Şekil 5.24 Dörtlü paralel elektrot ile elde edilen TEM görüntüsü (1.500x büyütme)



Şekil 5.25 Dörtlü paralel elektrot ile elde edilen fiber çapları: $R_{fiber} = 100 - 350nm$

6. SONUÇ

Yürütülen tez çalışması kapsamında özgün Elektrostatik Eğirme düzeneği tasarlanarak, sistemin kaotik karakteristiğinin teorik ve benzetim modellerinin çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca silindirik ve paralel iletken plakalar tarafından oluşturulan ikincil elektrik alanlar yardımıyla polimer jetinin saçılımı bastırılarak, düzenli dizilime sahip ağ yapıları sentezlenmiştir.

İlk olarak literatürde standartlaşmış ve başarılı bir şekilde uygulanmış olan Elektrostatik Eğirme yöntemleri referans alınarak, özgün eğirme düzeneği üretilerek karmaşık nano lif sentezi gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmaları kapsamında elektrik alan şiddeti, çözelti derişimi, şırınga-toplayıcı plaka arası mesafe gibi değişkenlerin sentezlenen fiber ağ yapısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar fiber saçılımının şırınga ucuna uygulanan gerilimin 5kV ve elektrik alan şiddetinin $\sim 1\text{kV/cm}$ civarındaki değerleri aştığında başladığını göstermiştir. Nano fiber oluşumu ise kullanılan polimer çözeltisine bağlı olarak şırınga çapları ile orantılı olarak değişmiştir. PVA çözeltisi ile yapılan deneylerde şırınga çapının 0.965 mm olduğu durumda, fiber çapı ve saçılımı açısından en uygun sonuçların elde edildiği görülmüştür ($R_{ağ-pva} = 4.5\text{cm}$, $r_{fiber} \sim 150\text{nm}$). Tasarlanan eğirme sistemi ile elde edilen deney sonuçlarının karşılaştırmalı olarak incelemesi amacıyla deneyler literatürde sıkça kullanılan ve düşük sıcaklıklarda çözünebilen PEO çözeltisi ile tekrar edilmiş ve en iyi sonuçlara şırınga çapının 0.635 mm olduğu durumda erişilmiştir ($R_{ağ-peo} = 8\text{cm}$, $r_{fiber} \sim 100\text{nm}$).

İkinci aşamada, standart ve iletken plakalar kullanılarak oluşturulan Elektrostatik Eğirme sistemi ile sentezlenen fiber ağ yapısı, akışkanlar mekaniği ve elektrostatik alan kavramları kullanılarak modellenmiştir. Çıkarımlarda polimer jeti için parçacık yaklaşımı kullanılmış ve her bir parçacık için jet yörüngesinin, ayrık zamanlı dinamik denklem takımı oluşturulmuştur. Ayrıca kurgulanan teorik yaklaşımlar kullanılarak eğirme sisteminin bilgisayar benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar çözümlmeleri için parçacıklar arasında oluşan visko-elastik gerilme (1.dereceden diferansiyel denklem) ve kuvvet ifadesi (2.dereceden diferansiyel denklem) temel

alınmıştır. Benzetimler MATLAB ortamında ve sonlu farklar yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, sonlu uzunluktaki içi boş silindirik iletken plakanın, fiber saçılımını, standart eğirme düzeneğinin referans alındığı duruma oranla, %75 azalttığını göstermiştir [45].

Teorik model yapısı kullanılarak gerçekleştirilen bilgisayar benzetimleri ile deneysel sonuçlar uyum içindedir. Benzetim ile deneyler arasındaki görülen farklılıkların başlıca sebepleri; benzetim algoritmasında kullanılan parçacık sayısının yetersiz olması, polimer jeti hareketi sırasındaki buharlaşmanın ihmal edilmesi ve polimer jet yapısı için tek tip modelin kullanılmasıdır.

Son aşamada ise polimer jetlerinin hareket doğrultusu boyunca oluşturulan ikincil elektrik alanlar yardımıyla denetlenebilir ve az saçılımlı nano lif yapılarının elde edilmesine yönelik deneyler gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar iki farklı polimer çözeltisinin (PVA/PEO) kullanıldığı iki farklı deney seti ile yürütülmüştür.

Birinci adımda tekli ve ikili silindirik elektrotların kullanıldığı yapıya ait deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar plakaların fiber saçılımını önemli oranda bastırdığını ortaya koymuştur. PVA çözeltisinde ağ çapı tek yardımcı elektrodun bulunduğu durumda standart sisteme oranla %30 ($R_{ağ-önce} = 4.5cm$, $R_{ağ-sonra} = 3cm$) oranında azalırken PEO çözeltisi için bu oran ~%50 ($R_{ağ-önce} = 8cm$, $R_{ağ-sonra} = 4cm$) olarak gerçekleşmiştir. Elektrot sayısı ikiye çıkarıldığında ise PVA çözeltisi için elde edilen ağ çapındaki daralma ~%67 olarak ölçülmüştür ($R_{ağ-çift elektrot} = 1.5cm$).

Fiber çapları (PVA çözeltisi) TEM görüntüleri aracılığıyla incelendiğinde ise, tekli elektrodun kullanıldığı durumda oluşan fiberlerin şırınga ucu-silindirik plaka arası mesafeye bağlı olarak $R_{fiber-pva} = 150nm \sim 350nm$ ($h = 0.15 - 0.5cm$) aralığında değişen boyutlarda olduğu görülmüştür. Sonuçlar yardımcı elektrot şırınga arası mesafe azaldıkça fiber yoğunluğu artarken fiber çaplarının azaldığını göstermiştir. Standart eğirme düzeneği ile karşılaştırıldığında ise fiber çaplarında görece bir artış görülmüştür. İkili elektrodun kullanıldığı durumda ($h_{birinci} = 0.5cm$, $h_{ikinci} = 3.5cm$) fiber çaplarının ortalaması $R_{fiber-pva} = 100nm$ olarak ölçülmüştür. Bu durumda ikili silindirik elektrodun bulunduğu deneysel yapı ile daha az saçılımlı ve küçük boyutlu lif elde edildiği görülmüştür [45].

İkinci adımda ikili ve dörtlü paralel elektrotlar polimer jeti yörüngesi doğrultusuna yerleştirilerek, düzgün diziliimli nano lif oluşumunun elde edilebilirliği deneysel olarak araştırılmıştır (şekil 5.12). alışmalar ikili paralel elektrodun 175 volt gerilime ve 100 Hz'lik sıklığa sahip bir rampa işareti ile sürülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına ait TEM görüntüleri incelendiğinde, nano liflerin doğrultularında ve dizilimlerinde önemli iyileştirilmeler sağlandığı görülmüştür. Oluşan fiber çapları ise $R_{fiber-pva} = 200 - 500 \text{ nm}$ aralığında gerçekleşmiştir.

Benzer şekilde dörtlü elektrot ile gerçekleştirilen deneylerde, fiber diziliminin, yönlendirici elektrik alanın iki farklı eksenindeki etkisi altında, doğrusal olduğu görülmüştür. Fiber dizilimleri her iki eksen yönünde de gerçekleşmiştir. Fiber çapları ise $R_{fiber-pva} = 100 - 350 \text{ nm}$ aralığında gerçekleşmiştir.

İkili ve dörtlü paralel elektrotlarla elde edilen fiber dizilimlerindeki yok edilemeyen karmaşıklığın iki temel nedeni bulunmaktadır. Bunlardan birincisi; farklı gerilim kaynaklarından elde edilen değişken gerilimler arasında zaman uyumluluğunun bulunmamasıdır. İkinicisi ise; paralel elektrotlar arasından geçerek toplayıcı plakaya doğru hareket eden polimer moleküllerinin, kaotik hareketlerinin tam olarak bastırılabilmesidir öte yandan daha önceki çalışmalarda yoğun fiberlerin sentezlendiği ortamlarda erişilemeyen düzgün lif yapıları, çalışmanın literatüre en önemli katkılarından biridir.

Gelecek çalışmalarda ikincil elektrik alanları oluşturan kuvvetlendirici katları arasındaki zaman uyumluluğu sağlanarak tam olarak denetlenebilir ve düzgün diziliimli ağ yapılarının sentezi gerçekleştirilecektir.

7. KAYNAKÇA

- [1] ZELENY, J., The Electrical Discharge from Liquid Points and A Hydrostatic Method of Measuring the Electric Intensity at their Surfaces, *Physical Review*, vol. 3, s. 69-9, 1914.
- [2] BAUMGARTEN P. K., Electrostatic spinning of acrylic microfibers, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 36, s. 71–79, 1971.
- [3] LARRONDO, L., ST JOHN MANLEY, R., *J. Polym. Sci.: Polym. Phys*, vol. 19, s. 909-921-933, 1981.
- [4] DOSHI, J, RENEKER, D. H., Electrospinning Process and Applications of Electrospun Fibers, *Journal of Electrostatics*, vol. 35, s.151-160, 1995.
- [5] KHIL, Myung-Seob, BHATTARAI, Shanta Raj, KIM, Hak-Yong, KIM, Sung-Zoo, LEE, Keun-Hyung., Novel Fabricated Matrix Via Electrospinning for Tissue Engineering, *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* vol. 72B, s.117-124 , 2004.
- [6] TEO, W E., RAMAKRISHNA, S. A review on electrospinning design and nanofibre assemblies, *Institute of Physics Publishing, Nanotechnology*, vol 17, No:14, s. R89-R106, 2006.
- [7] BERDY, David, CHONG, Henry, PARUCHURI, Srinivas, YU, Jian, HOLLAR, Kathryn, WEITZ, David, *Bifurcations in Electrospinning: Splitting a Polymer Jet*, Weitz Group, Harvard University, 2005.
- [8] GREGORY, C., RUTLEDGE, Sergey, FRIDRIKH, V., Formation of fibers by electrospinning, *Advance Drug Delivery Reviews*, vol. 59, s.1384-1391, 2007.
- [9] TAYLOR, GI. Disintegration of Water Drops in an Electric Field, *Proceedings of the Royal Society of London Series A Mathematical and Physical Sciences*, vol. 280, s. 383, 1964.
- [10] SHIN, Y.M., HOHMAN, M.M., BRENNER, M.P., RUTLEDGE, G.C. Electrospinning: A whipping fluid jet generates submicron polymer fibers, *Applied Physics Letters*, vol. 78, No. 8, 2001.
- [11] ISHII, Y., SAKAI, H., MURATA H. A new electrospinning method to control the number and a diameter of uniaxially aligned polymer fibers, *Materials Letters*, vol.62, No. 19, s. 3370-3372, 2008.

- [12] ABHAY, M., Formation and Characterization of Electrospun Nonwoven Webs, Thesis of North Carolina State University, 2002.
- [13] KOÇUM, C., AYHAN, H., Design and construction of uniform glow discharge plasma system operating under atmospheric condition, Review of Scientific Instruments vol.78, No.6, 2007.
- [14] BAUMGARTEN, P.K., Electrostatic Spinning of Acrylic Microfibers, Journal of Colloid and Interface Science, vol. 36, s.71-79, 1971.
- [15] MARTIN, G.E., COCKSHOT, I.D., and FILDES, J.T., Fibrillar lining for prosthetic device, US Patent No. 4.044.404, 1977.
- [16] SRINIVASAN, G., Structure and morphology of Electrospun Polymer Fibers, Doctoral Dissertation, The University of Akron. 1994.
- [17] XXI International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, YARIN, A.L., Electrospinning of Nanofibers from polymer solutions, FM4,10932 s., Warsaw, 15 - 21 August 2004.
- [18] BELLANA, Leon, M., and CRAIGHEAD, H.G., Control of an electrospinning jet using electric focusing and jet-steering fields, American Vacuum Society, vol.24, No. 6.,s. 3179-3183, 2006.
- [19] DEITZEL, J.M., KLEINMEYER, J.D., HIRVONEN, J.K., BECK TAN, N.C., Controlled deposition of electrospun poly(ethylene oxide) fibers, Elsevier Polymer vol. 42, s.8163-8170, 2001.
- [20] KIM, Geun Hyung, Electrospinning Process Using Field-Controllable Electrodes, Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, vol. 44, s.1426–1433, 2006.
- [21] Jones, F.B., Dielectrophoretic Force Calculation, J. Electrostat., Vol.6, p.69-82, 1979.
- [22] National Semiconductor, LM2524D/LM3524D datasheet, Mart, 2005.
- [23] ALEXANDER L. E., X-ray diffraction methods in polymer science, Wiley Interscience, New York, s.137-197, 1969.
- [24] RENEKER, D.H., YARIN, A.L., FONG, H., Bending Instability of Electrically Charged Liquid Jets of Polymer Solutions in Electrospinning, Journal of Applied Physics, vol. 87, s. 4531- 4547, 2000.

- [25] RAMAKRISHNA, Seeram, FUJIHARA, Kazutoshi, TEO, Wee-Eong, LIM, Teik-Cheng and MA, Zuwei, An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., s. 155, 2005
- [26] MUNSON Young O., Fundamentals of Fluid Mechanic, John Wiley&Sons, Inc. Third Edition, s.175-177, 1998.
- [27] HOHMAN, M.M., SHIN, M., RUTLEDGE, G., Electrospinning and Electrically Forced Jets. I. Stability Theory, Physics of Fluids, Vol. 13, No.8, s. 2201-2220, 2001.
- [28] YARIN, A. L., Dynamics of bending disturbances of nonlinear viscous liquid jets in air, J. Appl. Mech. Tech. Phys. Vol. 23, s. 39-43 , 1982.
- [29] YARIN, A. L., Flexural perturbations of free jets of maxwell and Doi-Edwards liquids, J. Appl. Mech. Tech. Phys. Vol. 27, s. 828-836, 1986.
- [30] YARIN, A. L., Free Liquid Jets and Films: Hydrodynamics and Rheology Longman, Harlow, and Wiley, New York, 1993.
- [31] SADIKU, Matthew, N. O., Elements of Electromagnetics, Eight Edition, Oxford Univ Press, s.199-215, 2007.
- [32] SCHARSTEIN, Robert W., Capacitance of a tube, Journal of Electrostatics, vol. 65, s. 21–29, 2007.
- [33] COCKBURN, Bernardo, KARNIADAKIS, G., SHU C.W, Discontinuous Galerkin Methods: Theory Computation and Applications, Springer, 2000.
- [34] AMIR, N., MATZNER, H., Distribution of charge on a finite cylindrical shell and a conducting needle, Electromagnetics, vol. 24, 583–596, 2004.
- [35] BUTLER, C.M., Capacitance of a finite-length conducting cylindrical tube, J. Appl. Phys. Vol. 51, s. 5607–5609, 1980.
- [36] FERGUSON, T.R., R.H. Duncan, Charged cylindrical tube, J. Appl. Phys. Vol. 32, s. 1385–1387, 1961.
- [37] JACKSON, J.D., Charge density on a thin straight wire: the first visit, Am. J. Phys. Vol. 70, s. 409–410, 2002.
- [38] SCHARSTEIN, Robert W., Capacitance of a tube, Journal of Electrostatics, vol.65, s. 21–29, 2007.

- [39] VEROLINO, L. Capacitance of a hollow cylinder, *Electrical Engineering* Volume 78, No. 4, 201-207, 1995.
- [40] LEVEGUE, R. Finite difference methods for ordinary and partial differential equations: Steady-state and time dependent problems, SIAM, 2007.
- [41] FREY, P., BUHAN M., The finite difference method, Lecture notes http://www.ann.jussieu.fr/~frey/cours/UdC/ma691/ma691_ch6.pdf, March 2008.
- [42] BANSEVICIUS, R., VIRBALIS., J.A., Distribution of electric field in the round hole of plane capacitor, *J. Electrostat*, vol. 64, s. 226-233, 2006.
- [43] KOÇUM, C. Digitally gain controlled linear high voltage amplifier for laboratory applications, *Review of Scientific Instruments* 82, 084702-084707, 2011
- [44] RAMAKRISHNA S., FUJIHARA K., TEO W.E., LIM T.C., MA Z., *An introduction to electrospinning and nanofibers*, World Scientific, 2005.
- [45] KARATAY, O., DOĞAN M., Modelling of electrospinning process at various electric fields, *IET, Micro & Nano Letters*, Vol. 6, No. 10, 858-862, October 2011.
- [46] ERDELYI, A., MAGNUS, W., OBERHETTINGER, F.G. TRICOMI, F. G., *Tables of Integral Transforms (The Bateman Manuscript Project)*, Vol. I, McGraw-Hill, New York, Chapters 6,7., 1954.
- [47] GRADSHTEYN, I.S. RYZHIK I.M., *Table of Integrals, Series, and Products*, fifth ed., Academic Press, Boston, 1994.

EK AÇIKLAMALAR

Üçüncü bölümde Galerkin yöntemi kullanılarak oluşturulan katsayılar matrisine ait integral ifadelerin çözümlemelerine bu bölümde yer verilmiştir [38].

$\Theta(\alpha)$ integralinin çözümü, Mellin dönüşümleri kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Mellin dönüşümleri aşağıdaki gibi olmak üzere:

$$\begin{aligned} M[f(\alpha)] &= F(s) = \int_0^{\infty} f(\alpha) \alpha^{s-1} d\alpha \\ M^{-1}[F(s)] &= f(\alpha) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \alpha^{-s} F(s) ds \end{aligned} \quad (E.1)$$

Bateman Manuscript Project [46] ve Cauchy integral teorimi kullanılarak Mellin dönüşümleri katsayılar (3.46) nolu denklemin katsayı integrali ifadesi yerine yazılırsa $\Theta(\alpha)$ ifadesi aşağıdaki şekle dönüşür;

$$\Theta(\alpha) = \frac{1}{16\sqrt{\pi i}} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{-s} \frac{\Gamma^2(s/2)\Gamma(1/2-s/2)}{(1+s)\Gamma(1+s/2)\Gamma^2(1-s/2)} ds \quad (0 < c < 1) \quad (E.2)$$

Gama işlevinin özellikleri kullanılarak (E.2) nolu eşitliğin içinde yer alan negatif t değişkenleri $s=2t$ dönüşümü yapılarak yeniden yazılırsa;

$$\frac{\Gamma(1/2-t)\Gamma(1-2t)}{\Gamma^2(1-t)} = \frac{\sqrt{\pi}}{2^{2t}} \frac{\sin \pi t}{\cos^2 \pi t} \frac{\Gamma(t)}{\Gamma^2(1/2+t)} \quad (E.3)$$

olmak üzere (E.2) eşitliği aşağıdaki hali alır;

$$\Theta(\alpha) = \frac{1}{8i} \int_{b-i\infty}^{b+i\infty} \alpha^{-2t} \frac{\sin \pi t}{\cos^2 \pi t} \frac{\Gamma^2(t)}{t(1+2t)\Gamma^2(1/2+t)} dt, \quad (0 < b < 1/2) \quad (E.4)$$

$\alpha > 1$ durumda (E.4) ifadesi kompleks t-düzleminin sağ tarafında kapalı bir çevrim oluşturur. Artık teoremi (Residue Theorem) kullanılarak $\Theta(\alpha)$ hesaplanırsa;

$$\Theta(\alpha) = \frac{2\ln(4\alpha) + 3}{4\alpha} + \frac{1}{4\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \Gamma^2(n+1/2)}{\alpha^{2n+1} \Gamma^2(n+2)} \cdot \left\{ \frac{8n^2 + 9n + 2}{n(2n+1)^2} + \frac{2(n+1)}{2n+1} [\ln \alpha + \psi(n) - \psi(n+1/2)] \right\} \quad (\text{E.5})$$

şeklinde bulunur [38].

$\alpha < 1$ durumda ise (E.4) ifadesi kompleks s-düzleminin sağ tarafında kapalı bir çevrim oluşturur. Bu durumda artık teorimi kullanılarak $\Theta(\alpha)$ yeniden hesaplanırsa;

$$\Theta(\alpha) = \alpha + \frac{\pi}{2} [\ln(4/\alpha) - 1] + \frac{1}{16} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \alpha^{2n} (2n-1) \Gamma^2(n-1/2)}{n \Gamma^2(n+1)}. \quad (\text{E.6})$$

olarak bulunur [38].

$\Omega(\alpha)$ katsayı integralinin çözümü de $\Theta(\alpha)$ 'e benzer bir şekilde gerçekleştirilebilir.

$$\int_0^{\infty} \frac{\sin k}{k} J_0(k) \frac{dk}{k^{s+1}} = \frac{\Gamma(1/2+s) \Gamma(1/2-s/2)}{2\Gamma(1+s) \Gamma(1+s/2)},$$

ve,

$$\frac{\Gamma(1-2t) \Gamma(1/2-t)}{\Gamma^2(1-t)} = \frac{\sin \pi t}{2 \cos^2 \pi t} \frac{\Gamma^2(t)}{\Gamma(2t) \Gamma^2(1/2+t)} \quad (\text{E.7})$$

olmak üzere $s=2t$ dönüşümü yapılarak (3.46) nolu eşitlikte yer alan $\Omega(\alpha)$ integrali aşağıdaki şekle dönüşür [38]:

$$\Omega(\alpha) = \frac{1}{16\pi i} \int_{b-i\infty}^{b+i\infty} \left(\frac{\alpha}{2}\right)^{-2t} \frac{\sin \pi t}{\cos^2 \pi t} \frac{\Gamma^4(t) \Gamma(1/2+2t)}{\Gamma(1+2t) \Gamma(2t) \Gamma(1/2+t)} dt, \quad (0 < b < 1/2) \quad (\text{E.8})$$

$\alpha > 1$ durumda $\Theta(\alpha)$ katsayı integraline benzer bir şekilde (E.8) ifadesi kompleks t-düzleminin sağ tarafında kapalı bir çevrim oluşturur. Bu koşul altında integral ifadesi;

$$\Omega(\alpha) = \frac{\ln(16\alpha)}{2\alpha} + \frac{1}{4\pi\alpha} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n \Gamma(n+1/2) \Gamma(2n+1/2)}{(2\alpha)^{2n} \Gamma^3(n+1)}. \quad (\text{E.9})$$

$$\left\{ \frac{32n^2 + 18n + 3}{n(2n+1)^3} + \frac{4n+1}{(2n+1)^2} \cdot \left[2 \ln(\alpha/2) + 4\psi(2n) + \psi(n) - 2\psi(2n+1/2) - 3\psi(n+1/2) \right] \right\}$$

olarak hesaplanır [38].

$\alpha < 1$ koşulunda ise integral eşitliği,

$$\Omega(\alpha) = -\frac{\pi}{2} \ln \alpha + \frac{2}{\pi} \sqrt{2\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{[n/2]} (2\alpha)^n \Gamma^3(3/4 + n/2)}{(2n+1)^2 \Gamma(1+n) \Gamma(5/4 + n/2)}, \quad (\text{E.10})$$

halini alır [38].

$\Lambda(\alpha)$ katsayı integralinin çözümlemesi ise Gradshteyn and Ryzhik [47] tarafından gerçekleştirilen çıkarımlar;

$$\int_0^{\infty} \frac{J_0^2(k)}{k^s} dk = \frac{\Gamma(s) \Gamma(1/2 - s/2)}{2^s \Gamma^3(1/2 + s/2)}, \quad (\text{E.11})$$

olmak üzere, yardımıyla gerçekleştirilir.

$\alpha > 1$ koşulunda Gama işlevleri $+t$ bölgesinde tanımlanabilir. Bu durumda $\Lambda(\alpha)$ çözümlenirse;

$$\Lambda(\alpha) = -\frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{\Gamma^4(n+1/2)}{\Gamma^4(n) \alpha^{2n+1} n^4} [\psi(n+1/2) - \psi(n) - 1/n - \frac{1}{2} \ln \alpha] + \frac{\ln 16\alpha}{2\alpha} \quad (\text{E.12})$$

şeklinde hesaplanır [38].

$\alpha < 1$ durumunda ise $\Lambda(\alpha)$ katsayısı aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\Lambda(\alpha) = \frac{1}{2\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \alpha^{2n} \frac{\Gamma^4(n+1/2)}{\Gamma^4(n+1)}.$$

$$[\psi^{(1)}(n+1/2) - \psi^{(1)}(n) + 4[\psi(n+1/2) - \psi(n)]^2 + \quad (E.13)$$

$$\left(4 \ln \alpha - \frac{8}{n}\right) [\psi(n+1/2) - \psi(n)] +$$

$$\ln^2 \alpha - \frac{4}{n} \ln \alpha + \frac{5}{n^2} - \frac{\pi^2}{4} \Big] + \frac{1}{2\pi} \ln^2(16/\alpha) + \frac{\pi}{24},$$

LM2524D/LM3524D

Regulating Pulse Width Modulator

General Description

The LM3524D family is an improved version of the industry standard LM3524. It has improved specifications and additional features yet is pin for pin compatible with existing 3524 families. New features reduce the need for additional external circuitry often required in the original version.

The LM3524D has a $\pm 1\%$ precision 5V reference. The current carrying capability of the output drive transistors has been raised to 200 mA while reducing V_{CEsat} and increasing V_{CE} breakdown to 60V. The common mode voltage range of the error-amp has been raised to 5.5V to eliminate the need for a resistive divider from the 5V reference.

In the LM3524D the circuit bias line has been isolated from the shut-down pin. This prevents the oscillator pulse amplitude and frequency from being disturbed by shut-down. Also at high frequencies (≈ 300 kHz) the max. duty cycle per output has been improved to 44% compared to 35% max. duty cycle in other 3524s.

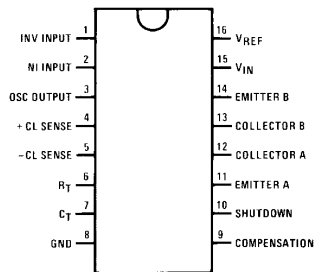
In addition, the LM3524D can now be synchronized externally, through pin 3. Also a latch has been added to insure

one pulse per period even in noisy environments. The LM3524D includes double pulse suppression logic that insures when a shut-down condition is removed the state of the T-flip-flop will change only after the first clock pulse has arrived. This feature prevents the same output from being pulsed twice in a row, thus reducing the possibility of core saturation in push-pull designs.

Features

- Fully interchangeable with standard LM3524 family
- $\pm 1\%$ precision 5V reference with thermal shut-down
- Output current to 200 mA DC
- 60V output capability
- Wide common mode input range for error-amp
- One pulse per period (noise suppression)
- Improved max. duty cycle at high frequencies
- Double pulse suppression
- Synchronize through pin 3

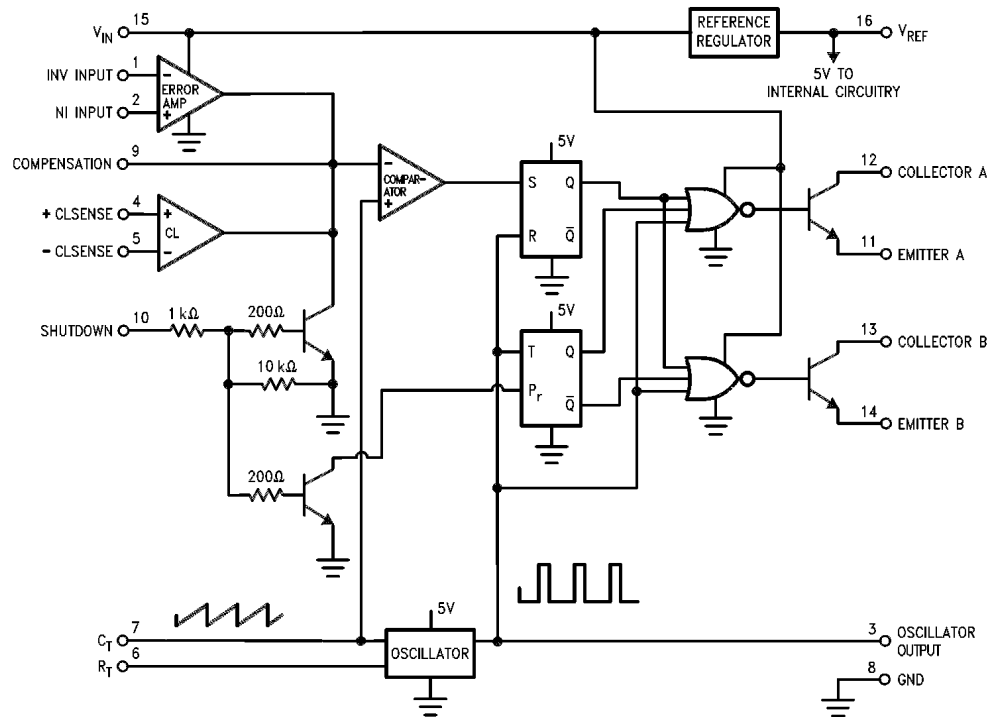
Connection Diagram



00865002

Top View
 Order Number LM2524DN or LM3524DN
 See NS Package Number N16E
 Order Number LM3524DM
 See NS Package Number M16A

Block Diagram



00865001

Absolute Maximum Ratings (Note 5)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

Supply Voltage	40V
Collector Supply Voltage (LM2524D)	55V
(LM3524D)	40V
Output Current DC (each)	200 mA
Oscillator Charging Current (Pin 7)	5 mA

Internal Power Dissipation	1W
Operating Junction Temperature Range (Note 2)	
LM2524D	–40°C to +125°C
LM3524D	0°C to +125°C
Maximum Junction Temperature	150°
Storage Temperature Range	–65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering 4 sec.)	
M, N Pkg.	260°C

Electrical Characteristics

(Note 1)

Symbol	Parameter	Conditions	LM2524D			LM3524D			Units
			Typ	Tested Limit (Note 3)	Design Limit (Note 4)	Typ	Tested Limit (Note 3)	Design Limit (Note 4)	
REFERENCE SECTION									
V _{REF}	Output Voltage		5	4.85	4.80	5	4.75		V _{Min}
				5.15	5.20		5.25		V _{Max}
V _{RLine}	Line Regulation	V _{IN} = 8V to 40V	10	15	30	10	25	50	mV _{Max}
V _{RLoad}	Load Regulation	I _L = 0 mA to 20 mA	10	15	25	10	25	50	mV _{Max}
$\frac{\Delta V_{IN}}{\Delta V_{REF}}$	Ripple Rejection	f = 120 Hz	66			66			dB
I _{OS}	Short Circuit Current	V _{REF} = 0	50	25		50	25		mA Min
				180			200		mA Max
N _O	Output Noise	10 Hz ≤ f ≤ 10 kHz	40		100	40		100	μV _{rms Max}
	Long Term Stability	T _A = 125°C	20			20			mV/kHr
OSCILLATOR SECTION									
f _{OSC}	Max. Freq.	R _T = 1k, C _T = 0.001 μF (Note 7)	550		500	350			kHz _{Min}
f _{OSC}	Initial Accuracy	R _T = 5.6k, C _T = 0.01 μF (Note 7)	20	17.5		20	17.5		kHz _{Min}
				22.5			22.5		kHz _{Max}
		R _T = 2.7k, C _T = 0.01 μF (Note 7)	38	34		38	30		kHz _{Min}
				42			46		kHz _{Max}
Δf _{OSC}	Freq. Change with V _{IN}	V _{IN} = 8 to 40V	0.5	1		0.5	1.0		% _{Max}
Δf _{OSC}	Freq. Change with Temp.	T _A = −55°C to +125°C at 20 kHz R _T = 5.6k, C _T = 0.01 μF	5			5			%
V _{OSC}	Output Amplitude (Pin 3) (Note 8)	R _T = 5.6k, C _T = 0.01 μF	3	2.4		3	2.4		V _{Min}
t _{PW}	Output Pulse Width (Pin 3)	R _T = 5.6k, C _T = 0.01 μF	0.5	1.5		0.5	1.5		μs _{Max}
	Sawtooth Peak Voltage	R _T = 5.6k, C _T = 0.01 μF	3.4	3.6	3.8		3.8		V _{Max}

Electrical Characteristics (Continued)

(Note 1)

Symbol	Parameter	Conditions	LM2524D			LM3524D			Units
			Typ	Tested Limit (Note 3)	Design Limit (Note 4)	Typ	Tested Limit (Note 3)	Design Limit (Note 4)	
	Sawtooth Valley Voltage	$R_T = 5.6k$, $C_T = 0.01 \mu F$	1.1	0.8	0.6		0.6		V_{Min}
ERROR-AMP SECTION									
V_{IO}	Input Offset Voltage	$V_{CM} = 2.5V$	2	8	10	2	10		mV_{Max}
I_{IB}	Input Bias Current	$V_{CM} = 2.5V$	1	8	10	1	10		μA_{Max}
I_{IO}	Input Offset Current	$V_{CM} = 2.5V$	0.5	1.0	1	0.5	1		μA_{Max}
I_{COSI}	Compensation Current (Sink)	$V_{IN(I)} - V_{IN(NI)} = 150 mV$	95	65		95	65		μA_{Min}
				125			125		μA_{Max}
I_{COSO}	Compensation Current (Source)	$V_{IN(NI)} - V_{IN(I)} = 150 mV$	-95	-125		-95	-125		μA_{Min}
				-65			-65		μA_{Max}
A_{VOL}	Open Loop Gain	$R_L = \infty$, $V_{CM} = 2.5 V$	80	74	60	80	70	60	dB_{Min}
$VCMR$	Common Mode Input Voltage Range			1.5	1.4		1.5		V_{Min}
				5.5	5.4		5.5		V_{Max}
$CMRR$	Common Mode Rejection Ratio		90	80		90	80		dB_{Min}
G_{BW}	Unity Gain Bandwidth	$A_{VOL} = 0 dB$, $V_{CM} = 2.5V$	3			2			MHz
V_O	Output Voltage Swing	$R_L = \infty$		0.5			0.5		V_{Min}
				5.5			5.5		V_{Max}
$PSRR$	Power Supply Rejection Ratio	$V_{IN} = 8$ to $40V$	80		70	80	65		db_{Min}
COMPARATOR SECTION									
$\frac{t_{ON}}{t_{OSC}}$	Minimum Duty Cycle	Pin 9 = 0.8V, $[R_T = 5.6k, C_T = 0.01 \mu F]$	0	0		0	0		$\%_{Max}$
$\frac{t_{ON}}{t_{OSC}}$	Maximum Duty Cycle	Pin 9 = 3.9V, $[R_T = 5.6k, C_T = 0.01 \mu F]$	49	45		49	45		$\%_{Min}$
$\frac{t_{ON}}{t_{OSC}}$	Maximum Duty Cycle	Pin 9 = 3.9V, $[R_T = 1k, C_T = 0.001 \mu F]$	44	35		44	35		$\%_{Min}$
V_{COMPZ}	Input Threshold (Pin 9)	Zero Duty Cycle	1			1			V
V_{COMPM}	Input Threshold (Pin 9)	Maximum Duty Cycle	3.5			3.5			V
I_{IB}	Input Bias Current		-1			-1			μA
CURRENT LIMIT SECTION									
V_{SEN}	Sense Voltage	$V_{(Pin\ 2)} - V_{(Pin\ 1)} \geq 150 mV$	200	180		200	180		mV_{Min}
				220			220		mV_{Max}

Electrical Characteristics (Continued)

(Note 1)

Symbol	Parameter	Conditions	LM2524D			LM3524D			Units
			Typ	Tested Limit (Note 3)	Design Limit (Note 4)	Typ	Tested Limit (Note 3)	Design Limit (Note 4)	
TC- V_{sense}	Sense Voltage T.C.		0.2			0.2			mV/°C
	Common Mode Voltage Range	$V_5 - V_4 = 300 \text{ mV}$	-0.7			-0.7			V_{Min} V_{Max}
SHUT DOWN SECTION									
V_{SD}	High Input Voltage	$V_{(\text{Pin } 2)} - V_{(\text{Pin } 1)} \geq 150 \text{ mV}$	1	0.5 1.5		1	0.5 1.5		V_{Min} V_{Max}
I_{SD}	High Input Current	$I_{(\text{pin } 10)}$	1			1			mA
OUTPUT SECTION (EACH OUTPUT)									
V_{CES}	Collector Emitter Voltage Breakdown	$I_C \leq 100 \mu\text{A}$		55			40		V_{Min}
I_{CES}	Collector Leakage Current	$V_{\text{CE}} = 60\text{V}$							
		$V_{\text{CE}} = 55\text{V}$	0.1	50					μA_{Max}
		$V_{\text{CE}} = 40\text{V}$				0.1	50		
V_{CESAT}	Saturation Voltage	$I_E = 20 \text{ mA}$	0.2	0.5		0.2	0.7		V_{Max}
		$I_E = 200 \text{ mA}$	1.5	2.2		1.5	2.5		
V_{EO}	Emitter Output Voltage	$I_E = 50 \text{ mA}$	18	17		18	17		V_{Min}
t_R	Rise Time	$V_{\text{IN}} = 20\text{V}$, $I_E = -250 \mu\text{A}$ $R_C = 2\text{k}$	200			200			ns
t_F	Fall Time	$R_C = 2\text{k}$	100			100			ns
SUPPLY CHARACTERISTICS SECTION									
V_{IN}	Input Voltage Range	After Turn-on		8 40			8 40		V_{Min} V_{Max}
T	Thermal Shutdown Temp.	(Note 2)	160			160			°C
I_{IN}	Stand By Current	$V_{\text{IN}} = 40\text{V}$ (Note 6)	5	10		5	10		mA

Note 1: Unless otherwise stated, these specifications apply for $T_A = T_J = 25^\circ\text{C}$. Boldface numbers apply over the rated temperature range: LM2524D is -40° to 85°C and LM3524D is 0°C to 70°C . $V_{\text{IN}} = 20\text{V}$ and $f_{\text{OSC}} = 20 \text{ kHz}$.

Note 2: For operation at elevated temperatures, devices in the N package must be derated based on a thermal resistance of 86°C/W , junction to ambient. Devices in the M package must be derated at 125°C/W , junction to ambient.

Note 3: Tested limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 4: Design limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage range. These limits are not used to calculate outgoing quality level.

Note 5: Absolute maximum ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions.

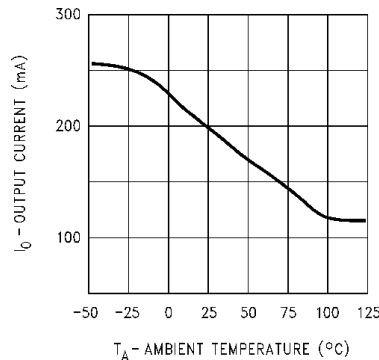
Note 6: Pins 1, 4, 7, 8, 11, and 14 are grounded; Pin 2 = 2V. All other inputs and outputs open.

Note 7: The value of a C_t capacitor can vary with frequency. Careful selection of this capacitor must be made for high frequency operation. Polystyrene was used in this test. NPO ceramic or polypropylene can also be used.

Note 8: OSC amplitude is measured open circuit. Available current is limited to 1 mA so care must be exercised to limit capacitive loading of fast pulses.

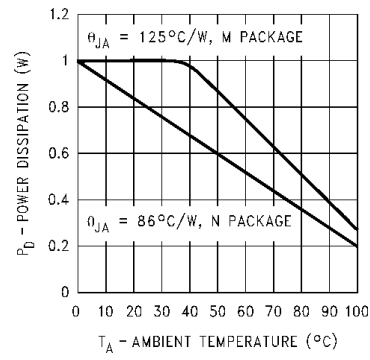
Typical Performance Characteristics

**Switching Transistor
Peak Output Current
vs Temperature**



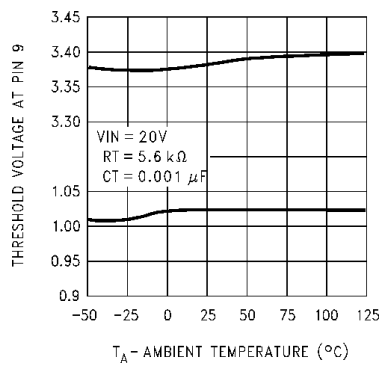
00865028

**Maximum Average Power
Dissipation (N, M Packages)**



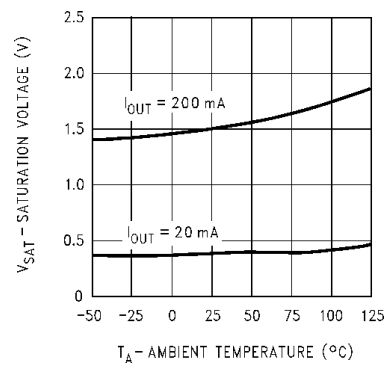
00865029

**Maximum & Minimum
Duty Cycle Threshold
Voltage**



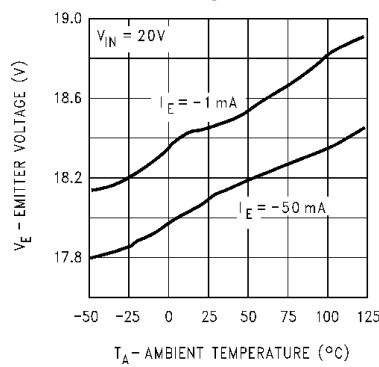
00865030

**Output Transistor
Saturation Voltage**



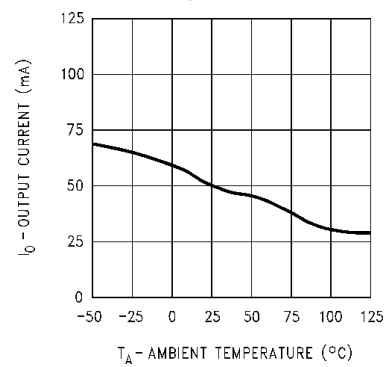
00865031

**Output Transistor Emitter
Voltage**



00865032

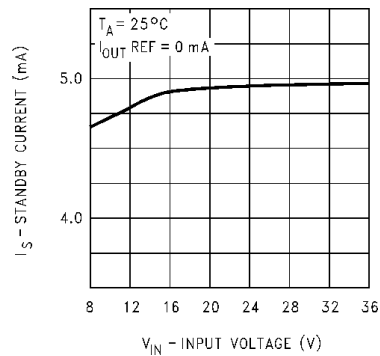
**Reference Transistor
Peak Output Current**



00865033

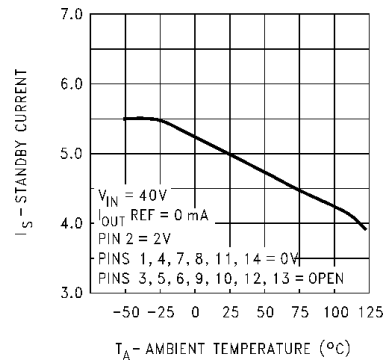
Typical Performance Characteristics (Continued)

Standby Current vs Voltage



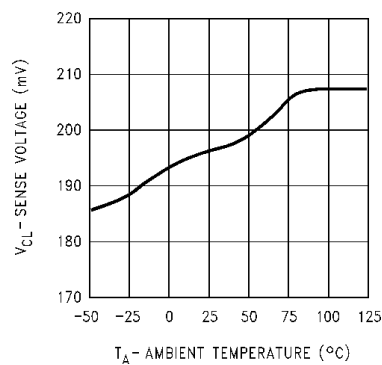
00865034

Standby Current vs Temperature



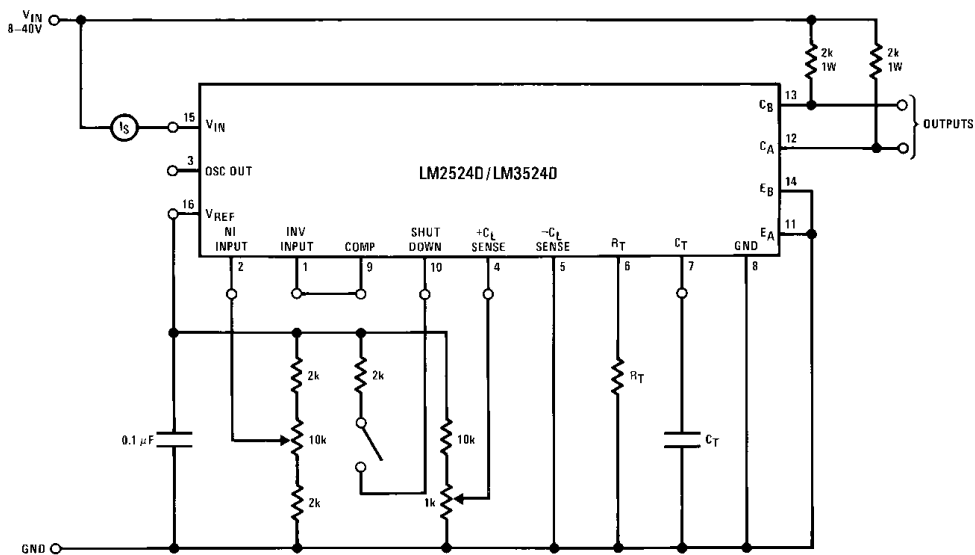
00865035

Current Limit Sense Voltage



00865036

Test Circuit



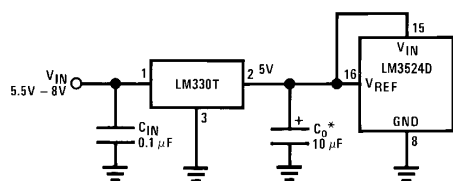
00865004

Functional Description

INTERNAL VOLTAGE REGULATOR

The LM3524D has an on-chip 5V, 50 mA, short circuit protected voltage regulator. This voltage regulator provides a supply for all internal circuitry of the device and can be used as an external reference.

For input voltages of less than 8V the 5V output should be shorted to pin 15, V_{IN} , which disables the 5V regulator. With these pins shorted the input voltage must be limited to a maximum of 6V. If input voltages of 6V–8V are to be used, a pre-regulator, as shown in *Figure 1*, must be added.



*Minimum C_O of 10 μF required for stability.

FIGURE 1.

OSCILLATOR

The LM3524D provides a stable on-board oscillator. Its frequency is set by an external resistor, R_T and capacitor, C_T . A graph of R_T , C_T vs oscillator frequency is shown in *Figure 2*. The oscillator's output provides the signals for triggering an internal flip-flop, which directs the PWM information to the outputs, and a blanking pulse to turn off both outputs during transitions to ensure that cross conduction does not occur. The width of the blanking pulse, or dead time, is controlled by the value of C_T , as shown in *Figure 3*. The recommended values of R_T are 1.8 k Ω to 100 k Ω , and for C_T , 0.001 μF to 0.1 μF .

If two or more LM3524D's must be synchronized together, the easiest method is to interconnect all pin 3 terminals, tie all pin 7's (together) to a single C_T , and leave all pin 6's open except one which is connected to a single R_T . This method works well unless the LM3524D's are more than 6" apart.

A second synchronization method is appropriate for any circuit layout. One LM3524D, designated as master, must have its $R_T C_T$ set for the correct period. The other slave LM3524D(s) should each have an $R_T C_T$ set for a 10% longer period. All pin 3's must then be interconnected to allow the master to properly reset the slave units.

The oscillator may be synchronized to an external clock source by setting the internal free-running oscillator frequency 10% slower than the external clock and driving pin 3 with a pulse train (approx. 3V) from the clock. Pulse width should be greater than 50 ns to insure full synchronization.

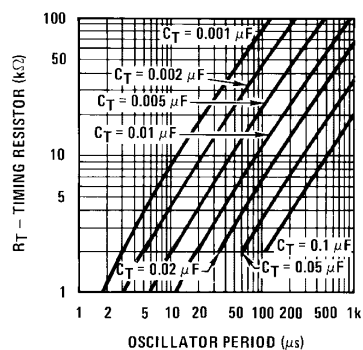


FIGURE 2.

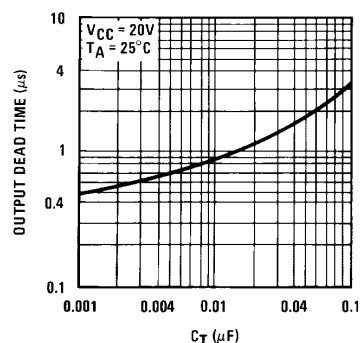


FIGURE 3.

ERROR AMPLIFIER

The error amplifier is a differential input, transconductance amplifier. Its gain, nominally 86 dB, is set by either feedback or output loading. This output loading can be done with either purely resistive or a combination of resistive and reactive components. A graph of the amplifier's gain vs output load resistance is shown in *Figure 4*.

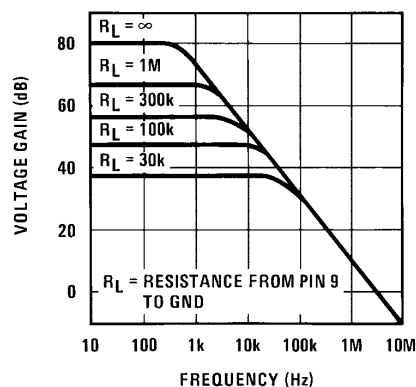
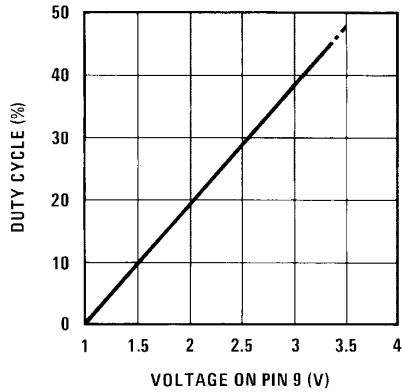


FIGURE 4.

Functional Description (Continued)

The output of the amplifier, or input to the pulse width modulator, can be overridden easily as its output impedance is very high ($Z_O \approx 5\text{ M}\Omega$). For this reason a DC voltage can be applied to pin 9 which will override the error amplifier and force a particular duty cycle to the outputs. An example of this could be a non-regulating motor speed control where a variable voltage was applied to pin 9 to control motor speed. A graph of the output duty cycle vs the voltage on pin 9 is shown in Figure 5.

The duty cycle is calculated as the percentage ratio of each output's ON-time to the oscillator period. Paralleling the outputs doubles the observed duty cycle.



00865008

FIGURE 5.

The amplifier's inputs have a common-mode input range of 1.5V–5.5V. The on board regulator is useful for biasing the inputs to within this range.

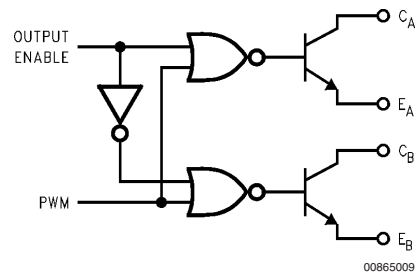
CURRENT LIMITING

The function of the current limit amplifier is to override the error amplifier's output and take control of the pulse width. The output duty cycle drops to about 25% when a current limit sense voltage of 200 mV is applied between the $+C_L$ and $-C_L$ sense terminals. Increasing the sense voltage approximately 5% results in a 0% output duty cycle. Care should be taken to ensure the -0.7V to $+1.0\text{V}$ input common-mode range is not exceeded.

In most applications, the current limit sense voltage is produced by a current through a sense resistor. The accuracy of this measurement is limited by the accuracy of the sense resistor, and by a small offset current, typically $100\text{ }\mu\text{A}$, flowing from $+CL$ to $-CL$.

OUTPUT STAGES

The outputs of the LM3524D are NPN transistors, capable of a maximum current of 200 mA. These transistors are driven 180° out of phase and have non-committed open collectors and emitters as shown in Figure 6.

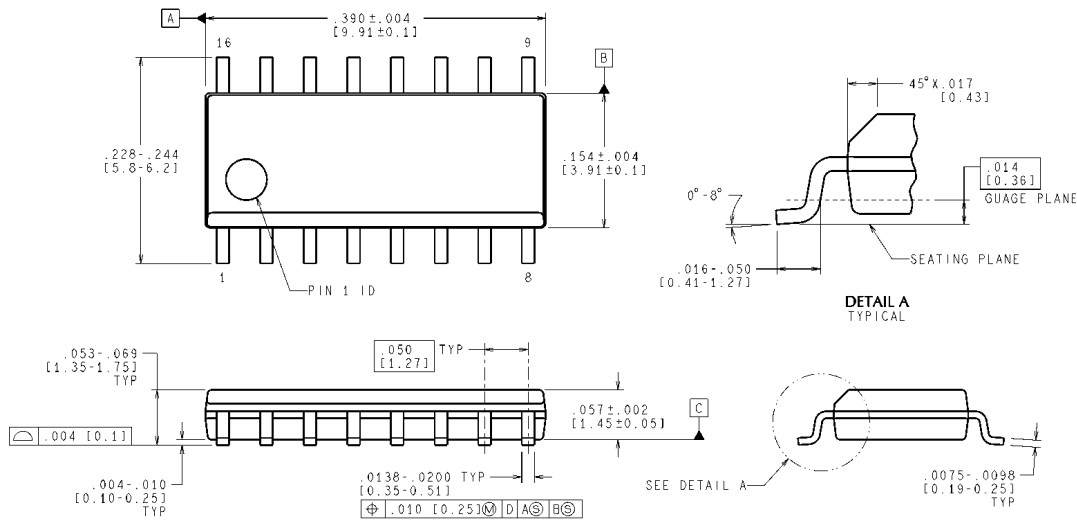


00865009

FIGURE 6.

Physical Dimensions

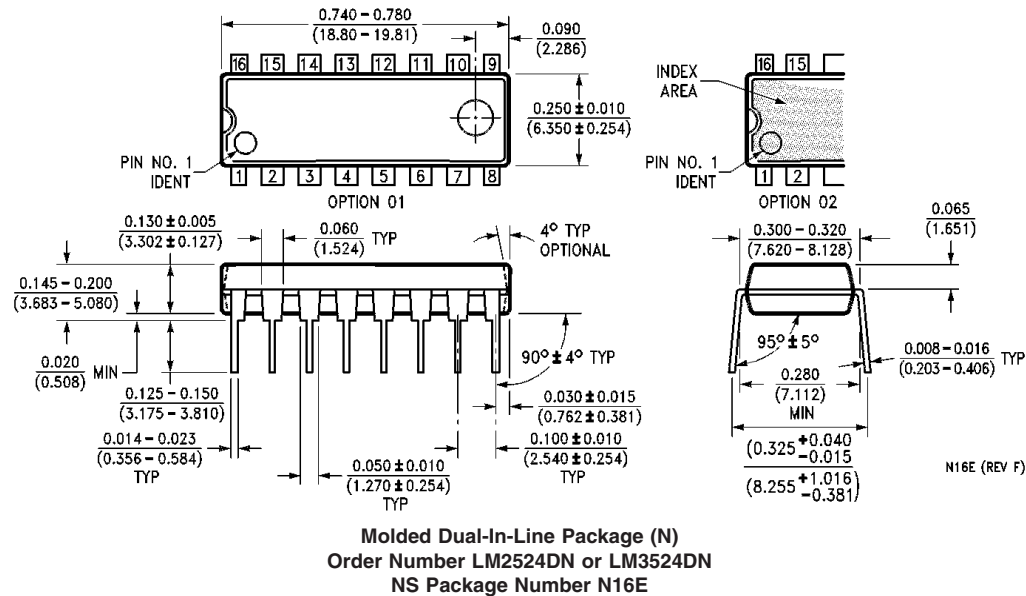
inches (millimeters)
unless otherwise noted



M16A (Rev J)

Molded Surface-Mount Package (M)
Order Number LM3524DM
NS Package Number M16A

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



National does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

For the most current product information visit us at www.national.com.

LIFE SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

1. Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.
2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

BANNED SUBSTANCE COMPLIANCE

National Semiconductor manufactures products and uses packing materials that meet the provisions of the Customer Products Stewardship Specification (CSP-9-111C2) and the Banned Substances and Materials of Interest Specification (CSP-9-111S2) and contain no "Banned Substances" as defined in CSP-9-111S2.



National Semiconductor
Americas Customer
Support Center
 Email: new.feedback@nsc.com
 Tel: 1-800-272-9959

www.national.com

National Semiconductor
Europe Customer Support Center
 Fax: +49 (0) 180-530 85 86
 Email: europe.support@nsc.com
 Deutsch Tel: +49 (0) 69 9508 6208
 English Tel: +44 (0) 870 24 0 2171
 Français Tel: +33 (0) 1 41 91 8790

National Semiconductor
Asia Pacific Customer
Support Center
 Email: ap.support@nsc.com

National Semiconductor
Japan Customer Support Center
 Fax: 81-3-5639-7507
 Email: jpn.feedback@nsc.com
 Tel: 81-3-5639-7560