



**NANOLİFLERDEN EĞRİLMİŞ İPLİKLERİN
ÖRME PERFORMANSI VE KUMAŞ
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Semat ŞENOCAK

Yüksek Lisans Tezi

**Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof.Dr. Özer GÖKTEPE
2021**

T.C.

TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NANOLİFLERDEN EĞRİLMİŞ İPLİKLERİN ÖRME PERFORMANSI
VE KUMAŞ ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Semat ŞENOCAK

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: Prof.Dr. Özer GÖKTEPE

TEKİRDAĞ-2021

Her hakkı saklıdır.



Bu tez (TÜBİTAK / SANTEZ / NKÜBAP vb.) tarafından
.....numaralı proje ile desteklenmiştir.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

NANOLİFLERDEN EĞRİLMİŞ İPLİKLERİN ÖRME PERFORMANSI VE KUMAŞ ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

SEMAT ŞENOCAK

TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEKSTİL MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN: PROF.DR.ÖZER GÖKTEPE

Nanolifler son yıllarda dokuma olmayan formda (nanoweb) üretilmiş ve kullanılmıştır. Bu yüzeyler genellikle basitliği ve esnekliği sayesinde elektrolif çekimi yöntemi kullanılarak üretilir. Nanolifler, spesifik yüzey alanı ve küçük gözenek boyutları sağlarken, düşük mukavemetleri uygulama alanlarını ve kullanım ömrünü sınırlandırır. Nanolifler günümüzde ağırlıklı olarak filtrasyon, pil ayırıcı, ilaç dağıtımı, yara pansumanı, doku mühendisliği için dokusuz yüzey formunda kullanılmaktadır. Bununla birlikte, endüstriyel nanolif iplik eğirme sistemleri henüz mevcut olmadığından dokuma veya örme kumaş şeklinde kullanılamazlar. Bu çalışmada, PAN nanoliflerden eğrilmiş ipliklerin (nanolif iplik) örgüde kullanım olasılığının araştırılması amaçlanmıştır. Nanolif iplik, bu amaç için tasarlanan ve geliştirilen PLC kontrollü bir iplik makinası kullanılarak elektrospinning yöntemi ile eğirilmiştir. Bu nanolif iplik, kopma mukavemeti ve uzaması, kapilarite ve boyama performansı bakımından geleneksel akrilik ipliği ile karşılaştırılmıştır. Ardından laboratuvar tipi yuvarlak örgü makinesinde kumaş örnekleri örülmüştür. Nanolif ipliğinin örme performansı, örme sırasındaki verimlilik ve ipliğinin kopması açısından beklendiği gibi geleneksel ipliğinin performansından daha düşüktür. Bu çalışma ile literatürde ilk kez, nanolif PAN ipliğinden makinede örülmüş kumaş örneği sunulmuştur. Nanolif ipliğinin düşük mukavemetinden dolayı, örme makinesinde minimum hızda ve minimum gerginlikte örülebilmektedir. Ardından, kumaş numuneleri (geleneksel ve nanolif ipliklerden örülmüş kumaşları), bir nanoweb ile birleştirilerek hava geçirgenliği ve aerosolfiltrasyon performansları açısından test edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Nanolif iplik, Akrilik iplik, Örme, Nanolif kumaş

2021, 85 sayfa

ABSTRACT

MSC. THESIS

A STUDY ON KNITTING PERFORMANCE AND FABRIC PROPERTIES OF THE YARNS SPUN FROM NANO-FIBERS

SEMAT ŞENOCAK

TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEPARTMENT OF TEXTILE ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. DR. ÖZER GÖKTEPE

Nanofibers have been produced and used in non-woven form (nano-web) for last two decades. These surfaces are generally produced by using electrospinning system. Nano-webs provide high specific surface area, interconnected pore structure and small pore sizes while their low strength limits their application fields and product life. Nano-fibres are currently being used for mainly filtration, battery separator, drug delivery, wound dressing, tissue engineering in the form of non-woven fabric. However they cannot be used in form of woven or knitted fabric as commercial nanofiber yarn spinning systems are not available yet. This study aims to investigate the possibility of use of the yarns spun from PAN nanofibers in knitting. The nanofiber yarn was spun by using a PLC controlled spinning machine. This nanofiber yarn was compared with ring spun yarn produced by using conventional acrylic staple fibres in terms of their breaking strength, elongation, water absorbency properties and dyeing performance of both type of the yarns were studied. Then fabric samples were knitted by using both of yarns on a laboratory type of circular knitting machine. Knitting performance of the nanofiber yarn were lower than that of the conventional yarn as expected in terms of efficiency and number of yarn breakage during knitting. However, the first example of machine knitted fabric from nanofiber yarn was successfully obtained by optimizing yarn and fabric tension. Then, fabric samples were tested for their air permeability and aerosol filtration performance by combining knitted conventional and nanofiber fabrics with a nano-web. The results show that fabrics knitted from nanofiber yarn has higher air permeability and better filtration performance than fabrics knitted from conventional yarn.

Key words: Nanofiber yarn, Acrylic yarn, Knitting, Nanofiber fabric

2021, 85 pages

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	iii
TABLO DİZİNİ	iv
ŞEKİL DİZİNİ	v
SİMGELER ve KISALTMALAR	viii
TEŞEKKÜR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Nanolif Üretme Yöntemleri	4
1.2. Elektro Lif Çekimi.....	6
1.3. Elektro Lif Çekimi'ne Etki Eden Parametreler	13
1.1. Elektro Lif Çekim Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları	21
1.4. Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları.....	26
1.5. Nanolif İplik Elde Etmeye Yönelik Çalışmalar	35
1.6. Nanolif İpliklerden Kumaş Üretmeye Yönelik Çalışmalar	40
2. MATERYAL METOT	48
2.1. Nanolif İplik Üretiminde Kullanılan Polimer Çözeltisinin Hazırlanması	48
2.2. Elektro Lif Çekimi Makinesi Çalışma Parametreleri	51
2.3. Nanowen Yüzey Üzerine Nanolif Yüzey ve Nanolif İplik Üretimi.....	53
2.4. Yapılan Testler	55
2.5. Örme	59
2.6. İpliklerin Boyanması	63
2.7. Kumaş Testleri	64
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	68
3.1. İplik Test Sonuçları	68
3.2. Kumaş Test Sonuçları.....	71
4. SONUÇ	75
KAYNAKLAR	76
EKLER	85
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 1.1. Elektrospinning’te kullanılan bazı polimerler.....	12
Çizelge 1.2. Elektro lif çekimi işleminde kullanılan tipik çözücülerin listesi.....	13
Çizelge 2.1. Poliakrilonitril kopma dayanımları	49
Çizelge 2.2. Elektro lif çekimi makinesi çalışma parametreleri.....	53
Çizelge 2.3. Örme makinası özelliklerine ait teknik veriler.....	61
Çizelge 2.4. Yüzeylerin sembolik gösterimi	65
Çizelge 3.1. SEM Görüntüleri	68
Çizelge 3.2. Örme kumaş sıklıkları	72
Çizelge 3.3. Örme kumaşların ham çekme oranları.....	72



ŞEKİL DİZİNİ

Şekil 1.1. Lif çapının yüzey alanına etkisi (Kozanoğlu, 2006).....	2
Şekil 1.2. Nanolif üretim yöntemleri.....	4
Şekil 1.3 Farklı varyasyonlara sahip Elektro lif çekimi düzeneği (Merritt, Sonia, Agata, Zhenghong ve Horst, 2012)	7
Şekil 1.4. Taylor konisinde oluşan yarı konik açısı (Taylor,1964).....	9
Şekil1.5. Kılcal boru ucundaki damlanın artan voltaj etkisiyle koni şeklini alması(a,b,c,d) ve jetin fişkırması (e,f) (Andray, 2008).....	9
Şekil 1.6. Taylor konisinin optik görüntüsü ve mikrofabrik silikon uçtan çıkan bir jetin konik doğrusal kısmı(a) (Kameoka vd.,2003).Diyagramuygulamada elde edilen Taylor'ın konisinin farklı geometrileri(b) (Andray, 2008).	10
Şekil 1.7. Elektro lif çekiminde Whipping Kararsızlığı (Güçlü, 2012)	10
Şekil 1.8. Elektrostatik lif çekim prosesinin anatomik şeması (Subbiah, 2005).....	11
Şekil 1.9. Elektrolif çekim prosesine etki eden parametrelerin sınıflandırılması	14
Şekil 1.10. A Yüksek viskozitede çözücü molekülleri, karışık polimer molekülleri üzerine dağılmıştır B Düşük viskozitede çözücü moleküller, yüzey geriliminin etkisiyle bir araya toplanma eğilimi göstermiştir (Ramakrishna, 2005).....	16
Şekil 1.11. Eş eksenli düze kullanarak Elektro lif çekimi ve Elektro lif çekimi işleminde koaksiyel jetler (Jiang ve Qin, 2014).....	24
Şekil 1.12. Nanolif üretim yöntemleri ve uygulama alanları (Kenry, 2017).....	28
Şekil 1.13. Elektro lif çekimi yoluyla üretilen PAN üç boyutlu kompozitmembran üretimini gösteren şematik.....	29
Şekil 1.14. Lif çapının filtre verimliliği ile ilişkisi.....	31
Şekil 1.15. Hepa filtre şematik.....	31
Şekil 1.16. Elektro lif çekimi kurulumunun şematik diyagramı ve nanolif iplik olumu ve görüntüleri (Dabirianve Ravandi, 2009).....	36
Şekil 1.17. Elektro lif çekimi sistemi ve elde edilen nanolifler	37
Şekil 1.18. (A) Modifiye edilmiş Elektro lif çekimi kurulumunun şematik diyagramı ve nanolif üretimi.....	38
Şekil 1.19. TiO ₂ toplanması için ayarlanmış Elektro lif çekimi düzeneği (Memarian vd., 2013)	38
Şekil 1.20. Elektro lif çekimi düzeneği ve SEM görüntüleri Chawla vd. (2013).....	39
Şekil 1.21. Elektro lif çekimi düzeneği Wu vd. (2013).....	41
Şekil 1.22. Elektro lif çekimi düzeneği (Wu v.d., 2016).....	41
Şekil 1.23. Farklı voltajlarda ve farklı besleme oranında üretilen PAN nanolif iplikler.....	42

Şekil 1.24 PCL nanofiberin fotoğrafı (B) SEM görüntüsü iplik (C) Tekstil dokuma işleminin şeması (D) Kumaş fotoğrafı ve (E) PCL'den yapılmış düz dokuma kumaşın SEM görüntüsü nanolif iplikler (atkı olarak yüksek dokuma yoğunluğuna sahip) ve çoklu PLA filamentleri (çözgü olarak düşük dokuma yoğunluğuna sahip) (Xue ,Wu, Dai, ve Xia, 2019).	43
Şekil 1.25. Çalışmalarında kullanılan nanolif üretimi şematığı ve düzeneği (Levitt vd., 2017)	45
Şekil 1.26. Çalışmada kullanılan elektro lif çekimi düzeneği şematik görünümü ve nanolif iplik (Levitt vd., 2018).....	46
Şekil 1.27. Yeşil iplik: ipek, beyaz iplik: PAN nanolif iplik E Örme kumaşın SEM görüntüsü(Levitt vd., 2018)	47
Şekil 2.1. PAN`nın kimyasal formülü	48
Şekil 2.2. N,N-dimetilformamid`in kimyasal formülü.....	49
Şekil 2.3. Çalışmada kullanılan polimer ve çözücü	50
Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan hassas terazi	50
Şekil 2.5. Solüsyon hazırlama.....	51
Şekil 2.6. Çalışmada kullanılan iletkenlikve viskozite ölçüm cihazları.....	51
Şekil 2.7. Elektro lif çekimi makinesi	52
Şekil 2.8. Nanoweb yüzey üretiminde kullanılan kollektör ve nanoweb	54
Şekil 2.9. Çalışmada kullanılan nanolif iplik üretim düzeneği.....	55
Şekil 2.10. Çalışma esnasında elektro lif çekim jetleri	55
Şekil 2.11. Çalışmada kullanılan nanolif iplik.....	56
Şekil 2.12. Çalışmada kullanılan iplik büküm ölçer	56
Şekil 2.13. Çalışmada kullanılan SEM cihazı.....	57
Şekil 2.14. Çalışmada kullanılan mukavemet ölçüm cihazı	58
Şekil 2.15. Çalışmada kullanılan Wicking düzeneği.....	58
Şekil 2.16. Nanolif iplikte canlı büküm.....	59
Şekil 2.17. Çalışmada nanolif ipliklere uygulanan parafinleme ve ısıl işlem.....	60
Şekil 2.18. Çalışmada kullanılan örme makinesi	61
Şekil 2.20. Nanolif iplikten örülen örgü.....	62
Şekil 2.21. Nanolif iplikten örülmüş kumaş (A) ve geleneksel akrilik iplikten örme kumaş (B)62	
Şekil 2.22. Çalışmada kullanılan boyarmadde.....	63
Şekil 2.23. Çalışmada kullanılan boyama makinesi.....	63
Şekil 2.24. Çalışmada boyama işlemindeki sıcaklık ve süreler	64

Şekil 2.25. Çalışmada kullanılan spektrofotometre	64
Şekil 2.26. Çalışmada kullanılan hava geçirgenliği test cihazı.....	65
Şekil 2.27. Certitest 8130 cihazı çalışma prensibine ait şematik görünüm	66
Şekil 2.28. Filtrasyon performanstesti.....	67
Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan ipliklere ait mukavemet ve kopma uzaması.....	69
Şekil 3.2. Wicking test sonuçları.....	70
Şekil 3.3. Renk verimi ve reflektans sonuçları	71
Şekil 3.4. Hava geçirgenliği ve porozite test sonuçları	73
Şekil 3.5. Filtrasyon test sonuçları	73



SİMGELER VE KISALTMALAR

μm	: Mikrometre
$\mu\text{S/cm}$: Mikrosimens/santimetre
μm	: Mikrometre
cP	: Santipoise
DC	: Doğru akım (Direct current)
DMF	: Dimetilformamid
HFIP	: Hekzafloroizopropanol
PAN	: Poliakrilonitril
PCL	: Polikaprolakton
PEO	: Poli(etilenoksit)
PLA	: Polilaktik Asit
PLC	: Programlanabilir mantık denetleyici (Programmable logic controller)
PVA	: Polivinil alkol
PI	: Poliimid
TFE	: Tetrafloroetilen

TEŞEKKÜR

Öncelikle bu çalışma konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar olan tüm çalışmalarında beni yönlendiren, destek olan ve tecrübelerini paylaşan tez danışmanım, değerli hocam Prof. Dr. Özer GÖKTEPE'ye içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

TUBİTAK 117M166 No'lu proje ile desteklenen çalışmama değerli katkılarından dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) ve bu çalışmada yer almamı sağlayan çalışmam sırasında bana destek olan çok değerli hocam Prof. Dr. Fatma GÖKTEPE'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmamda kullandığım akrilik iplik tedarikini sağlayan Melike Tekstil'e teşekkür ederim.

Tez çalışmamda kullanılan örme makinası ekipmanı temini için destek olan Hüseyin İpekçi'ye teşekkür ederim

Tez çalışmamda beni destekleyen arkadaşlarım Uğur Ergünay ve Bürhan Buğdaycı'ya teşekkür ederim.

Her zaman her konuda destekçim olan annem Gülşen ŞENOCAK'a, babam Sebahattin ŞENOCAK'a ve tüm aileme sonsuz teşekkür ederim.

Haziran, 2021

Ad SOYAD

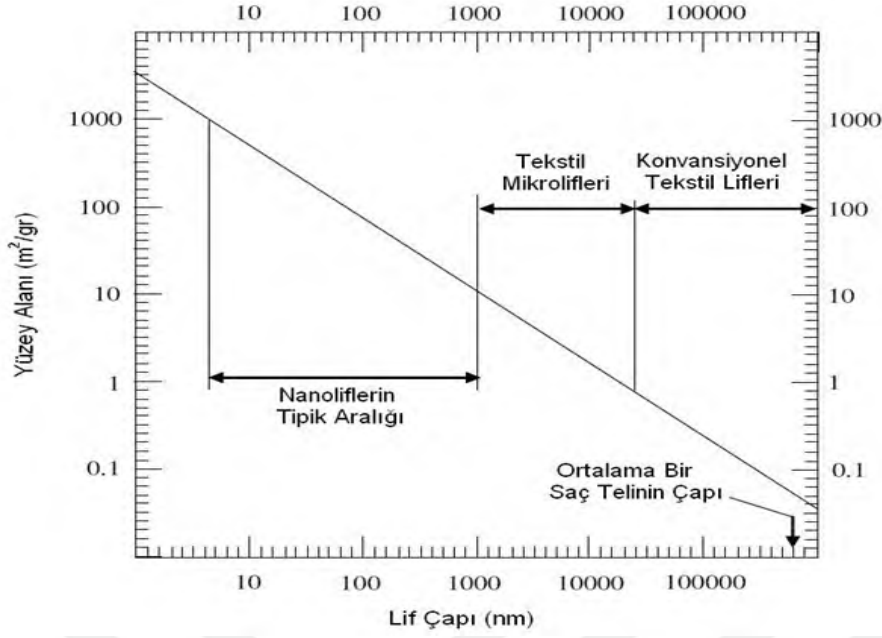
Meslek

1. GİRİŞ

Nanoteknoloji, aşırı küçük yapısal maddelerin üretimi, araştırılması ve bunlardan yararlanmanın teknikleri üzerinde çalışmaktadır. “Nano” sözcüğü Yunanca’dan alınmıştır “Cüce” anlamına gelmektedir (Atılğan, 2017; Özdoğan, Demir ve Seventekin, 2006) ve nano ölçek ise yaklaşık 1 ila 100 nanometre olan bilim, mühendislik ve teknolojidir. Uluslararası Birimler Sisteminde, “nano” ön eki 10⁻⁹’olup, 1 nanometre metrenin milyarda biridir (Nano.gov, 2018). Teknolojinin hızla gelişmesiyle küreselleşen dünyada mikro yapılardan nano yapılara doğru bir yönelme söz konusudur (Özdoğan vd., 2006). Nanoteknoloji, her geçen yıl daha fazla uygulama sahası bulmakta ve tüm dünya çapında daha fazla ilgi görmektedir. Bir pazar araştırma şirketi olan BCC Research’te Ocak 2019’da yayımlanan rapora göre nanolif ürünler için küresel pazarın yıllık %36,2’lik bir bileşik büyüme hızıyla 2018’de 927 milyon dolardan 2023’e kadar 4.3 milyar dolara çıkması beklenmektedir (Elmarco Company, 2019). Tekstilde nanoteknoloji uygulamaları, nano tekstiller olarak adlandırılabilir. Nano tekstil tanımı, nanoteknoloji uygulamaları sonucu elde edilen tüm tekstil yüzeylerini ifade etmektedir. Doğal ve sentetik tüm tekstil ürünlerinin yapı taşları moleküllerdir. Bu moleküller lif oluşturacak şekilde dizilirler, lifler de iplik eldesi için kullanılır. Bir kumaşın kullanım performansını geliştirmenin kalıcı yolu kumaşı meydana getiren liflerin, moleküler düzeyde takviyelendirilmesiyle mümkündür. Moleküler nanoteknoloji felsefesiyle elde edilen tekstil yüzeyleri birer nano malzemedir (McGuinness, 1997).

Nanolif elde etmek için en çok kullanılan yöntem Elektro lif çekim yöntemi (Elektrospinning)dir. Elektrolif çekim yöntemiyle ilgili ilk patent 1934 yılında Anton Formhals tarafından alınmıştır. Formhals’in patentinde etilen glikol ve selüloz asetattan oluşan çözeltiye 5-10 kV bir gerilim uygulanmıştır (Mondal, 2008). 1990’lı yıllardan beri nanoteknoloji alanındaki büyüme ve özellikle mikron altı boyutlara sahip liflerin oluşumu çok büyük oranda teknolojik avantajları mümkün kılmaktadır (Kim, 2010). Son yıllarda daha spesifik olarak çapı 100 nm’nin altındaki lifler kastedilmektedir (Ali, 2011).

Nanolifler, konvansiyonel liflerle karşılaştırıldığında, çap olarak oldukça küçük, fakat ağırlık oranına göre oldukça geniş yüzeye sahip olup, üstün özellikler göstermektedir. Şekil 1.1’de çeşitli lif esaslı materyallerin yüzey alanı ile lif çapı arasındaki ilişki ve çap aralıkları verilmiştir. Bu grafiğe göre, lif çapı azaldıkça spesifik yüzey alanı artmaktadır ve elektro lif çekim yöntemi ile üretilen liflere ait çap aralığı 10-1000 nm aralığında değişmektedir.



Şekil 1.1. Lif çapının yüzey alanına etkisi (Kozanoğlu, 2006)

Nanoliflerin sahip olduğu spesifik yüzey alanı ve küçük gözenek boyutları, bu liflere olan ilgiyi arttırmaktadır. Üretilen nanoliflerin özellikleri, işlem esnasında kullanılan besleme debisine, uygulanan voltaja diğer taraftan polimerin viskozitesine, yüzey gerilimine ya da iletkenliğine bağlı olarak değişmektedir (Subbiah, 2005). Ayrıca nanoliflerin diğer özellikleri şu şekilde özetlenebilir;

Nanoliflerin avantajları

- Spesifik yüzey alanı (yüzey alanı/birim kütle),
- Yüksek uzunluk/çap oranı (Wu, Monro, Milne, Wang, Yi, Liu ve Li, 2013),
- Biyolojik (biomimicking) taklit potansiyeli (Smit, Buttner ve Sanderson, 2007).
- Yüksek mekanik özelliklere ve esnekliğe sahiptir,
- Mikroorganizmalara ve küçük parçacık geçişine karşı iyi bir bariyerdir,
- Birim ağırlığında iyi mukavemet gösterir,
- Yüksek nem veya buhar geçiş oranı sağlar,
- Direkt yüzey kaplamalarında fonksiyonel davranışlar sergiler (Nanostatic, 2009).

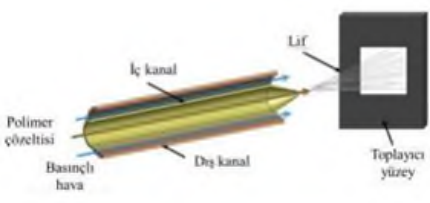

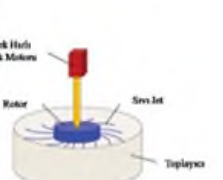
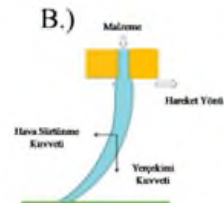
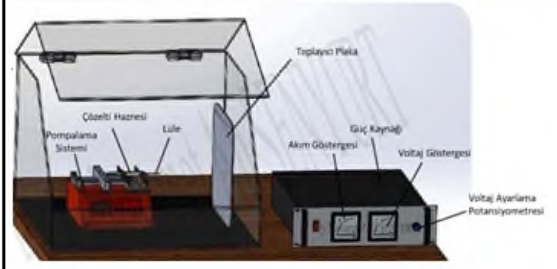
- Kimyasal bileşimi değiştirmeksizin, nanometre uzunluk ölçeğinde maddenin; erime sıcaklığı, mıknatıslanma, şarj kapasitesi vb. temel özelliklerini değiştirmek mümkündür.
- Biyolojik sistemlerde yeni tür yaratılabilir: örneğin DNA nanometre ölçeğinde düzenlenebilirse veya yapay bileşenler DNA'ya yerleştirilebilirse,
- Nano ölçekli bileşenlerin çok yüksek yüzey alanına sahip oluşu; kompozit malzemeler, çekirdek reaktörleri, ilaç dağıtımı ve enerji depolamada kullanmak için ideal yapar.
- Nano ölçekte, yüzey gerilimi ve lokal elektromanyetik etkiler nano yapılı malzemeleri daha sert ve daha az kırılğan yapmada daha önemli hale gelir.
- Çeşitli dış dalga olaylarının dalgaboyu ölçeğindeki etkileşimi malzemelerin öz boyutları için kıyaslanabilir hale gelir, malzemeleri çeşitli opto-elektronik uygulamalar için uygun yapar (Bozkaya, 2006; Özbay, 2006).

Lif çapı mikrometreden nanometreye düşürülürse, yüzey işlevselliklerinde esneklik ve daha iyi mekanik performans elde edilebilir (Afshari, 2007). Lif çapı nanometre düzeyine indirildiğinde, atom başına düşen gerinim enerjisi artmaktadır. Küçük çaplarından sayesinde yüzey/hacim oranları veya yüzey/kütle oranları yüksektir. Dolayısıyla yüksek spesifik yüzey alanlarına sahiptirler. Çapı 5-500 nm arasında olan liflerin spesifik yüzey alanları 10.000-1.000.000 m²/kg arasında değişmektedir; çapı 3 nm boyutunda nanoliflerde moleküllerin %40'ı yüzeyde yer alabilir. Bundan dolayı nanolifler çok yüksek yüzey enerjisine sahiptir (nano.gov, 2018; Buer, Ugbolue ve Warner, 2001; Ko, 2003). Nano materyaller, aynı kütlede daha büyük parçacıklardan oluşmuş materyale göre daha büyük yüzey alanına sahiptir. Bu durum materyali daha reaktif yapmakta ve materyalin mekaniksel ve elektriksel özelliklerini değiştirmektedir. Kuantum etkisi nedeniyle materyalin nano ölçekteki özellikleri baskın hale geçmektedir. Böylece nano ölçekli materyalin optik, elektrik ve manyetik özellikleri değişmektedir (Bonino vd., 2011). Bu nedenle nano boyuttaki bir malzemenin özellikleri, aynı malzemenin hacimli formundaki özelliklerinden tamamıyla farklıdır (nano.gov; Evcin, 2017). Örneğin hacimli gümüş toksik değildir buna karşın gümüş nanotanecikleri temas ettiğinde virüsleri öldürebilir (Evcin, 2017). Bu özellik nanoliflere fonksiyonel gruplar, moleküller, iyonlar, katalitik parçalar ve diğer birçok nano mertebede parçacıklarla bağlanma yeteneği kazandırır. Nanolifler, küçük çaplarından ötürü daha yüksek biyo aktivite, elektro aktivite ve iletkenlik gibi gelişmiş performans özellikleri sergilerler. Ayrıca yüksek moleküler

oryantasyona sahiptir. Kristalit büyüklükleri konvansiyonel liflere göre daha küçüktür, küçük boyutları sayesinde yapısal kusurları daha azdır, bu sayede oldukça iyi mekanik özellikleri vardır (Buer, Ugbolue ve Warner, 2001; Ko, 2003). Yüksek termal ve elektrik iletkenliği gibi gelişmiş performans özelliklerine sahiptirler (nano.gov, 2018).

1.1. Nanolif Üretim Yöntemleri

Konvansiyonel lif üretim yöntemlerinde kullanılan düze çaplarının nanoliflerin üretiminde kullanılabilecek kadar küçültülmesine imkânsız olması nedeniyle bu yöntemlerle nanoliflerin üretilmesi mümkün olmamaktadır (Özdoğan, Demir ve Seventekin, 2006). Islak eğirme, kuru eğirme, eriyik eğirme ve jel eğirme gibi geleneksel elyaf eğirme teknikleri genellikle mikrometre aralığına kadar çaplarda polimer lifler üretir (Asfhari, 2007). Son yıllarda nanolif üretiminde 4 yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler: Çözeltilen üfleme yöntemi (Solution blowing), Çift bileşenli lif eğirme (Bicomponent fiber spinning), Santrifüjlü eğirme (Centrifugal spinning), Elektro lif çekimi (Electrospinning) Nanolif üretim yöntemleri aşağıda Şekil 1.2’de görülmektedir.

Çözeltilen üfleme yöntemi (Solution blowing)	Çift bileşenli lif eğirme yöntemi (Bicomponent fiber spinning)
 <p>Polimer çözeltisi Basıncılı hava İç kanal Dış kanal Lif Toplayıcı yüzey</p> <p>1</p>	 <p>Denizde adalar Pasta dilimi Kek dilimi</p> <p>2</p>
<p>Santrifüjlü eğirme yöntemi (Centrifugal spinning)</p> <p>A.)</p>  <p>Yüksek Hızlı Elektrik Motoru Rotor Sıvı İlet Toplayıcı</p> <p>B.)</p>  <p>Malzeme Handkerchief Yöntemi Hava Akışı Yığılma Kuvveti</p> <p>3</p>	<p>Elektro lif çekimi yöntemi (Electrospinning)</p>  <p>Çözelti Haznesi Pomplama Sistemi Lüle Toplayıcı Plaka Güç Kaynağı Akım Göstergesi Voltaj Göstergesi Voltaj Ayarlaması Potansiyometresi</p> <p>4</p>

Şekil 1.2. Nanolif üretim yöntemleri (1. Gökçe, 2018; Gündoğdu, 2016; 3 ve 4. Kurtuluş, 2015).

Çözültiden üfleme yöntemi (Solution blowing)

Polimer çözültisinin yüksek basınçlı hava ile temas ettirilmesi sonucunda nanolif üretmeyi sağlayan bir tekniktir. Sistem şırınga pompası, şırınga, düze, basınçlı hava kaynağı, güç kaynağı ve toplayıcı yüzeyden meydana gelmektedir. Birkaç nozül tipi olmasına rağmen, genellikle eş merkezli sistem kullanılmaktadır (Gündoğdu, 2016). Nanolif üretimini etkileyen parametreler çözülti konsantrasyonu ve viskozite, düzenin iç çapı, çözültinin besleme hızı, hava basıncı ve toplayıcı yüzey ile düze arasındaki mesafeden oluşmaktadır (Gökçe, 2018).

Çift bileşenli lif eğirme (Bicomponent fiber spinning)

Çift bileşenli lifler, aynı lifi oluşturacak iki farklı polimerin aynı düze deliğinden akıtılarak elde edilmesi olarak tanımlanabilir. Bikomponent lifler genel olarak lif kesit şekillerine göre yan-yan (side by side), kabuk öz (steath core), denizde adalar (island in the sea), dış merkezli (exantric) ve dilimli pasta (segmented pie) olarak sınıflandırılırlar. Çift bileşenli lifler yüksek hava ya da su püskürtme yardımı ile bölünürerek üretilmektedir (Evcin, 2015 ve Kastakova, 2012). Konvansiyonel yöntemlerde düze içerisinde bikomponent lifler geçirilmekte ve bu lif karışımları daha sonra ayrılmaktadır. Ancak bu yöntemlerle üretilen nanoliflerin inceliği üniform olmamakta ve enine kesit görünümüleri de süreklilik taşımadığı için istenilen özellikleri taşımamaktadır (Özdoğan, Demir ve Seventekin, 2006).

Santrifüjlü eğirme (Centrifugal spinning)

Sistem şırınga pompası, şırınga, düze, rotor, güç kaynağı ve toplayıcı yüzeyden meydana gelmektedir. Santrifüjlü eğirme sisteminin çalışma prensibi şu şekildedir; ilk olarak şırınga pompası yardımıyla şırınga içindeki polimer çözültisi düzeye beslenir. Daha sonra düze belirli bir hızda döndürülür. Açısal hız kritik bir değeri geçtiği zaman sıvı jetleri uzar ve toplayıcı yüzeyde nanolif olarak toplanır (Gökçe, 2018) Şekil 1.2’de gösterildiği üzere dış yüzeyinde delikler bulunan dönen bir rotorun içine akışkan doldurulur. Devir hızı kritik değere ulaştığında, merkezkaç kuvveti akışkanın yüzey gerilimini yener ve rotor deliklerinden çıkarak jetler meydana gelir. Merkezkaç ile hava sürtünme kuvvetleri beraber jetleri uzatarak nano seviyede lif şeklini verirler. Uzayan jetler toplayıcı yüzeyde toplanarak yüzey formunda biriktirilmiş olur. Düzenek yığın şekilde toplamaya uygundur (Kurtuluş, 2015). Bu yöntemde viskozite ve yüzey gerilimi, rotor dönme hızı, düze deliklerinin çapı ve düze ile toplayıcı yüzey arası mesafe sistemi etkileyen parametrelerdir (Gökçe, 2018).

Elektro lif çekimi (Electrospinning)

Bu çalışmada Elektro lif çekimi yöntemi kullanılmıştır ve aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

1.2. Elektro Lif Çekimi

1934 yılında Formhals tarafından patenti alınan ‘elektro lif çekimi’ yöntemi üzerinde hala çalışılan ve geliştirilmekte olan bir yöntemdir. Elektro lif çekimi yöntemi ile ilgili birçok yayın yapılmış ve özellikle 1990 sonrası hızlı bir yayın artışı gözlenmiştir. Elektro lif çekimi, çok küçük debilerde viskoz sıvılara kilovolt boyutunda gerilim vererek akışkanı nano boyutlu liflere dönüştürme işlemidir (Formhals, 1934). Yani elektrostatik kuvvet kullanılarak polimer filamentlerin üretimi için deney düzeneğinin ana hatlarıyla çizildiği bir işlemdir (Ramakisha, 2005). Basit olması ve çok yönlülüğü sayesinde polimer çözeltilerinden mikronun da altında çaplara sahip lifleri oluşturmak için uygulanan en yaygın yöntemlerden birisidir (Wnek, Carr, Simpson, Bowlin ve Lett, 2003; Tan, Kotaki ve Ramakrisha, 2005; Kim, 2010). Bu yöntem çok küçük çaplarda polimer elyafları üretme kabiliyetinden dolayı büyük ilgi görmüştür (Asfhari, 2007). Günümüzde yaygın olarak 50-500 nm aralığında inceliğe sahip lifler içeren bir yüzey üretim şeklidir (Smit 2007, Haghi 2012). Son yıllarda yeniden keşfedilen, rafine edilen ve tekstilde olmayan uygulamalara dönüştürülen eski bir teknoloji olan elektro lif çekimi, nanolif üretim teknikleri arasında proses kontrolü, malzeme kombinasyonları açısından benzersizdir. Bu özelliğiyle elektronik, ilaç salınımı, kimyasal sensörler, doku iskelesi, filtrasyon ve katı hal aydınlatma uygulamaları dahil olmak üzere geniş bir kullanım yelpazesi için ürünler sağlayacak anahtar bir platform teknolojisi olarak tanınmasını sağlamıştır (Andray, 2008). Bu yöntemle elde edilen yüzeylerin, yüksek performanslı filtreler, hidrofil tekstiller, lif destekli kompozitler, yara sargıları için biyomedikal tekstiller, doku iskelesi, elektromanyetik koruma, fotovoltailer ve nanolif esaslı yüksek performanslı elektrotlar gibi çok farklı uygulama alanlarına sahip olduğu günümüzde artık yaygın olarak bilinmektedir (Smit, 2007; Haghi, 2012).

Elektrolif çekim yöntemi, minimum ekipman gerekliliği, oldukça ince lif çaplarının oluşumuna imkân vermesi ve birçok farklı polimer ile çalışılabilmesi gibi avantajları sayesinde tercih edilen nanolif üretim yöntemlerinden birisidir (Erkan, 2005). Basitçe laboratuvarında gösterilmesi için minimum ekipman gereksinimleri aşağıdaki gibidir:

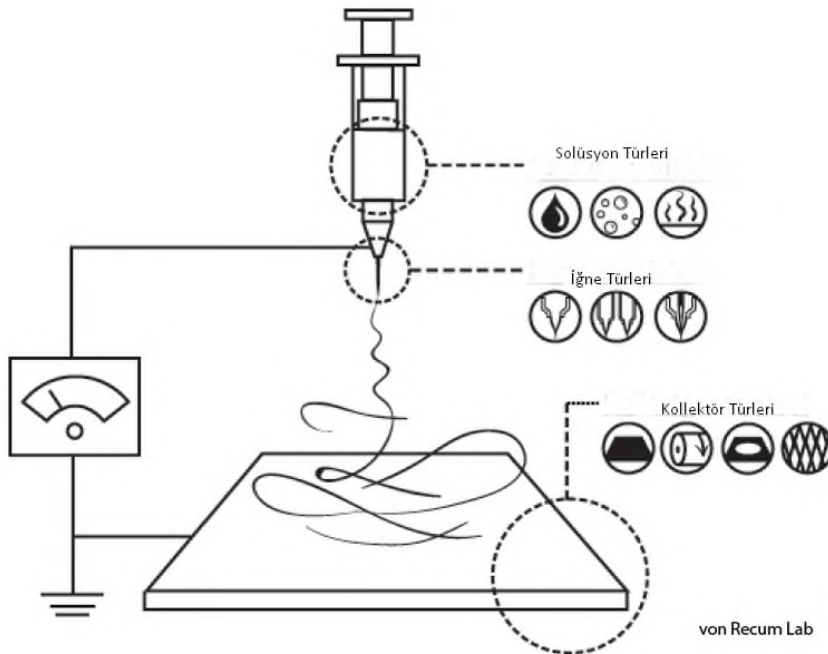
1.Viskoz bir polimer çözeltisi veya bir eriyik: Polimer uygun bir çözücüde çözüldükten sonra besleme ünitesine yerleştirilir.

2.Besleme ünitesi: Polimer çözeltisi ile temas halinde tutulan bir elektrot, şırınga-iğne ve pompa. Polimer çözeltisi şırınganın içerisine yerleştirilir ve polimer çözeltisinin akış debisini yani besleme miktarını kontrol etmek için pompa kullanılır.

3.Yüksek güç kaynağı: Elektrota bağlı yüksek voltajlı bir DC jeneratörü (elektrik alan oluşturmak için 5-35 kV arasında doğru akım gerilimi kullanılmaktadır). Çok yaygın olmasa da alternatif akım da bu amaçla kullanılabilir.

4.Toplayıcı: Nanolifleri toplamak için topraklanmış veya zıt yüklü bir yüzeydir. Genellikle alüminyum malzeme kullanılır (Andray, 2008; Ramakisha, 2005).

Şekil 1.3'te Elektro lif çekimi düzeneği, kollektör ve iğne türleri şematize olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.3. Farklı varyasyonlara sahip Elektro lif çekimi düzeneği (Merritt, Sonia, Agata, Zhenghong ve Horst, 2012)

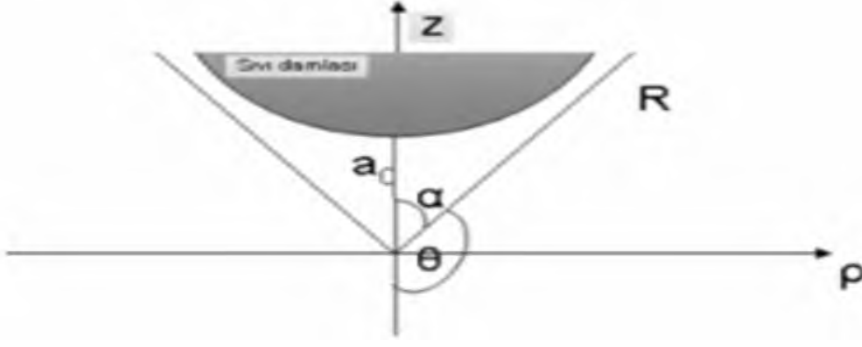
Elektro lif çekimi işleminin başlamasından toplama plakasında nanoliflerin meydana gelmesine kadar olan süreç aşamaları;

1. Damlacık oluşumu,
2. Taylor konisi oluşumu,
3. Elektro lif çekim jetinin oluşumu,
4. Kararlı bölgede jetin uzaması,
5. Kararsız bölgenin oluşması,

6. Lif formunda katılaşma, toplayıcı plaka olarak sıralanabilir (Yarin, Koombhongse ve Reneker, 2001)

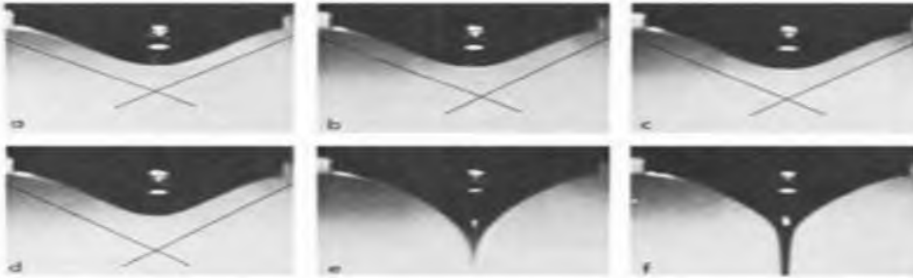
Elektro lif çekimi işleminde uygun bir çözücüde çözünen polimer çözelti haline getirilir ve besleme ünitesinde bulunan şırınganın -iğne veya diğer polimer besleyici nozül-içine yerleştirilir. Elektro lif çekimiprosesi yüksek voltaj kullanarak iğnenin ucundaki polimer çözeltisi ile toplayıcı plaka veya silindir arasında bir elektrik alanı oluşturur. Yüksek voltaj (10-100 kV) güç kaynağının bir elektrotu nozüle bağlanır. İğnenin ucunda asılı halde duran polimer çözeltisi, küresel bir biçimde durmaktadır. Yüzey gerilimi elektrostatik kuvvetinden büyük olduğu sürece polimer damlası küresel biçimde kalır.

Elektriksel alan büyüklüğü ve çözelti akışı ayarlanarak nanoliflerin çekim hızı kontrol edilir. Elektriksel alan uygulanmaması durumunda iğne ucundaki çözelti damlası yerçekimi sebebiyle yere damlayacaktır. Uygulanan potansiyel fark eşik değerine ulaştığı sırada, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilimi kuvvetlerine eşitlenir. Bu esnada küresel şekilde bulunan polimer çözeltisi artık koni şeklini alır. Bu koni şekline Taylor konisi adı verilir. Uygulanan elektriksel voltaj ile çözelti damlasının şekil değiştirmesi Taylor tarafından ilk kez 1960'lı yıllarda keşfedilmiştir. Taylor yaptığı çeşitli çalışmalarla elektrik yüklü sıvıların temel teorik prensiplerini açıklamıştır. Sıvı yüzeyinin elektrik alan etkisi ile yüklenmesi ve karşılıklı yüklerin birbirini itmesi sonucu bir dış kuvvet oluşur. Eşik değeri geçildikten sonra elektrostatik kuvvet ile damlacık koni şekline dönüşür ve fazla yükler koni ucunda bulunan yüklenmiş jetten karşıya doğru akar. Elektriksel kuvvetlerin yüzey gerilimine eş değer olduğu kritik noktada koni oluşur. Taylor bu koninin 49,3 derecelik bir yarım açıya sahip olduğunu hesaplamıştır Şekil 1.4.'te görülmektedir (Taylor, 1964).



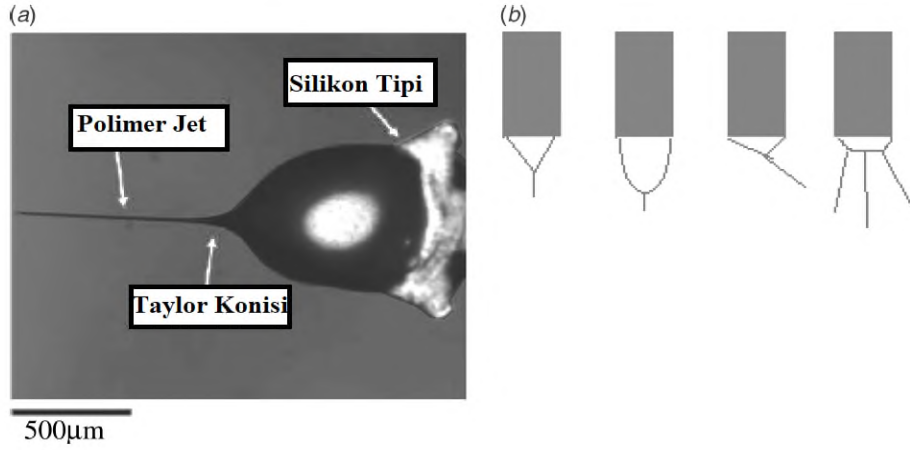
Şekil 1.4. Taylor konisinde oluşan yarı konik açısı (Taylor, 1964)

Taylor'un geliştirdiği teoride, elektrik alan içerisinde bulunan viskozitesi yüksek damladan ince liflerin oluşumu elektriksel kuvvetler ile yüklenen damla yüzeyindeki maksimum kararsızlık nedeniyle gerçekleştiği açıklanmıştır. Voltaj yükseltildiğinde küresel bir şekilde bulunan damlacık kritik noktada yarı küresel şeklini bozarak jet oluşmadan önce koni biçimini alır. Elektriksel kuvvetlerin etkisi ile viskoz sıvının yüzey kıvrımlığı değişir (Şekil 1.5) (Taylor,1964).



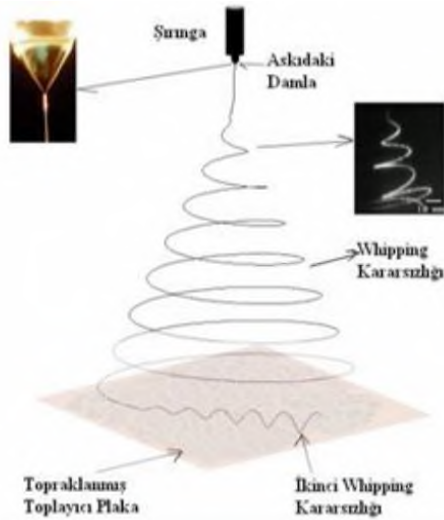
Şekil1.5. Kılcal boru ucundaki damlanın artan voltaj etkisiyle koni şeklini alması(a,b,c,d) ve jetin fişkırması (e,f) (Andray, 2008)

Yüklenmiş jet Taylor konisini terk ettikten sonra belirli bir mesafe boyunca kararlı şekilde hareket eder. Daha sonra jet üzerinde kararsızlık hali başlar. Taylor konisi görüntüsü Şekil 1.6'da görülmektedir. Sistem değişkenlerine ve kullanılan polimer çözeltisinin özelliğine bağlı olarak değişen 3 kararsızlık hali vardır. Kararsızlık hallerinden yalnızca biri oluşabileceği gibi jet bu kararsızlık hallerinin üçünü birden de gösterebilir. Bu kararsızlık halleri; klasik Rayleigh kararsızlığı, aksenal simetrik elektrik alan akımlanması, Whipping kararsızlığı olarak açıklanmıştır (Andray, 2008).



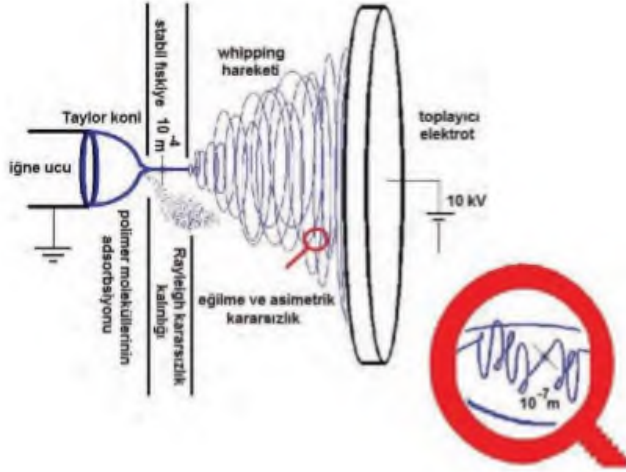
Şekil 1.6. Taylor konisinin optik görüntüsü ve mikrofabrik silikon uçtan çıkan bir jetin konik doğrusal kısmı(a) (Kameoka vd.,2003). Diyagram uygulamada elde edilen Taylor'ın konisinin farklı geometrileri(b) (Andray, 2008).

Elektro lif çekimi işleminde en sık görülen kararsızlık hali Whipping'dir. Whipping oluşum nedeni, jet üzerindeki yüklerin karşılıklı birbirini itmesi sonucu yüklerin bir arada olamaması nedeniyle merkezden radyal şekilde tork oluşmasıdır. Radyal yüklerin birbirlerini itmesi sonucunda, jet toplayıcıya yaklaştıkça temel jetten ayrılan daha küçük jetler oluşur. Oluşan jetlerin yeterince incilmesi ve viskoelastik kuvvetlerin yeterince sönümlenmesi yeni whipping kararsızlıkları oluşumuna yol açar. Bu kararsızlık hali ikinci whipping kararsızlığı olarak adlandırılır ve Şekil 1.7.'de gösterilmiştir (Shin, Hohman, Brenner ve Rutledge, 2001).



Şekil 1.7. Elektro lif çekiminde Whipping Kararsızlığı (Güçlü, 2012)

Bu esnada besleme ünitesinden fıskıran polimer uzamakta ve çözücüsü uçmaktadır. Bu sayede lif çapları küçülmekte ve küçülen çap sebebiyle yüklenme artmaktadır (Reneker, 1996). Yüklenmenin artmasıyla fiber çapları 10^{-7} m'ye ulaşmaktadır (Şekil 1.8) (Subbiah, 2005).



Şekil 1.8. Elektrostatik lif çekim prosesinin anatomik şeması (Subbiah, 2005)

Özetle, yüksek gerilim sağlayan güç kaynağının artı ucu şırınganın metal olan ucuna bağlanırken, toplayıcı plaka da topraklanır. Böylece şırınga ve toplayıcı plaka arasında yüksek bir elektrik alan elde edilmiş olur. Güç kaynağı tarafından sağlanan gerilim arttırıldıkça, yeterince yüksek bir değere ulaşan elektrik alan kuvvetleri çözelti üzerindeki viskoelastik ve yüzey gerilimi kuvvetlerini yener ve polimer molekülleri bir jet halinde şırıngadan toplayıcıya doğru taşınır. Toplayıcıda biriken lifler incelendiğinde, gözle görülemeyecek derecede hızlı bir şekilde gerçekleşen bu olayla mikron altı çaplara sahip liflerin üretildiği görülecektir. Elektro lif çekimi olayı sırasında jet benzer yüklerin etkisiyle ayrışma gösterdiğinde veya toplamda uzun bir yörünge takip ederek incelmış bir jet olduğunda toplayıcı plaka üzerinde nano boyutta çaplara sahip liflerin oluşturduğu ağ vardır. Bu incelme ya da ayrışma olayını çıplak gözle ayırt etmek olanaksızdır (Kılıç, 2008). Şekil 1.8.'de iç ve dış kuvvetler arasındaki dengenin şematik gösterimi verilmiştir.

Günümüzde piyasada birçok Elektro lif çekimi cihazı mevcuttur. Spinneret ve toplayıcı tipleri prosten farklıdır. Bazı cihazlar elektrot malzemesini iğneli olarak kullanır, bazıları ise iğnesiz bir nozül kullanır (Thenmozhi, Dharmaraj, Kadirvelu ve Kim, 2017).

Elektrolif çekim prosesi ile dairesel liflerin yanında çeşitli enine kesitlere sahip lifler de üretilebilir. Bu lifler çeşitli şekillerde ve boyutlarda farklı polimer çözeltilerinden elde edilebilirler. Genel olarak konvansiyonel iplik/lif çekiminde kullanılan pek çok polimer elektro lif çekim prosesi için uygundur (Şenol, Tayyar, Doğan ve Yaman, 2005).

Çizelge 1.1 Elektrospinning’te kullanılan bazı polimerler (Bahardwaj ve Kundu, 2010)

Polimerler	Çözücüler	Lif Çapı	Uygulamalar
İpek fibroin/PEO	Su	590±60	Kemik dokusu mühendisliği
Jelatin	Asetik/Formik Asit	109-761	Biyomateryal iskele
Kollajen Tipi 1	HFIP	100-600	Materyal Bilimi ve Mühendisliği
Kollajen Tipi 2	HFIP	496	Kıkırdak Mühendisliği
jelatin /PVA	Formik Asit	133-447	İlaçların kontrollü salınımı
Kitosan	Asetik asit	130	Biyomedikal uygulamalar
PVA	Su	250-300	İlaç teslimi
Kitosan/PVA	Formik asit, TFA, HCL	330	Doku mühendisliği
Selüloz asetat	Aseton, DMF, Trifloroetilen (3:1:1)	200-1000	Filtrasyon
Ha/Jelatin	DMF/Su	190-500	Doku mühendisliği
Fibrinojen	HFIP	80±30	Yara onarımı
Polyamid 6	m-Kresol	98,3±8,2	Biyomedikal uygulamalar
	Formik Asit		
Poliüretan-6	Su	100-500	Doku mühendisliği
Polikaprilakton	DMF	200	Yara iyileştirme
	Metilen Klorid		
Kollojen/kitosan	HFIP/TFA	300-500	Biyomateryal iskele
Kitin	HFIP	163	Yara iyileştirme
PCL/Jelatin	TFE	470±120	Yara iyileştirme

Elektro lif çekimi'nde kullanılan bazı polimerler Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Elektro lif çekimi işleminde kullanılan tipik çözücülerin listesi (Bahardwaj ve Kundu, 2010)

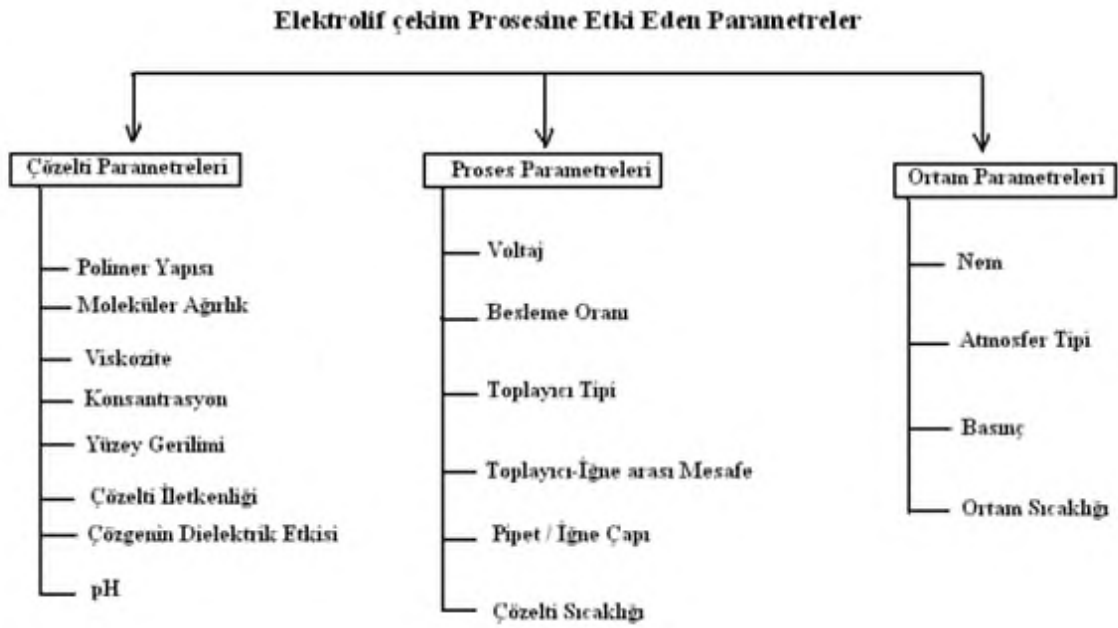
Çözücü	Yüze Gerilimi (mN/m)	Dielektrik Sabiti	Kaynama Noktası (°C)	Yoğunluk (g/mL)
Kloroform	26,5	4,8	61,6	1,498
Dimetil Formamid	37,1	38,3	153	0,994
Heksafloro İzopropanol	16,1	16,7	16,7	1,596
Tetrahidrofuran	26,4	7,5	7,5	0,886
Trifloro Etanol	21,1	27	27	1,393
Aseton	25,2	21	21	0,786
Su	72,8	80	80	1
Metanol	22,3	33	33	0,791
Asetik Asit	26,9	6,2	6,2	1,049
Formik Asit	37	58	58	1,21
Dikloro Metan	21,2	9,1	9,1	1,326
Etanol	21,9	24	24	0,789
Trifloro Asetik Asit	13,5	8,4	8,4	1,525

Elektro lif çekimi'nde kullanılan bazı çözücüler Çizelge 1.2.'de verilmiştir.

1.3. Elektro Lif Çekimi'ne Etki Eden Parametreler

Çalışma parametreleri, yalnızca Elektro lif çekimi'ne doğasını değil, aynı zamanda polimer solüsyonlarının Elektro lif çekim yoluyla nanoliflere dönüştürülmesini anlamak için de çok önemlidir. Bu parametreler genel olarak çözelti parametreleri, proses parametreleri ve ortam parametreleri olarak (Şekil 1.9) üç kısma ayrılabilir. Bu parametrelerin her biri, lif morfolojilerini etkileyebilir ve bu parametrelerin uygun şekilde kontrol edilmesiyle, istenen

morfolojiler ve çaplarda nanolifler üretilebilir (Li ve Wang, 2013). Bu bölümde, bu parametrelerin ve bunların lif özellikleri üzerindeki etkisinin kısaca yer almaktadır.



Şekil 1.9. Elektrolif çekim prosesine etki eden parametrelerin sınıflandırılması (Ramakrishna ve ark., 2005)

✓ Çözelti Parametreleri

➤ Polimer Yapısı

Elektro lif çekimi işlemini ve lif morfolojisini en fazla etkileyen parametrelerden biri polimer çözeltisinin özellikleridir. Polimeri çözmek için uygun çözücü mevcut olmalıdır. Elektro lif çekimi için kullanılan polimerler bir çözücü içinde çözülebilir veya eritilebilir olmalıdır. Polimerleri çözmek için çözücü, su ya da herhangi bir organik çözücü olabilmektedir. Çözücünün buhar basıncı, liflerin hedefe ulaştığı zaman bütünlüğünü koruyacak kadar hızlı buharlaşmaya uygun olmalıdır. Ancak lifin nanometre aralığına ulaşmadan sertleşmesine izin vermeyecek kadar da hızlı olmamalıdır.

Huang, Zang, Kotaki ve Ramakrishna (2003) yaptıkları çalışmada Elektro lif çekimi yöntemiyle çap kalınlıkları 3 nm'den 1 mikrona kadar değişebilen kesintisiz nanoliflerin birçok polimerden elde edilebileceğini belirtmişlerdir.

➤ Molekül Ağırlığı

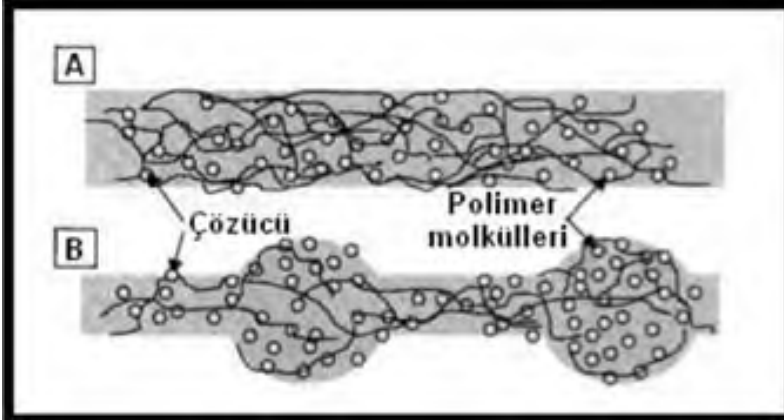
Molekül ağırlığı (MA), çözeltinin viskozitesini doğrudan etkileyen parametrelerden biridir. Genellikle yüksek MA'ya sahip polimer düşük MA'ya sahip polimerle kıyaslandığında viskozitesi daha yüksek olur. Elektro lif çekimi işleminin gerçekleştirilmesi için çözeltinin uygun viskozite ve moleküler ağırlığa sahip olması gerekmektedir. Yani MA arttıkça viskozitede artmaktadır. Polimer çözeltisinin iğne ucundan toplayıcı plakaya hareketi süresince, jetin dağılmasını önleyen molekül zincirlerinin birbirine dolanmasıdır. Polimerin MA'sı polimer zincir uzunluğunun göstergesidir. Bu yüzden monomer ve küçük polimer zincirleri elektro lif oluşturamamaktadır (Ramakrishna, 2005).

Polimerin MA'sı nanolif morfolojisinde önemli bir etkiye sahiptir. MA çözeltideki polimer zincirlerinin birbiri ile bağlanmasını ifade eder yani viskozitesini yansıtır. Konsantrasyon sabit tutulduğunda, polimerin moleküler ağırlığı azaltıldığında boncuklu bir yapının oluştuğu gözlenmiştir. MA artırıldığında daha pürüzsüz lifler oluşturulacaktır (Koski, Yim ve Shivkumar, 2004).

➤ Yüzey Gerilimi

Nanolif üretimi sırasında istenmeyen bir durum olan boncuk oluşumunda yüzey gerilimi önemli bir rol oynamaktadır (Demirel, 2016). Ayrıca çözelti viskozitesi ve çözeltinin elektriksel özellikleri, polimer jetinin uzamasını belirler. Tüm bu özellikler, elde edilen lif çapları üzerinde oldukça etkilidir. Yüzey gerilimi sıvı yüzeyini gergin tutan kuvvet olarak tanımlanabilir. Sıvının içerisinde bulunan bir molekül diğer sıvı moleküller tarafından çevrelenmiştir ve simetri sebebiyle kuvvet bileşkesi sıfırdır. Fakat sıvının yüzeyinde bir molekül, denkleşmemiş kuvvet alanlarına sahip olacağından molekül sıvı içerisine çekilir ve yüzeyi gergin bir hal alır. Elektroçekim yüklü polimer çözeltisinin kendisine ait olan yüzey gerilimini aşması sonucu başlamaktadır. Çözelti viskozitesi düşük ise yani çözelti içerisinde yüksek oranda çözücü molekülleri varsa, jet yapısı boyunca yüzey gerilimi kuvvetlerinin baskın bir etkisi olmaktadır. Bunun üzerine çözücü moleküller kendi yüzey gerilimlerini azaltabilmek için bir araya gelir ve boncuklaşmaya sebep olurlar. Bu sebeple polimer jeti toplayıcı plakaya doğru ilerlerken yüksek yüzey gerilimi nedeniyle boncuklaşma meydana getirebilir ve bu durum aynı zamanda jetin oluşmasında engelleyebilir. Eğer viskozite oranı yüksek ise çözücü molekülleri arasında etkileşim oranı daha yüksek olacağından çözelti yüklerinin etkisi nedeniyle gerilir ve uzar. Bu esnada çözücü moleküller, polimer zincirleri

arasında dağılır ve bu durum çözücü moleküllerin yüzey gerilimi sebebiyle toplanma olasılıklarını düşürür ((Nie, Zheng, Xu, Li ve Han, 2008). Şekil 1.10.'da yüksek ve düşük viskozite etkisi görülmektedir.



Şekil 1.10. A Yüksek viskozitede çözücü molekülleri, karışık polimer molekülleri üzerine dağılmıştır B Düşük viskozitede çözücü moleküller, yüzey geriliminin etkisiyle bir araya toplanma eğilimi göstermiştir (Ramakrishna, 2005)

➤ Viskozite

Viskozite, sürekli liflerin elde edilebileceği konsantrasyonun belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Düşük viskozitede, lif morfolojisinde yüzey gerilimi baskındır. Belirli bir konsantrasyonun altında, lifler yerine damlacıklar oluşur; çok yüksek viskozite ise iğne ucundaki akış kontrolü zorlaşır ve iğne ucunun tıkanmasına hatta üretimin engellenmesine sebep olmaktadır (Lim, Gwon, Jeun ve Nho, 2010).

Çok düşük viskozite polimer solüsyonunun yerçekimi etkisi ile iğne ucundan damlamasına, çok yüksek viskozite ise iğne ucunun tıkanmasına ve üretimin engellenmesine sebep olmaktadır.

Ramakrishna vd. (2005), Elektro lif çekimi yönteminde viskozite ve voltajını etkisini araştırmışlardır. Artan voltaj değeri ile lif üzerinde boncuklanma miktarının da arttığını bunun nedeni olarak da jetin artan kararsızlığının bir sonucu olabileceğini gözlemlemişlerdir.

➤ Konsantrasyon

Çözeltinin uygun viskozitede olabilmesi için uygulanan bir diğer yol polimer konsantrasyonu ile ilgilidir. Konsantrasyonun artırılması ile polimer zincirleri birbirine daha çok dolanır ve neticede sürekli bir jet sağlanmış olur. Polimer konsantrasyonun çok düşük olması ise polimerin lif şekline dönüşmesini engellemekte ve yüzeye damlacıklar şeklinde düşmesine yol açmaktadır. Yüksek polimer konsantrasyonunda boncuklanma sıklıkla görülmez ancak yüksek polimer konsantrasyonu daha büyük lif çaplarına neden olabilir (Munir, Suryamas, Iskandar ve Okuyama, 2009).

➤ Çözeltinin İletkenliği

Polimer çözeltisinin elektrolif olarak çekilebilmesi için belli bir iletkenlik değerine sahip olması gerekir. Elektrolif çekim işleminde jet oluşması için yüzeyde yüklerin akması ve bu sayede de çözeltinin uzama olayı gerçekleşmelidir. Çözeltinin iletkenliği artırılır ise jet tarafından daha fazla yük taşınır. Çözeltiye bir miktar tuz veya iyon ilave edildiği takdirde artan yükler ile çözelti daha fazla uzayacaktır. Böylece boncuklu yapılar oluşmaz ve daha düzgün lif elde edilir. Polimer jetinin uzaması aynı zamanda da daha küçük çaplarda lif oluşmasını sağlar. Ancak lif çapındaki düşüşün bir sınırı vardır. Çözelti gerilirken, yüklerin Coloumb kuvvetlerine karşı daha yüksek viskoelastik kuvvet oluşacaktır (Ramakrishna, 2005). Tuzun eklenmesi, Elektro lif çekimi işlemini iki şekilde etkilemektedir:

(i) polimer çözeltisindeki iyon sayısını artırır; bu, sıvının yüzey yükü yoğunluğunun ve uygulanan elektrik alanı tarafından üretilen elektrostatik kuvvetin artmasına neden olmaktadır.

(ii) polimer çözeltisinin iletkenliğini artırır, bu da sıvının yüzeyi boyunca teğet elektrik alanında azalma ile sonuçlanmaktadır (Angamma ve Jayaram, 2011).

Solüsyon iletkenliği, Taylor koni oluşumunu etkilemenin yanında nanoliflerin çapını kontrol etmede de yardımcı olmaktadır. Solüsyonun iletkenliğinin kritik bir değere yükseltilmesi, Taylor konisini oluşturmak için damlacık yüzeyindeki yükü arttıracak ve elyaf çapında da azalmaya neden olacaktır (Sun, Long, Zhang, Li, Duvail, Jiang ve Yin, 2014).

➤ Çözeltinin dielektrik etkisi

Kullanılan çözücülerin yüksek dielektrik sabitine sahip olmaları boncuk oluşumunu ve fiber çaplarını azaltır. N,N-dimetilformamid gibi yüksek dielektrik sabitine sahip çözücülerin kullanılması düzgün morfolojide fiber oluştururken aynı zamanda jetin bükülme kararsızlığını da artırmaktadır. Bu durum polimer jetinin kat edeceği yolu artırarak fiber çaplarını düşürmektedir (Çay, 2015).

✓ Proses Parametreleri

➤ Voltaj

Elektro lif çekimi işleminde lif oluşumu için minimum değerde bir voltaja ihtiyaç duyulmaktadır. Daha düşük çapta ve boncuksuz lif eldesi için voltaj miktarı belirli seviyeye kadar artırılmaktadır.

Beachley ve Wen (2009) elektrolif çekim prosesinde lif çapını ve lif uzunluğunu etkileyen parametreler üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada, voltajın lif çapına etkisinin kayda değer boyutlarda olduğu belirtilmiştir. Çap üniformitesi de voltajın artması ile artmıştır. Bir başka çalışmada Duve ve Hsieh (2008), artan voltajın daha yüksek bir elektrik alan oluşturması ve bu durumun jetin kararsızlığını artırıp aldığı yolu uzatması üzerine, lif çapının da arttığını belirtmişlerdir. Artan besleme oranının elektrostatik alana aktarılan solüsyon/çözelti oranının artırılmasıyla lif çapının arttığını belirtmişlerdir.

➤ Besleme Oranı

Besleme debisi/oranı parametresinin, elektro çekilmiş nanoliflerin morfolojisi üzerinde büyük etkisi vardır. Düzgün ve boncuksuz elektro çekilmiş nanolifler, polimer çözeltisinin kritik besleme debisi değeri ile üretilebilmektedir. Bu kritik değer polimer sistemine göre değişebilmektedir. Besleme debisi, optimum değeri aştığında Taylor konisinin stabilitesini etkilemektedir. Bu nedenle besleme debisini kritik bir değerün üstüne çıkarmak, gözenek ebadı ve elyaf çapında artışa aynı zamanda boncuk oluşumuna da yol açmaktadır (iğne ucu ile metalik toplayıcı arasındaki uçuş sırasında nanolif jetinin tam kurumaması nedeniyle). Örneğin, polistren polimerinin, beslemesi 0.10 mL/dk'ya yükseltildiğinde boncuk oluşumu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, besleme 0.07 mL/min düşürüldüğünde, boncuksuz nanolifler oluşmuştur (Megelski, Stephens, Bruce ve Rabolt, 2002). Yapılan çalışmalarda en düşük lif çaplarının en düşük akış hızlarında olduğu gözlemlenmiştir. Fakat çözeltinin akış

hızı, şırıngayı terk eden lif jeti ile yer değiştirebilecek bir hıza sahip olmadığı sürece Taylor konisi şekli korunmamaktadır (Taylor, 1964).

Akış hızı arttıkça nanolif çapı artar. Wu, Zhang, Liu ve Qin (2016), yaptıkları çalışmada iğneler arasındaki mesafe arttıkça hem nanoliflerin hem de nanolif ipliklerin çapları bir eşik değerine yükselmiş ve daha sonra iki iğne arasındaki mesafe arttıkça azalmaya başlamıştır.

➤ Toplayıcı Tipi

Toplayıcı plaka, nanolif üretimi ve diziliminde son yapı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toplayıcı plakada farklı sistemlerin oluşturulması; paralel dizilmiş lif elde etme, liflerde kristalinite ve mukavemet artışı sağlanması, hızlı üretim, daha geniş alanda liflerin toplanması, farklı nanolif yapıların eş zamanlı üretimi gibi sebeplere dayanmaktadır (İpek, Canbolat ve Fatih, 2017). Toplayıcı plakanın üretildiği malzeme ve geometri şekli nanolif morfolojisini etkileyen iki önemli parametredir. Nanoliflerin topraklanmış toplayıcı plakaya temas etmesiyle sahip oldukları elektriksel yükler sıfırlanmaktadır. Dışarda kalan nanoliflerdeki elektriksel yüklerin boşalması daha yavaş gerçekleşmektedir. Tüm bunlar nanolif morfolojisini, özellikle de birim alandaki yoğunluklarını etkilemektedir. Bu nedenle toplayıcı plakanın üretildiği materyalin dielektriksel özellikleri önemsenmelidir (Andrady, 2008).

➤ Toplayıcı-İğne arasındaki mesafe

Toplayıcı ile iğne arası mesafe, elektrolif çekim sürecinde elektrik alan kuvvetlerini ve uçuş süresini etkileyen önemli bir parametredir. Çözücünün buharlaşma süresi de düşünülerek uygun bir mesafe belirlenmelidir. Mesafe kısaldığında, buharlaşma süresi kısalmaz ve sonuç olarak kurumayan lifler de temas noktalarında birbirlerine yapışır. Toplayıcı üzerindeki liflerde boncuklu yapılar gözlenir (Ramakrishna vd., 2005). Mesafe çok arttırıldığında ise elektrolif çekimi için gerekli olan elektrostatik kuvvetler oluşmaz. Toplayıcı-iğne arası mesafeyle voltaj arasında ters bir orantı olduğu söylenebilir. Mesafeyi azaltmak voltajı arttırmakla aynı etkiyi yapmaktadır.

➤ Pipet-iğne çapı

Pipet/iğne iç çapının elektrolif çekim prosesinde etkisi vardır. Küçük iç çap daha az tıkanma ve boncuklanma oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca pipet/iğne iç çapının küçük

olması oluşan lif çaplarının daha ince olmasını sağlar. İğne/pipet ucunda oluşan damlanın çapı küçüldükçe damlacığın yüzey gerilimi artar. Aynı voltaj için, jet oluşumunun başlayabilmesi için daha fazla Coulomb kuvveti gerekir. Sonuç olarak, jetin ivmesi düşerek, toplayıcıya ulaşmadan önce havada geçirdiği süre ve uzama miktarı artacağı için daha ince lifler oluşur. Ancak, pipet/iğne çapı çok düşük olursa da damlacığın pipet/iğne ucundan püskürtülmesi sorun olabilir. Şırınga iğnesinin artan çapı, ortaya çıkan liflerin morfolojisini ve liflerin ortalama çapını etkilememektedir. Ancak, iğnenin çapındaki azalma, elyaf çaplarının polidispersitesinde artışa neden olur, bunun sonucu olarak üretim sırasında daha büyük ve daha küçük çaplı nano elyaf elde edilebilmektedir (Ashraf, Sofi, Malik, Beigh, Hamid ve Sheikh, 2019).

Ø Çözelti sıcaklığı

Çözelti sıcaklığı, buharlaşma hızının artması ve çözelti viskozitesinin düşmesinde etkilidir. Düşük viskozitelerde, coulomb kuvvetleri jet üzerinde daha fazla gerilme yaratarak daha düzgün ve ince liflerin elde edilmesini sağlar. Çözelti sıcaklığının artması ile polimer moleküllerinin de hareketliliği artar. Bu durumda, coulomb kuvvetlerinin çözelti üzerindeki çekim etkisi de daha fazla olur (Ramakrishna vd., 2005). Çözelti sıcaklığının yüksek olması çözeltilerin elektro lif çekimi işlemi sırasında buharlaşma hızını arttırırken viskozitesinin azalmasına neden olur. Yüksek sıcaklığa sahip çözeltilerden elde edilen nanoliflerin oda sıcaklığındakilere kıyasla daha düzgün ve üniform yapıda oluştuğunu tespit edilmiştir. Artan sıcaklık, polimer moleküllerinin hareketliliğinin artmasına ve sonuçta kolombik kuvvetlerin çözeltilerin gerilimini arttırmasına sebep olmaktadır. Çözelti sıcaklığının etkisiyle ilgili yapılan çalışmalarda, yüksek çözelti sıcaklığında elde edilen nanolifler oda sıcaklığındakilere kıyasla daha düzgün ve üniform yapıda oluştuğunu tespit edilmiştir. Ancak, yüksek sıcaklık yapılan çalışmalarda enzim, protein gibi çözeltilere eklenen biyolojik materyallerin fonksiyonelliğini yitirmesine sebep olabilmektedir (Haghi ve Akbari, 2007).

∨ Ortam Parametreleri

> Nem

Ortamın nemi, kullanılan çözücü tipine ve polimer çözeltisinin hidrofilitesine göre, her bir polimer çözeltisini farklı olarak etkiler. Sulu çözeltiler, nemden en fazla etkilenen çözeltilerdir. Bu çözeltilerde çözeltideki suyun ve atmosferin etkileşime girmesi olağandır. Yüksek nem oranlarında, su molekülleri lifin yüzeyi üzerinde yoğunlaşabilir. Sonuç olarak,

özellikle uçucu çözücülerle hazırlanan polimer çözeltilerinde lif morfolojisi çok etkilenir. Yapılan araştırmalarda, artan nem ile lif yüzeylerinde gözenekler oluştuğu gözlenmiştir (Düzyer, 2014).

➤ Atmosfer basıncı

Elektrolif çekim işlemine basıncın etkisini ancak kapalı ortamda görebilmek mümkündür. Genellikle, ortamdaki basıncın azalmasının elektrolif çekim işleminde olumsuz etkiye sahip olduğu görülmüştür. Elektrolif çekimi işlemi, atmosfer basıncından daha düşük bir basınç altında gerçekleştirildiğinde şırıngadaki çözeltinin dışarı akma eğilimi daha fazla olur ve bu durum stabil olmayan bir jet başlangıcına sebep olmaktadır (Ramakrishna vd., 2005).

➤ Ortam sıcaklığı

Çözeltinin buharlaşma oranı, ortam sıcaklığı düşük olduğunda yavaşlamaktadır. Toplayıcıya ulaşan polimer jeti tamamen katılaşmamaktadır ve böylece oluşan liflerin çapları artmaktadır. Eğer ortam sıcaklığı yüksek olursa, polimer jetinin püskürtülmesi ve jetin uzaması için gerekli süre yüksek katılaşma oranından dolayı sağlanamamaktadır. Bu durumda, lif çapları ve lif çap dağılımları artmaktadır. Sonuç olarak, çözücünün buharlaşması ve daha ince lifler elde edilebilmesi için optimum sıcaklık değerleri sağlanmalıdır (Gümüş, 2009).

1.1. Elektro Lif Çekim Sisteminin Avantajları ve Dezavantajları

Elektrik alan lif çekimi tekniği diğer nanolif üretim yöntemleri ile karşılaştırıldığında, çok çeşitli polimer çözeltilerinin kullanılabilmesi ve eriyikten nanolif elde edilmesinde, basit ve çok yönlü tekniğe sahip olması nedeniyle son yıllarda ön plana çıkmaktadır. Elektro lif çekimi tekniğinin aşağıda bazı üstün özellikleri sıralanmıştır;

- Düşük üretim maliyetlerine sahip olması,
- Basit bir düzeneğe sahip olması,
- Tekrar edilebilirliğinin yüksek olması,
- Proses parametrelerinin kolayca değiştirilebilmesi,
- Lif çaplarının kontrol edilebilmesi ve

- Diğer yöntemlere göre daha geniş çeşitliliğe sahip polimerlerin kullanılabilmesidir.

Kıyak ve Çakmak (2014) yaptıkları çalışmada nanolif çaplarının kontrol edilebilmesinin, organik-inorganik ve hibrid nano materyallerin üretilmesinin nanolif üretim teknolojilerine olan ilgiyi artırdığını belirtmişlerdir. Yanısıra nanoliflerin gelişigüzel veya oryante olmuş, çekirdek-kabuk, içi boş, gözenekli ve çok kanallı mikro-tüp olarak kullanılabilmekte olduğunu ve bu çok değişik özellikli malzemelerin yine çok çeşitli lif üretim teknikleri sayesinde üretilmekte olduğunu bunların arasında en uygun yöntemin elektrolif çekim metodu olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmalarda Elektro lif çekimi yöntemi PAN polimerinden karbon nanolif üretimi için ümit verici bir teknik olduğu belirtilmiştir (Beese, Papkov, Li, Dzenis, ve Espinosa, 2013; Nataraj, 2012).

Nanoliflerin nano boyutu doğal olarak ona yüksek bir yüzey alanı/hacim oranı kazandırmaktadır. Bu özellik, sensörler ve afinite membranları gibi geniş yüzey alanının istendiği uygulamalarda nanolifleri çok çekici kılmaktadır. Nanoliflerden üretilmiş membranın geniş yüzey alanı, döküm prosesiyle elde edilen filmlere göre bazı avantajlara sahiptir (Feng vd., 2019; Levitt vd., 2017). Hızlı ilaç salınımının istendiği uygulamalarda, nanofiberlerin yüksek yüzey alanı hızlı çözünmeye izin verir (Kwak vd., 2019).

Göktepe ve Mülayim (2018) çalışmalarında Elektro lif çekimi iplik üretiminde başarılı iplik üretimi için 20'den fazla farklı yaklaşım ve yöntemi incelemişlerdir ve Elektro lif çekimi ile iplik eğirmek için hala evrensel kabul edilmiş bir sistem olmadığını belirtmişlerdir. İnceledikleri yaklaşım ve yöntemleri paralel lif demeti ve bükülmüş üretim sistemleri olmak üzere 2 grupta kategorize etmişlerdir.

Elektro lif çekimi yönteminin tüm bu avantajlarına rağmen dezavantajları da bulunmaktadır:

- Düşük üretim verimliliği
- Endüstriyel alanlar için büyük miktarlarda üretime gereksinim olması
- Zaman içinde tıkanma eğilimi gösteren küçük, iğne benzeri düzeler
- Solüsyonun kılcal borudan/iğneden beslenmesi ve aynı zamanda bir miktarının damlaması sebebiyle az miktarda eğirme potansiyeli
- 100 nm altı lif çaplarının elde edilmesindeki tekrarlanabilirliğin henüz tam anlamıyla sağlanamaması

- Çalışma koşullarını etkileyen parametrelerin çok ve hassas olması
- Çalışma koşullarından kaynaklanan delik ve boncuk hataları gibi bazı zorluklar

Ayrıca Elektro lif çekimi yöntemiyle oluşturulan lif ağ yapısı; çözelti derişimi, elektrik alan şiddeti ve iğne ucu-toplayıcı arası mesafeye bağlı düzensiz bir yapı oluşturmaktadır. Yani liflerin yapısı ve dizilimi bakımından rastgelelik içermektedir. Çok sayıda hassas parametrenin sisteme etki etmesi sebebiyle karmaşık bir üretime sahiptir. Düzgün dizilimli ve kontrollü lifler elde etmek için yapılan çalışmalarda kullanılan mekanik düzenekler, lif yapılarının oldukça düşük çaplara sahip olmasına neden olmuştur. Bu hassasiyette toplayıcı düzeneklerden elde edilen liflerde, uygulama bakımından birtakım problemlerle karşılaşmaktadır. Düşük üretim miktarı sistemin endüstriyel anlamda yaygınlaşmasını engellemiştir. Ayrıca metal iğne ucunun tıkanması, çözücünün buharlaşması, düşük molekül oryantasyonu ve yetersiz mekanik özellikler diğer problemleri oluşturmaktadır. Nanolif iplik üretiminde üretim oranı düşük olması ve teknik olarak karmaşık ve pahalı bir yöntem olması sebebiyle son zamanlarda büyük ölçekli nanolif üretimi için yeni bir cihaz ve süreç arayışı başlamıştır. Son yıllarda elektro mekanik sistemin geliştirilmesi ile nanoliflerin üretimi için girişimde bulunulmuştur. Bazı araştırmacılar santrifüj ve Elektro lif çekimi prosesini birleştirmiştir.

Engström (2010)'ın yaptığı çalışma santrifüj ile Elektro lif çekimi kavramlarını birleştiren fenomenolojik süreç parametresi sunulmuştur. Sunulan yeni süreçminimum kusurlu formda (boncuksuz ve deliksiz) ve 0,5 µm'den daha ince nanolifler elde etmek için parametreler optimize edilmeye çalışılmıştır.

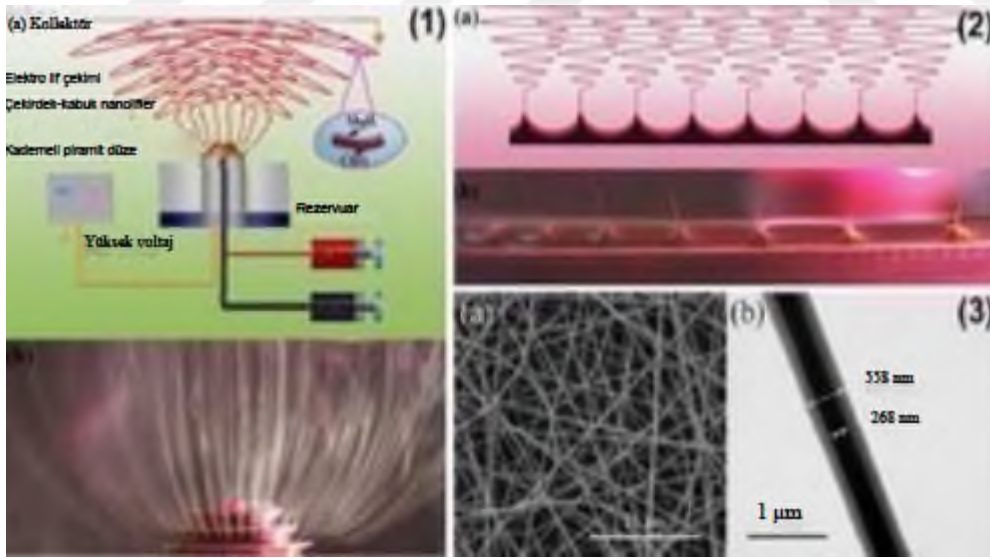
Dabirian, Ravandi, Pishavar ve Abuzade (2011) yaptıkları çalışmada elektro-santrifüj iplikçiliğinde jet oluşumu süreci Elektro lif çekimi ve santrifüj iplikçiliğinde aynı prosesi araştırmış ve karşılaştırmışlardır. Elektro santrifüj eğirme yöntemini, hizalanmış nanolif üretimi ve düşük viskoziteli eğirme için etkili bir teknik olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak, elektro-santrifüj eğirme, hizalanmış nanoliflerin üretimi için Elektro lif çekiminden daha uygun bir teknik olduğunu, çünkü jetin kararsızlığını, çevredeki hava kontaklarının etkisiyle merkezkaç kuvveti ile azaltılabildiğini mümkün kılacağını ve bunun üretilen nanoliflerin mekanik özelliklerini kısmen iyileştirebileceğini belirtmişlerdir.

Bazı araştırmacılar, merkezkaç kuvvetinin uygulanmasının nanoliflerin üretim verimliliğinde önemli bir artış sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Forcespinning™ gibi

elektrostatik proseste olduğu gibi elektrostatik kuvvet yerine santrifüj kuvvet kullanarak nanolif üretmek için makinalar geliştirilmiştir.

Dabirian, Ravandi ve Pischevar (2013) yaptıkları araştırmada polimer çözeltisinin konsantrasyonuna ve uygulanan voltaja bağlı Elektro lif çekimi ile karşılaştırıldığında elektro-santrifüj yönteminin üretim hızında artış sağladığını öne sürmüşlerdir.

Elektro lif çekimi, farklı alanlardaki uygulamalar için büyük potansiyele sahip basit bir süreç olmasına rağmen dezavantajlarından dolayı bu yöntemin varyasyonları geliştirilmesiyle ilgili çok iğneli, iğnesiz ve ko-elektro lif çekimi veya ko-aksiyel elektro lif çekimi mevcuttur. Çok iğneli ve iğnesiz teknikler elektro lif çekimi üretim verimliliğini artırmak için kullanılmaktadır. Öte yandan, ek işlevselliklere sahip kompozit ve iyileştirilmiş kalitede çekirdek-kabuk ve çok katmanlı nanolifli yapılar sentezlemek için eş eksenli Elektro lif çekimi ve ventional electrospinning geliştirilmiştir. Eş eksenli Elektro lif çekimi'nde iki farklı nanolif yapı taşları farklı koaksiyel kılcal kanallar ve ardından çekirdek-kabuk kompozitine entegre nanolifler oluşmaktadır. Koaksiyel elektro lif çekimi'nin ortaya çıkışı, fonksiyonel nano malzemeler büyük ölçekli bir önemli ölçüde katkıda bulunmayı amaçlamaktadır. Aşağıda Şekil 1.11'de koaksiyel Elektro lif çekimi görülmektedir.



Şekil 1.11. Eş eksenli düze kullanarak Elektro lif çekimi ve Elektro lif çekimi işleminde koaksiyel jetler (Jiang ve Qin, 2014)

Valipouri, Ravand ve Pischevar (2015) yaptıkları çalışmada uygulanan voltaj ve sıcaklık gibi yaklaşık 369 işlem parametresini denemişlerdir. İyonik tuzların eklenmesiyle

nispeten daha küçük çaplı ve boncuksuz liflerin üretildiği gösterilmiştir. Bu çalışmaya göre: Elektro lif çekimi'nde uygulanan voltajı artırmak, nanoliflerin çapını artırır. Tüm bu yaklaşımlar nanolif çapına etki etmesine rağmen, istenmeyen bileşenlerin eklenmesi, kontrol edilebilirliğin zor ve yetersiz olması nedeniyle bazı kısıtlamalar vardır. Bu nedenle, herhangi bir ek prosedür olmaksızın nanolifleri yüksek homojenlik ve incelikte üretebilecek bir yol sağlaması gerekli görünmektedir.

Manea, Cramariuc, Caunı ve Sandu (2015) yaptıkları çalışmada Elektro lif çekimi teknolojisi ile polimer çözeltilerinden nanoliflerin elde edilmesi için yeni bir ekipman sunmayı amaçlamışlardır. Önerilen ekipman, Elektro lif çekimi teknolojik parametrelerinin bilgisayarlı kontrolünü, Elektro lif çekimi işleminin modülerliği ve otomatik kontrolü fikrinden başlamış olup; avantajları: işlem süresinde kayda değer azalma, sürecin bilgisayarlı kontrolü ve güç kaynağında %55 azalma olarak belirtmişlerdir. Elektro lif çekimi işlemi ile nanoliflerin elde edilmesi teknolojisi, farklı tipteki polimerler için genişletileceğini belirtmişlerdir.

Göktepe ve Mülayim (2018) mevcut sistemlerin bazı istisnalar hariç çoğunlukla kısa uzunlukta iplik üretmekte olduğunu, üretilen ipliklerin inceliğinde yüksek bir varyasyon olduğunu belirtmişlerdir. Üretim sisteminde büküm seviyesi kontrolünün önemli olduğunu vurgulamışlardır. Gerçek bükümlü kesintisiz nanolif iplikler üretmek için bazı çalışmaların var olduğunu ancak, genellikle asıl amacın başarılı bir eğirme sistemi olmasından dolayı ihmal edildiğini belirtmişlerdir. Bükümden sonra mukavemetin geliştirilmesi gereken bir diğer önemli parametre olduğunu, ayrıca iplik üretim hızı üzerine de çalışma yapılması gerektiğini; örneğin üretim hızı 0,32-5 m/dk aralığında olan mevcut çalışmalar bulunduğunu ve bunun artırılmasına yönelik çalışmalar gerektiğini belirtmişlerdir.

Sonuç olarak bir süreci kontrol etmek için etkileyen parametreleri değiştirerek elektrospining yöntemiyle, farklı çaplarda, farklı lif yüzey gözenekliliğinde, boncuklu ve boncuksuz nanolifler üretilir. Uygulamaya bağlı olarak, farklı morfoloji ve yapılar sahip lifler, spesifik parametreler ve sistemler kullanılarak üretilir. Üretilen nanolif ağının türü farklı sistemler kullanılarak da değiştirilebilir. Hem oryante edilmiş hem de rastgele liften yapılmış boru şeklindeki iskele ve iplikler üretilir. Spesifik desenler halinde düzenlenmiş nanoliften yapılan yapılar da Elektro lif çekimi ile üretilir. Tüm bunlar elektrik alanının manipülasyonu ve farklı tipte toplayıcıların kullanılmasıyla da mümkündür. Elektro lif çekimi

hakkında daha fazla bilgi sahibi olduğunda, Elektro lif çekimi jet ve bunun sonucu olan liflerin davranışı üzerinde daha fazla kontrole sahip olunacaktır (McgillUniversity, 2015).

1.4. Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları

Tekstil endüstrisi bugün nanoteknolojinin en büyük müşterileri arasındadır. Tekstil endüstrisinde; akıllı, dayanıklı, çok işlevli tekstillere müşteri talebi giderek artmaktadır. Nanoteknoloji bazlı yeni ve geliştirilmiş özellikteki tekstiller yeni fırsatlar yaratarak; medikal, sivil, spor, savunma, enerji, elektronik, otomotiv vb. gibi farklı uygulama alanlarında kullanılma potansiyeli göstermektedir (Joshi ve Adak, 2019). Nanoteknoloji, doğal ve sentetik liflerin avantajlı özelliklerini kombine ederek, gelişmiş kumaşların üretilebilmesini sağlamaktadır. Üstün dayanıklılık, yumuşaklık, yırtılma mukavemeti, aşınma direnci, dayanıklı baskı ve kırışıklık direnci gibi gelişmiş kumaş özelliklerini elde etmede etkisi olmaktadır (Patra ve Gouda, 2013). Ayrıca leke tutmaz, su ve yağ geçirmez, antistatik özellikli, geliştirilmiş boyanabilir, güç tutuşur, buruşmaz, nem yönetimli, koku önleyici, anti-mikrobiyal, UV koruyucu, kir itici vb. kumaşların üretiminde çok farklı fonksiyonel özellikleri ortaya çıkarabilmektedir (Yanılmaz ve Karakaş, 2011).

Nanoteknolojinin tekstil endüstrisinde uygulanması, kumaşların dayanıklılığını, rahatlığını, hijyen özelliklerini arttırmanın yanı sıra üretim maliyetlerini de düşürmektedir. Ayrıca ekonomi, enerji tasarrufu, çevre dostu olma, maddelerin kontrollü salınımı, ambalajlama, ayırma ve depolama açısından geleneksel işlemlere kıyasla birçok avantaj sunmaktadır (Patra ve Gouda, 2013).

Nanolifler, geleneksel mikrofiberlere kıyasla, yüksek porozite, lifler arası küçük gözenek boyutları, yüksek gaz geçirgenliği ve en önemlisi birim kütle başına geniş bir yüzey alanı gibi özelliklerle üretilir. Nanolif üretmek için rutin olarak üretilebilen polimerler polivinil alkol (PVA), poliakrilonitril (PAN), polivinil klorür, polivinilidenflorür ve polianilindir (Qin, 2007; Neghlani, Rafizadeh ve Taromi, 2011).

Öte yandan, poliakrilonitril (PAN) lifleri arzu edilen bir kimyasal dirence, termal stabiliteye, düşük yanıcılığa ve iyi mekanik özelliklere sahiptir; ayrıca PAN, Elektro lif çekimi yoluyla nanofiber yapmak için sıradan, ucuz bir ticari ürün olarak kullanılabilir. Yüksek verimli malzemeleri, yüksek adsorpsiyon kapasitesi, hızlı adsorpsiyon dengesi, yüksek geri dönüşüm oranı ve düşük maliyeti sayesinde PAN fiberleri boya, metal iyonları ve

diğer şeylerin uzaklaştırılması ve geri kazanılması için kullanılır (Kompalanonwat ve Supaphol, 2011) .

Patel (2019) yaptığı çalışmada elektrospinnig yöntemiyle PAN polimerinden nanolifler hazırlamıştır. Nanolif yüzeyine çinkooksit ve gümüş tutturarak kompozit nanolif membran oluşturmuşlardır (PAN/ZnO-Ag). Oluşturulan fonksiyonelleştirilmiş membranın antibakteriyel aktivitesi nanolif yüzeylerden yüksektir. Çalışma sonucunda kompozit nanolif membranın, gelişmiş antibakteriyel özellikler sayesinde tekstil, su filtrasyonu ve membran uygulamalarında kullanılmak için umut verici bir aday olduğunu belirtmişlerdir.

Elektro lif çekimi, yaygın olarak 50-500 nm aralığında inceliğe sahip lifler içeren bir yüzey üretim şeklidir ve bu yöntemle elde edilen yüzeyler; yüksek performanslı filtreler, hidrofilyk tekstiller, lif destekli kompozitler, yara sargıları için biyomedikal tekstiller, doku iskelesi, nano ve mikro elektrik gereçler, elektromanyetik koruma, fotovoltaikler ve nanolif esaslı yüksek performanslı elektrotlar gibi çok farklı uygulama alanlarına sahiptir (Haghi, 2012; Smit vd., 2007; Kenry ve Lim, 2017). Aşağıda Şekil 1.12.'den nanolif üretim yöntemleri ve kullanım alanları görülmektedir.



Şekil 1.12. Nanolif üretim yöntemleri ve uygulama alanları (Kenry, 2017)

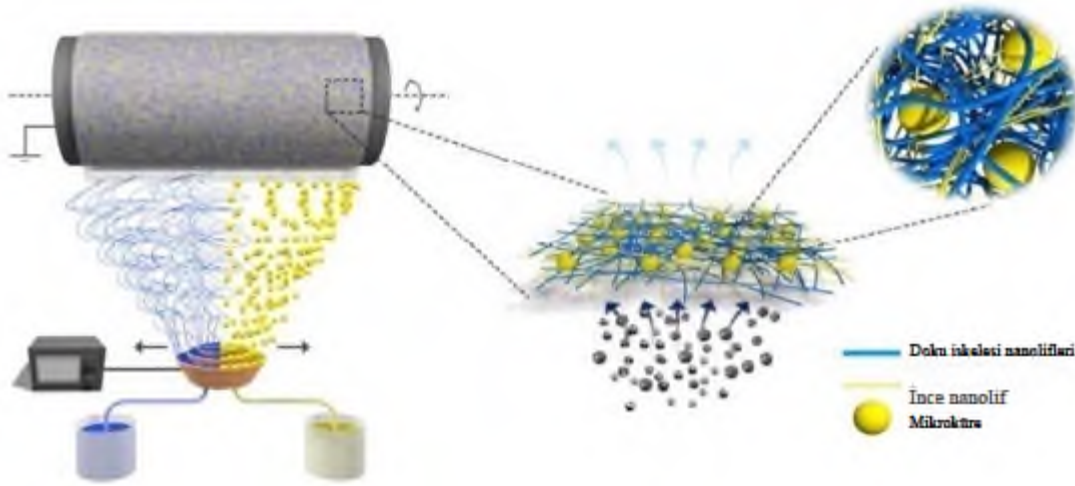
Nanoliflerin yüzey halinde üretilebiliyor olması, kullanım alanlarını sınırlamaktadır. Eğer kesintisiz uzunlukta iplik eğrilebilirse nanolif iplikler yeni fırsatlar sunacak ve farklı kullanım alanları bulacaktır.

- Kompozit

Kompozitler, farklı fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenden yapılan iyi bilinen büyüleyici malzemelerdir. Bileşenler birleştirildiğinde, kompozitler, tek başına her bir bileşeninkinden daha iyi özelliklere sahiptir (Shaohua, Zhang, Liu ve Xiaohong, 2018).

Nanolifler yüksek yüzey-hacim oranına sahip olduklarından matris malzeme ile aralarındaki etkileşim makro boyuttaki liflere göre daha fazladır. Nanolif takviyeli kompozitler yüksek elastiklik modülüne ve mukavemet/ağırlık oranı gibi özelliklere sahiptirler.

Gao, Yang, Akampumuza, Hou, Zhang ve Qin(2017) düşük hava filtrasyonu için yeni bir strateji önermiştir direnç nanofibro kompozit membran üçlü oluşan iskele nanolifleri, mikroküreler ve ince yapı nanoliflerden yüksek gözenekli üç boyutlu kompozit membranı, tek adımlı çok jetsiz olarak kontrollü yüzey üretme tekniği ile elektrospinning yöntemi kullanarak üretmişlerdir. Çalışmada kullandıkları tekniğin ve üretilen kompozitmembranın geleneksel iğneli Elektro lif çekimine kıyasla 120 kat daha hızlı olduğunu bu sayede endüstriyel ölçekte uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 1.13.'te kompozit membran üretim şematığı görülmektedir.



Şekil 1.13.Elektro lif çekimi yoluyla üretilen PAN üç boyutlu kompozit membran üretimini gösteren şematik (Gao, Yang, Akampumuza, Hou, Zhang ve Qin, 2017)

Elektrospun naylon, PAN, PI, karbon, selüloz, PLA, PCL, seramik nanolifleri kullanmanın yanı sıra takviyeler, bazı özel elektrospun nanolifler de kompozit üretmek için takviye olarak kullanılmıştır (Shaohua vd., 2018).

- Filtrasyon

Filtrasyonda gözenek genişliğini en küçük boyutta tutularak en yüksek filtrasyon verimliliğini sağlamak amaçlanmaktadır. Dolayısıyla çok sayıda partikülün etkin şekilde uzaklaştırılması için olabildiğince ince lif ve küçük gözenek içeren yüzeylere ihtiyaç vardır. Lif inceliği, filtre verimliliği ile yakından ilişkilidir ve filtre performansını belirleyen en önemli özelliktir. Bu özelliklerinden dolayı nanoliflerin en yaygın kullanıldığı alanlardan biri filtrasyondur. Filtrasyon uygulamalarında nanolifli yapıların diğer materyallere göre en büyük avantajları, içerdiği ultra ince lif yapıları ve çok küçük boyutlardaki gözenekler, spesifik yüzey alanı, bunlara bağlı olarak yüksek filtrasyon verimliliği ve düşük hava direncidir (Lipol ve Rahman, 2015; Kozanoğlu, 2006). Nanolifli membranlar, hava, su, kan gibi akışkanlardan çok küçük partiküllerin filtre edilmesine olanak sağlamaktadırlar (Kozanoğlu, 2006).

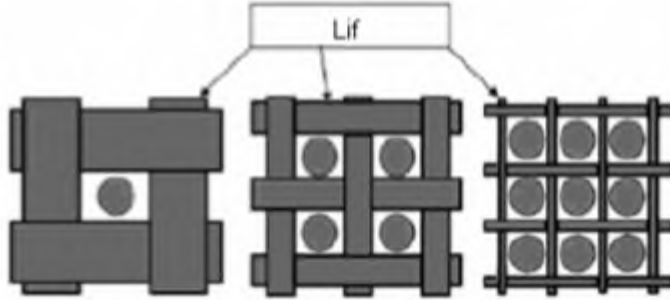
Nanoliflerden elde edilen kumaşlar 100 mm'den daha küçük partikülleri veya damlacıkları sıvıdan ve gazdan uzaklaştırabilmektedir. Bu da nanoliflerin filtrasyon amacı ile kullanımına olanak sağlamaktadır. Nanolif ile hava filtreleme, ticari hava filtreleme işleminden daha ucuz olduğu kadar daha etkilidir. Ayrıca, nanolifler sıvı filtreleme ve akustik yalıtım için kullanılabilir (Lipol ve Rahman, 2015).

Biana ve arkadaşları (2018) Elektro lif çekimi yöntemiyle naylondan elde edilen nanoweberin hava filtrasyonunda kullanımıyla ilgili bir çalışma yapmışlardır. Her bir nanofiber filtredeki basınç düşüşünü ölçerek tahmin etmek için bir model geliştirmişlerdir. Çalışmada basınç düşüşünün yüzey hızı ve filtre kalınlığı ile orantılı olduğunu belirtmişlerdir.

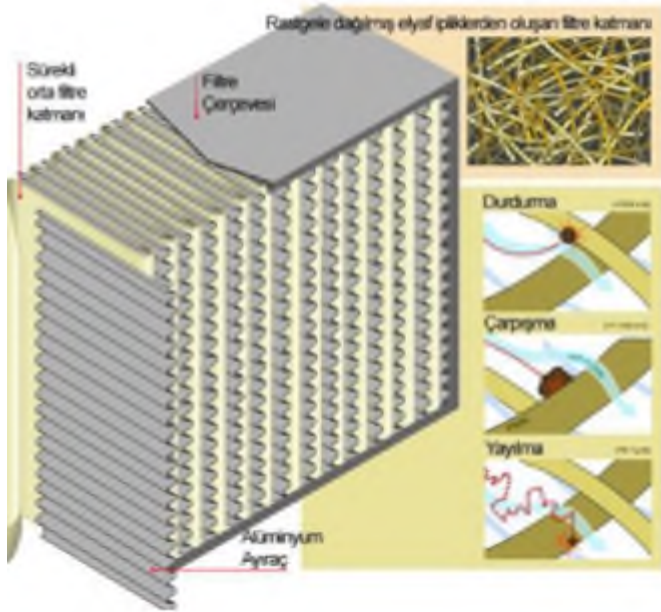
Subramanian ve arkadaşları (2014) yaptıkları çalışmada nanofiber filtrelerin tek başına veya geleneksel filtrelerle birlikte kullanılarak havadaki uçucu organik bileşiklerin (volatile organic compounds), nanopartiküllerin ve bakteriyel kontaminasyonların giderilmesi için yeteneğini değerlendirmişlerdir. Cam elyaf ve kömür bazlı filtrelerin kullanımı, fonksiyonel nanofiber bazlı filtreler veya fonksiyonel nanofiber kombinasyonları ile değiştirilebileceğini belirtmiştir.

Başka bir çalışmada Mukai ve Mizuno (2014) Poliakrilonitril'den (PAN) yapılmış nanolif membran, fonksiyonelleştirilmiş membranın temel malzemesi olarak kullanılmıştır. Sezyum ile kirlenmiş sudan sezyumun uzaklaştırılması için etkili bir yöntem oluşturulması amacıyla, birim kütle başına sezyum adsorpsiyon kapasitesi, geniş bir spesifik yüzey alanına sahip nanofiberlerin sezyum adsorpsiyonu için yüksek bir seçiciliğe sahip demir ferrosiyanit ile membranın birleştirilmesiyle hazırlanmıştır. Optimum koşulları araştırmışlardır. Sonuç

olarak, daha fazla demir ferrosiyanür içeren fonksiyonelleştirilmiş membranın hazırlanabileceği belirtmişlerdir. Şekil 1.14.'te Lif çapının filtre verimliliği ile ilişkisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.14. Lif çapının filtre verimliliği ile ilişkisi (Mukai ve Mizuno, 2014)



Şekil 1.15 Hepa filtre şematik (Mukai ve Mizuno, 2014)

Şekil 15'te Hepa filtre şematik olarak görülmektedir ve kirliliğin önem arz ettiği yerlerde nanolif teknolojisi kullanılmaktadır.

- Biyomedikal uygulamaları

İnsan vücudunda bulunan doku ve organlar nanometre düzeyinde lifli yapılardır. Bundan dolayı, nanofiber araştırmaları biyo-mühendislik alanına yönelmiştir. Gümüş iyonlarının ve gümüş kristallerinin anti-bakteriyel özelliği olduğundan, deri yanıklarında

kullanılmaktadır. Gümüş metali kararlı olduğundan ve insan derisi ile tepkimeye girmedikten dolayı medikal alanda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat eğer yara sargısı içerisinde nem oluşursa veya yara kanamaya başlarsa, gümüş iyonları serbest kalacak ve yararlı deri hücrelerine de zarar vermeye başlayacaktır.

Khil, Cha, Kim ve Bhattarai (2003) çalışmalarında Elektro lif çekimi yöntemiyle poliüretan membran hazırlamışlardır. Poliüretan membranın yara sargısı olarak performansını değerlendirmişlerdir. Bu membranların kontrollü su kaybı sağlayarak yani buharlaşarak, oksijen geçirgenliği ve sıvı drenaj kabiliyetiyle yara örtüleri olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Park (2010), Elektro lif çekimi prensibine dayalı olarak, koaksiyel elektro lif çekimi yöntemini kullanarak laboratuvar çalışmaları yapmışlardır. Çalışmalarında Polietilen glikol (PEG)/poliviniliden florür (PVDF) çekirdek/kabuk polimerlerinden sürekli çift katmanlı nanolifler üretmek için iki koaksiyel kapilerden oluşan bir düzenek kullanmışlardır. PEG polimeri çekirdeği; PVDF nanolifleri ise kabuğu oluşturmaktadır. Oluşturdukları nanolif kompozit yüzeylerin faz değişimli malzeme olarak antibakteriyel hijyen uygulamalarında kullanımını inceleyen bir çalışma sunmuşlardır.

- Doku mühendisliği uygulamaları

Elektro lif çekimi yöntemi ile elde edilen nanoliflerden yüksek gözenekliliğe sahip örülmemiş matrisler elde etmek mümkündür. Kemik dokusunda gözenekliliğin %80-90 seviyelerinde olması gerekmektedir. İnsan hücreleri çok küçük çaplarda lif şeklinde yerleşebilirler ve bu açıdan nanofibrilli yapılarla benzerlik göstermektedirler. Bu biyolojik uyumlu üç boyutlu yapılar hücrelerin tohumlanması, büyümesi ve migrasyonu için ideal olmakla beraber, hücre büyümesi için biyomatris kompozitlerinde çeşitli dokuların onarımı ve yer değiştirmesinde kullanılmaktadır.

Son yıllarda nanoteknoloji alanındaki gelişmelerle birlikte, doku mühendisliğinde kullanılan doku iskeleleri gibi bazı materyallerin nano yapıda sentezlenerek kullanılması ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Farklı yöntemlerle hazırlanan bu iskelelerde hücrelerin tutunması ve çoğalması kolaylaşmaktadır. Bu tip rejeneratif tedavilerin en önemli basamaklarından biri de dezenfeksiyondur. Bu amaçla günümüzde çeşitli antibiyotik patları ya da kalsiyum hidroksit patı kullanılmaktadır. Bu amaçla kullanılan patların dezavantajlarını azaltabilmek ya da tamamen ortadan kaldırmak amacıyla antibiyotik içerikli nano iskele ya da

nano-kapsüllenmiş jel şeklindeki materyallerin kullanımı ile ilgili çalışmalar devam etmektedir. Nanoboyutta materyaller kullanılarak endodontide doku mühendisliği alanında bir çok yeni çalışma yapılmaktadır. Bu materyallerin oldukça küçük boyutları ile kazandığı üstün özellikler, rejeneratif tedavilerde umut vaat etmektedir (Tülü ve Kaya, 2020). Li, Laurencin, Caterson, Tuan ve Ko (2002), Elektro lif çekimi ile elde ettikleri PLGA iskelesinin, sahip olduğu hücre adezyonunu ve büyümesini arttıran benzersiz yapısı nedeniyle doku mühendisliğinde kullanılabileceğini bildirmişlerdir. Bottino vd. (2013) çalışmalarında antibiyotik içerikli iskelelerin rejenerasyona olan etkisini değerlendirmişlerdir. Rejeneratif endodontide antibiyotik içerikli elektrospon iskele kullanımının biyolojik olarak güvenli antimikrobiyal ilaç taşıma sistemi olabileceği göstermişlerdir.

- Elektriksel ve optik uygulamalar

İletken nanoliflerden oluşan membranlar, elektrokimyasal reaksiyonların hızı elektrotun yüzey alanı ile orantılı olduğundan dolayı, yüksek performanslı pilleri geliştirmek için gözenekli, elektrot olarak kullanıma uygundur. Aynı zamanda iletken nanoliflerden oluşan membranlar elektrostatik yayılım, korozyon koruması, elektromanyetik engelleme gibi çeşitli kullanım alanları da bulunmaktadır. Enerji dönüşüm verimliliği ve fotokatalitik aktivite TiO_2 nanofiber tabanlı fotoelektrotun önemli ölçüde özgül yüzey alanını artırarak ve geliştirerek iyileştirildi (Li, Wang ve Xie, 2014). Benzer bir çalışmayı Lee vd. (2014) yapmıştır. TiO_2 nanopartikül ve nanoliflerden oluşan çift katmanlı olmak üzere; TiO_2 nanoliflerini katman olarak kullanarak görünür ışığın emilimini arttırmışlardır. Bu sayede verimlilik %33 artmıştır.

- Savunma sanayisi uygulamaları

Askeri uygulamalarda kullanılan koruyucu giysilerden, kişiyi hayatta tutabilecek maksimum seviyede koruyucu, nükleer- kimyasal- biyolojik saldırılara karşı dayanıklı olması beklenir. Nanoliflerden yapılmış kumaşlar geniş yüzey alanlarına sahip olmaları sayesinde, kimyasal maddenin nötralizasyonunu gerçekleştirebildiği gibi su buharı ve hava geçişine de izin verir. Yüksek gözenekli ama gözenek boyutu çok küçük yapısından dolayı kimyasal maddesinin kumaş içerisinde nüfuz etmesine karşın çok iyi bir bariyer oluşturur.

- Uzay uygulamaları

Çeliğin çok ağır olması, aynı mukavemette ve daha hafif bir malzemenin arayışını başlatmıştır. Karbon tabanlı nanofiberler çelikten kat ve kat yüksek mukavemete sahiptirler ve düşük ağırlıklarından dolayı uzay çalışmalarında yoğun bir şekilde kullanılmaktadırlar.

- Piller ve yakıt hücreleri

Enerji depolama teknolojilerinden biri olan lityum iyon piller (LiB'ler) birçok alanda uygulama bulmuştur. Bununla birlikte, yaygın LiB'lerin özellikle büyük ölçekli enerji depolama cihazlarında kullanımı hal sınırlı kapasite ve verimlilik gibi çeşitli faktörler tarafından engellenir. Anot ve katot malzemelerinin cinsi, düşük elektrokimyasal elektrotların performansı ve yüksek malzeme maliyetleri bu sebepler arasındadır. Nanolifler potansiyel elektrot malzemeleri olarak araştırılmıştır. Piller ve yakıt hücreleri gibi enerji üretim cihazları nedeniyle geniş özgül yüzey alanlarına ve yüksek gözenekliliklerine elektrolitleri depolamak ve hızlı ve uzun süre desteklemek için elektron/iyon taşınması terimi kullanılabilir. Son birkaç yıldır oldukça gözenekli nanofiber ağlar sentezlenmiştir.

Lin vd. (2019) yaptıkları çalışmada elektrospinlenmiş PAN/PI membran üretmişlerdir ve ticari poliolefin membranlarla karşılaştırıldığında lityum-iyon pil ayırıcılar için umut verici olduğunu bildirmişlerdir.

- Diğer uygulamalar

Bitkilerin üzeri nanofiberler ile kaplanarak zararlı kimyasallar ve böceklere karşı koruma sağlanabilmektedir. Aynı zamanda sera etkisi oluşturarak UV ışınlarından da koruyabilmektedir.

Su kirliliğinin giderilmesi için adsorbsiyon yöntemi iyileştirme özellikleri sayesinde tercih edilmektedir. Organik boyalar, ağır metaller ve endüstrinin gelişmesiyle ortaya çıkan çevre sorunları için yüksek oranda absorban malzemeler imal etme ihtiyacı ortaya çıkmıştır (Wang vd., 2015).

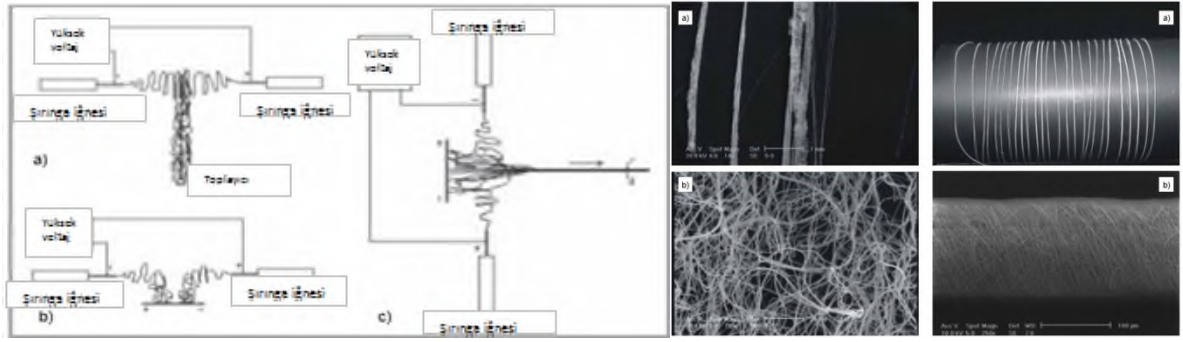
Xue, Wu, Dai ve Xia (2020) yaptıkları çalışmada PAN polimerinden ve TiO_2 'den (PAN / TiO_2 / PANI) Elektro lif çekimi yöntemini kullanarak yüksek seçici adsorbsiyon ve fotokatalitik rejenerasyon özelliklerinde membran hazırlamışlardır. Adsorbsiyondan sonra membran geri kazanılabilir özellikte olması sebebiyle çevre dostudur.

1.5. Nanolif İplik Elde Etmeye Yönelik Çalışmalar

Literatürde elektro lif çekimiyle nanolif içeren yüzeylerin üretimi ve bu yüzeylerin üretim yöntemleri üzerine çok miktarda araştırma bulunmakla birlikte, nanoliflerden iplik eğirmeye yönelik çalışmalar sınırlıdır. Bu sınırlı çalışmalarda Elektro lif çekimi yönteminin en çok kullanılan yöntem olması göze çarpmaktadır. Araştırma konularının yüzey üretme yönteminden daha çok nanolif oluşum süreci ve bu sürece çok etki eden parametrelere yönelik olduğu dikkat çekmektedir.

Smit, Büttner ve Sanderson (2007) yaptıkları çalışmada Elektro lif çekimi sırasında lif yönünün kontrol edilmesinin önemi ve bununla ilgili temel ilkeler, kısa veya sürekli olmayan iplikler elde etmek için Elektro lif çekimi sırasında lif oryantasyonunu kontrol etme ilkelerinin bazılarının nasıl uygulandığı, elektrospining yöntemi kullanılarak üretilecek liflerden sürekli iplikler elde etmek için alınan farklı yaklaşımlar tartışılmaktadır. Elektro lif çekimi ile elde edilen nanolifipliklerle ilgili açık literatürün çoğunun, elde edilen ipliklerden ziyade iplik oluşumu sürecine odaklanmakta olduğuna dikkat çekmişlerdir. Bu süreç çok önemli olsa da, araştırmacılar nihayetinde sonuçlarının amaçlanan son kullanıcısının elyaf ve tekstil endüstrisi olacağını akılda tutması gerektiğini belirtmişlerdir. Bunu göz önünde bulundurarak, gelecekteki araştırmalar elde edilen ipliklerin özelliklerine daha fazla dikkat etmeli ve mukavemet, elastikiyet ve doğrusal yoğunluk değerlerine odaklanarak bunlar hakkında daha fazla rapor vermesini önermişlerdir (Smit, Büttner, Sanderson, 2007).

Dabirian ve Ravandi (2009) Yaptıkları çalışmada nanolif üretimi için yeni bir metot kullanmışlardır. Bu metotta iki farklı besleyici nozül ve havada hareket ederek iplik üretimi sağlayan kollektör vardır. Solüsyon hazırlığı %13,5 konsantrasyonda PAN/DMF karışımı 70°C'de 2 saat karıştırılarak yapılmıştır. Yanısıra 3300 t/m üzeri büküme sahip ipliklerin üretildiği belirtilmiştir. Üretim hızı 5,76 m/sa'tir. Şekil 1.16.'da çalışmada kullanılan düzenek ve üretilen nanolif görüntüleri görülmektedir.



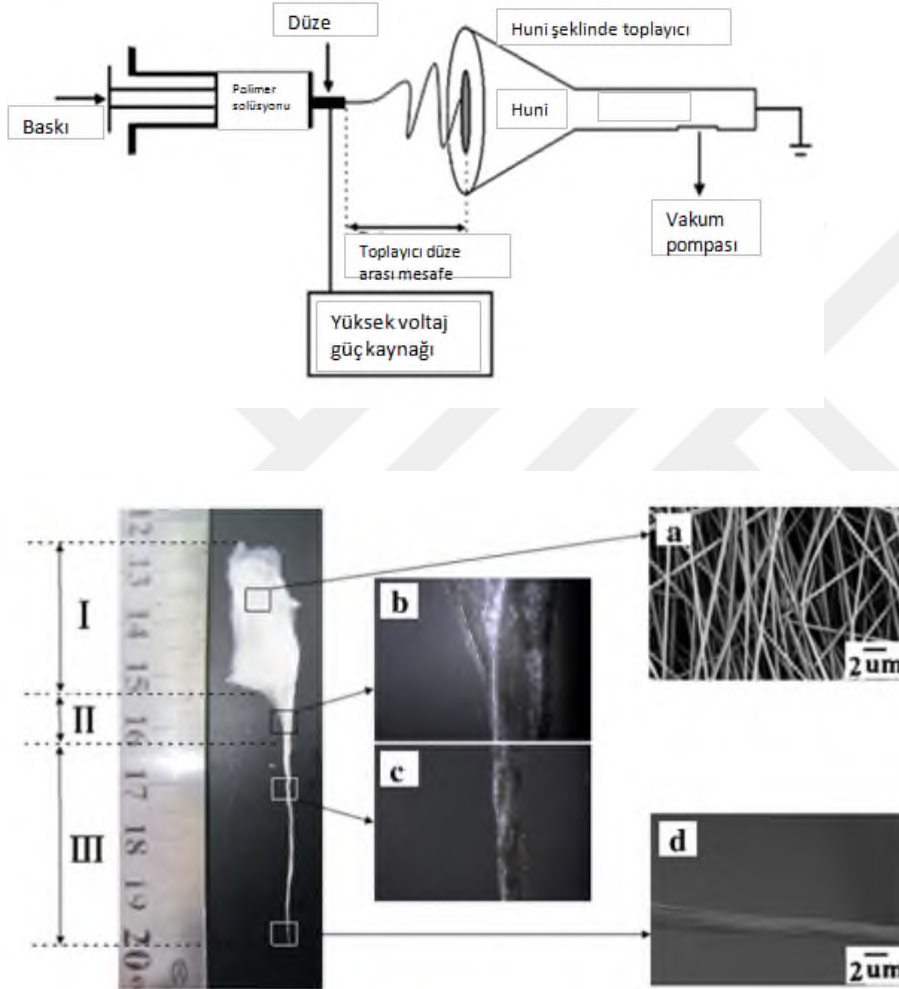
Şekil 1.16. Elektro lif çekimi kurulumunun şematik diyagramı ve nanolif iplik oluşumu ve görüntüleri (Dabirian ve Ravandi, 2009)

Bir başka çalışmada Fennesseyve Farris (2004) nanolifleri demetler halinde elde ederek büküm makinasında büküm vermişlerdir. Yaptıkları çalışmada %10 konsantrasyonda PAN/DMF kullanmışlardır. Gerilim 8-16 kV'tur. Nanolif iplik oluşumu 2-32 cm aralığında nanolif demetler birleştirilerek artından büküm makinesinde büküm verilerek iki aşamada gerçekleştirilmiştir.

Dabirian, Ravandi, Sanatgar ve Hiestroza (2011) yaptıkları çalışmada iplik üretimi için polimer olarak 100.000 (g/mol) molekül sahip ticari PAN polimer tozu, çözücü olarak Dimetilformamid (Merck Company) kullanmışlardır. Kütlece %13 PAN/DMF karışımı oda sıcaklığında 70° C'de çözündürülerek ve sabit bir hızda 2 saat karıştırılmasıyla çözelti hazırlanmıştır. Çalışmada iki zıt yüklü metalik spinneret sistemi kullanılarak ısı işlem görmüş bükümlü nanolif ipliklerin üretilmesi için modifiye edilmiş bir yöntemin geliştirilmesi sunulmuştur. Spinneretler karşılıklı yerleştirilmiştir. Elektrik alanının ortasında nötr dairesel bir plaka yerleştirilmiştir. Bu dairesel plaka büküm görevi görmektedir. Bu yöntem daha düzgün, daha iyi bükülmüş poliakrilonitril (PAN) ipliklerin üretimine izin verir. Bu sistemin yeniliği, nanolif ipliklerin yerinde ısı işlemine izin verir.

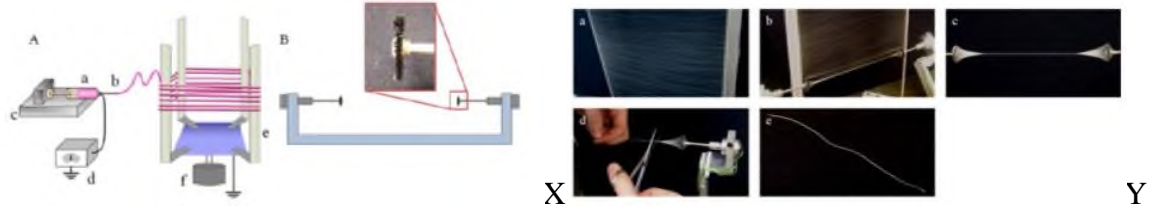
Yapılan çalışmalarda karbon liflerinin üretimi için öncü polimerin poliakrilonitril (PAN) olması dikkat çekmektedir. Yapılan bir çalışmada, elektrospinlenmiş PAN nanolifler, yüksek sıcaklıklarda stabilize edilerek ve karbonize edilerek karbon fibere dönüştürülmüştür. Daha yüksek karbon içeriği sayesinde yüksek mukavemetli malzemeler elde edilmiştir. PAN polimeri ağırlıkça %68 karbon içerir ve ısı işleminden sonra karbon içeriği ağırlıkça yaklaşık %92'ye yükseldiği belirtilmiştir. Bu çalışmanın amacı, ısı işlem için elektrospun PAN nanolifleri (PAN türevi karbon fiberler) imal etmektir (Beese ve Papkov, 2013; Nataraj vd. 2012).

Li vd. (2012), çalışmalarında özel bir kollektör kullanmıştır. Kullandıkları kollektör, huni ve vakum pompası olmak üzere 2 kısımdan oluşmaktadır. Sistemlerindeki huni içinde bulunan hava emişinin bu sistemi diğer sistemlerden farklı kıldığını belirtmişlerdir. Yanı sıra çalışmada PAN polimerine LiCl katkısının iplik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Solüsyonda konsantrasyon %12 PAN/DMF ve %0,06 LiCl'dir. Sistemde iplik oluşumu Şekil 1.17'de görülmektedir.



Şekil 1.17. Elektro lif çekimi sistemi ve elde edilen nanolifler (Li vd., 2012)

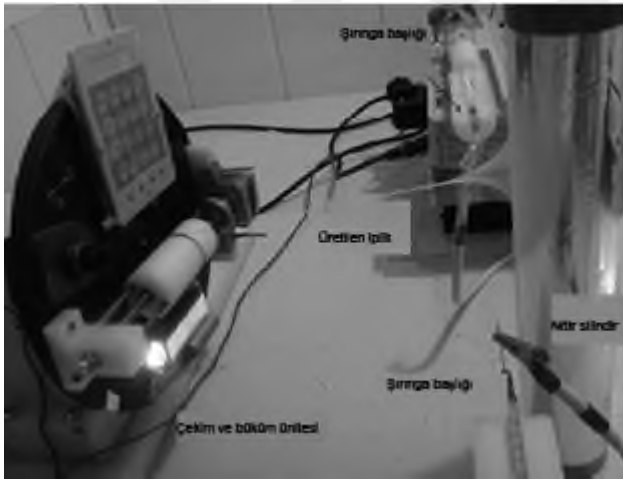
Tsai (2013)'nin yaptığı çalışmada geleneksel elektrospinning düzeneği değiştirilerek iplik oluşumu için el yapımı bir cihaz geliştirilmiştir. Elyafı toplamak ve bükümlü iplik haline getirmek için özel bir büküm cihazı tasarlanmıştır. Bu büküm cihazı, eş eksenli olarak monte edilen ve iki minyatür DC motora bağlı iki dairesel tel fırçadan oluşmaktadır. Yönlendirilmiş lifler, Şekil 1.18'de gösterildiği gibi alüminyum dört çubukla döner disk üzerinde toplanmıştır.



Şekil 1.18. (A) Modifiye edilmiş Elektro lif çekimi kurulumunun şematik diyagramı ve nanolif üretimi (Tsai, 2013)

Fırçalar, nanolifleri önceden belirlenmiş miktarda bükerek bir iplik oluşturmaktadır (Şekil 1.18-Y). Bu yöntemi kullanarak farklı malzemelerden iplikler oluşturulmuştur. Akış hızı, polimer konsantrasyonu, iğne ve kolektör arasındaki mesafe gibi Elektro lif çekimi parametreleri, Elektro lif çekimi süresi ve bir ipliğe uygulanan büküm miktarı kontrol edilerek yoğun bükümlü veya daha az yoğun bükümlü bir nanolif iplik oluşturabilmektedir.

Memarian ve Mohammadi (2013) TiO_2 nanolif iplik elde edilmiştir. Çalışmada polimer ve çözücü tiplerinin lif özelliklerine etkisi araştırılarak, lif ve iplik inceliklerinin polimer konsantrasyonu ile orantılı olarak arttığı ifade edilmiştir.

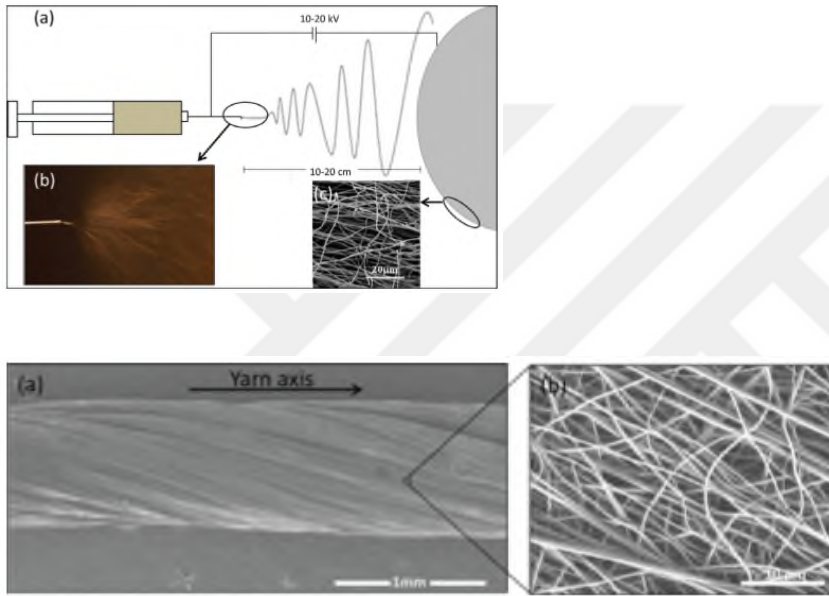


Şekil 1.19. TiO_2 toplanması için ayarlanmış Elektro lif çekimi düzeneği (Memarian vd., 2013)

Poly (vinylpyrrolidone), Polivinil asetat ve Nylon 66 polimerleri kullanılmıştır. Ayrıca farklı çözücülerin TiO_2 nanolif iplik üretimine etkisi, kalsinasyon etkisi araştırılmıştır. Şekil 1.19'da TiO_2 toplanması için ayarlanmış Elektro lif çekimi düzeneği görülmektedir. TiO_2 'in katalizör olarak üstün özellikleriyle bilindiği, sensör, foto katalizör ve güneş pillerinde

kullanımı olmakla birlikte son on yılda Elektro lif çekimi gibi geniş bir uygulama alanı olduğu vurgulanmıştır.

Chawla ve Naraghi (2013) tarafından sunulan çalışmada Solüsyon hazırlığında %9 konsantrasyonda PAN/DMF karışımı kullanılmıştır. PAN şeritlerinden 1300 t/m'lik yüksek bükümlere kadar değişen büküm seviyelerindenanolif iplikler elde edilmiştir. Gerilim 16 kV ve kollektör şırınga arası mesafe 20 cm'dir. PAN şeritler 50 cm uzunluğunda olup 60-1300 t/m arası büküm verilmiştir. Elde edilen PAN nanolif iplikler daha sonraki adımda karbonlaştırılmıştır.



Şekil 1.20. Elektro lif çekimi düzenneği ve SEM görüntüleri (Chawla vd., 2013)

Şekil 1.20'de kullanılan Elektro lif çekimi düzenneği, lif ve iplik görüntüleri görülmektedir. Çalışmada sürekli iplik üretimi olmayıp, şerit formundaki nanolif yüzeyler motorlu bir mil kullanılıp büküm verilerek ipliğe dönüştürülmüştür.

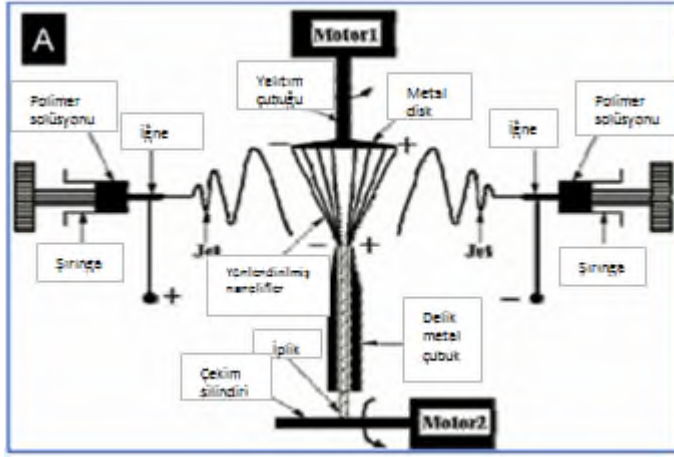
Metwally, El-Sayed, Radwan, Hamouda ve El-Sheikh (2018) yaptıkları çalışmada Elektro lif çekimi parametrelerini (polimer konsantrasyonu, uygulanan voltaj ve toplayıcı mesafesi) incelemişlerdir. Polimer olarak Poliamid kullanmışlardır ve elde edilen PA nano yüzeylerini çeşitli koşullarda (konsantrasyon, sıcaklık ve katalizör konsantrasyonu) sitrik asit ile modifiye etmişlerdir. Araştırmanın temel amacı Elektro lif çekimi tekniğinin kimyasal modifikasyonun yanı sıra poliamid nanoliflere dayanan düşük maliyetli adsorban üretimidir.

1.6. Nanolif İpliklerden Kumaş Üretmeye Yönelik Çalışmalar

Nanolifler ağırlıklı olarak filtrasyon, pil ayırıcı, ilaç dağıtımı, yara sargısı, dokumasız kumaş şeklinde doku mühendisliği için kullanılmaktadır. Ancak ticari nanofiber iplik eğirme sistemleri henüz mevcut olmadığı için dokuma veya örme kumaş şeklinde kullanılamamaktadır. Nanolif ipliklerin endüstriyel ölçekte kullanımı için örme veya dokuma kabiliyetlerinin araştırılması gerekmektedir. Ancak bu konudaki literatür çok sınırlıdır. Nanoliflerin geleneksel tekstillerde kullanılabilirliğinin araştırılabilmesi için: sürekli nanolif iplik üretimi, üretim verimliliği ve üretilen ipliklerin mukavemet dayanımlarının iyileştirilmesi ile ilgili çalışmalar yapılması gerekmektedir.

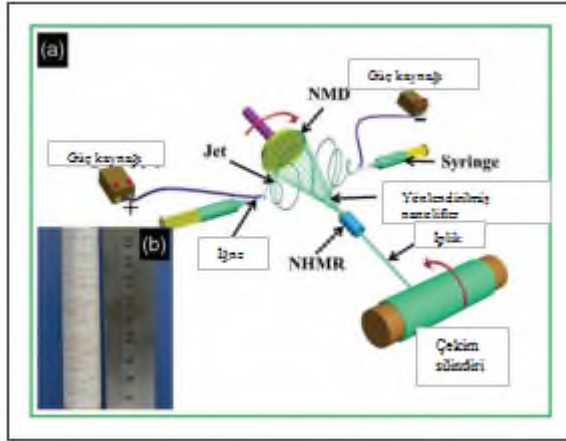
Ravandi ve Torkı (2015) yaptıkları çalışmada hammadde olarak poliakrilonitril (PAN), çözücü olarak Dimetilformamid (DMF) kullanarak, %14 konsantrasyonda polimer çözeltisi hazırlamışlardır. Elektro lif çekimi tekniği kullanarak lineer yoğunluğu 19 tex olan nanolif iplik üretmeyi başarmışlardır ve üretilen nanolif iplikleri dokuma kumaşa dönüştürmeyi amaçlamışlardır. Bu iplikler dokuma tezgahında kumaş oluşturmak için yeterli uzunlukta olmadığından elde 15 atk/cm, 15 tel/cm sıklıkta dokunan kumaş elde etmişlerdir. Bu çalışmada sunulan yöntem ve uygun polimerler kullanılarak özellikle biyopolimerler uygulanarak, uyarlanmış fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik özelliklere sahip sürekli nanolif ipliği üretmenin mümkün olacağını belirtmişlerdir.

Wu vd. (2013), Yaptıkları çalışmada oryante edilmiş poliakrilonitril (PAN) nanofiber iplikler, modifiye edilmiş bir Elektro lif çekimi yöntemiyle sürekli olarak üretilmiştir. Oluşturdukları düzenek Şekil 1.21.'de görülmektedir. Konsantrasyon %10-12-14 olarak solüsyon hazırlayarak nanolif iplikler üretmişlerdir. Gerilim 6-13 kV arasında olup voltaj arttıkça iplik kalınlığının arttığını belirtmişlerdir. Daha yüksek voltajlarda liflerde saçılma gözlemlenmiştir. Besleme miktarı 0,5-1,3 mL/sa'tir. Elde edilen nanolifiplik çapları 52-105 µm ve mukavemetleri 8,5-7,6-9,1 cN/tex olarak belirtilmiştir.



Şekil 1.21. Elektro lif çekimi düzeneği (Wu vd., 2013)

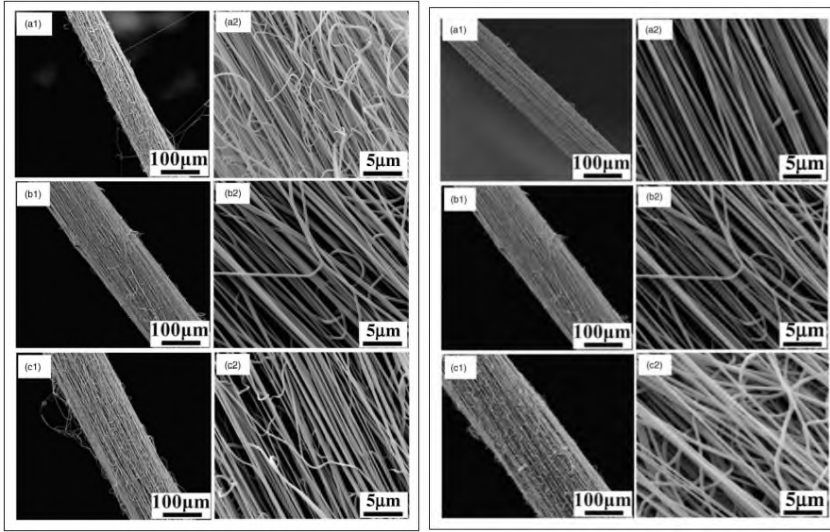
Wu vd. (2016) Yaptıkları çalışmada PAN polimerini DMF çözücüsünde %10 konsantrasyonda 80 °C’de manyetik karıştırıcıyla karıştırarak hazırladıkları solüsyondan nanolif iplikler üretmişlerdir. Çalışmada kullanılan Elektro lif çekimi düzeneği Şekil 1.22.’de görülmektedir.



Şekil 1.22. Elektro lif çekimi düzeneği (Wu vd., 2016)

Uyguladıkları gerilimler 6-13 kV arasındadır. Besleme miktarı 0,5-1,2 mL/sa olup 0,5 mL’nin altında besleme oranında lif oluşumunun yetersiz olduğu ve sabit eğirme üçgeninin oluşmadığı 1,3 mL’nin üzerinde ise damlacıkların eğirme alanına ulaştığı gözlenmiştir. İğne mesafesi 10-25 cm olup, 10 cm’de hafif yapışkan nanolif iplikler elde edildiği belirtilmiştir. Kollektör dönüşü 100, 250, 750 ve 1250 devir/dk olup yüksek dönüş hızlarında lif oryantasyonu daha düşüktür. İplik üretim hızı 2 m/dk olup, lif oryantasyonundaki artışın iplik

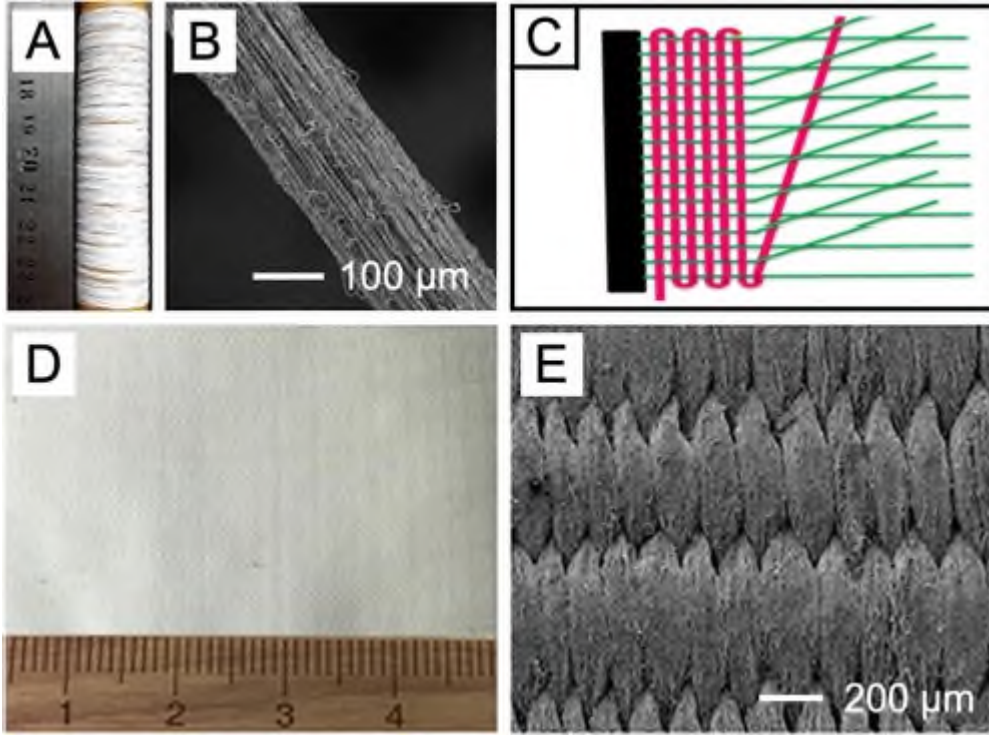
gerilme mukavemetinde bir iyileşme sağladığı bulunmuştur. Nanoliflerin oryantasyonu iki iğne arasındaki mesafeye ve kolektörün dönme hızına bağlıdır. İğneler arası mesafe arttıkça, nanoliforyantasyonu artmıştır. Çalışmada üretilen nanolif görüntüleri Şekil 1.23.'te görülmektedir.



Şekil 1.23. Farklı voltajlarda ve farklı besleme oranında üretilen PAN nanolif iplikler (Wu vd., 2016)

Çalışmalarında PAN nanolifiplikleri örme desen, dokuma desen ve atkılı örme deseni olmak üzere 3 ana tekstil üretim prosesi üretiminde kullanılmak suretiyle geleneksel tekstilin güncellenmesi için ilgi çekici bir yol sağlamakta olduğuna dikkat çekmişlerdir.

Xue (2019) yayınladıkları derlemede Elektro lif çekimi yöntemini ve yöntemdeki gelişmeleri ve uygulama alanları hakkında kapsamlı bir çalışma sunmuşlardır.



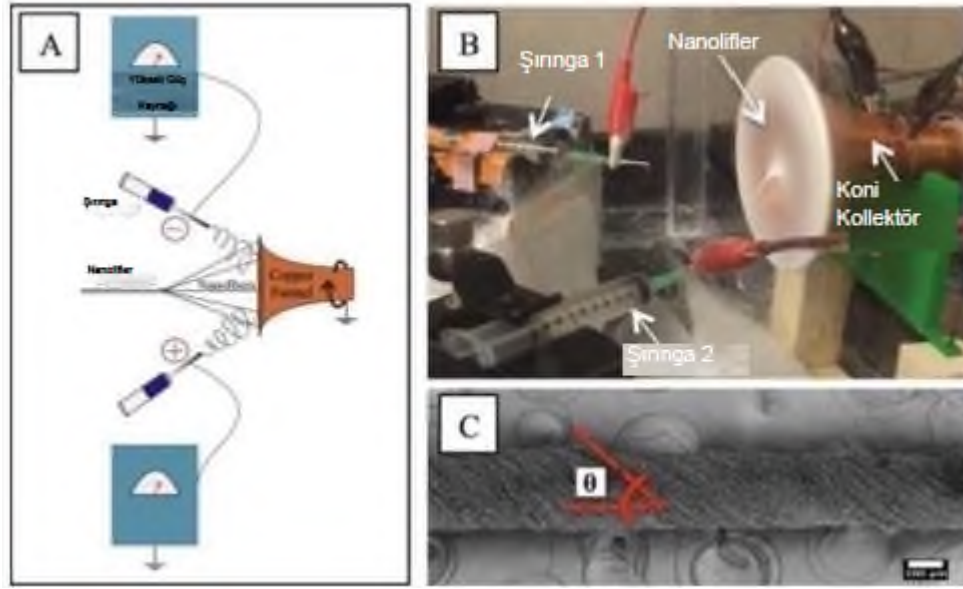
Şekil 1.24. PCL nanofiberin fotoğrafı (B) SEM görüntüsü iplik (C) Tekstil dokuma işleminin şeması (D) Kumaş fotoğrafı ve (E) PCL'den yapılmış düz dokuma kumaşın SEM görüntüsü nanolif iplikler (atkı olarak yüksek dokuma yoğunluğuna sahip) ve çoklu PLA filamentleri (çözücü olarak düşük dokuma yoğunluğuna sahip) (Xue ,Wu, Dai ve Xia, 2019).

Doku dejenerasyonunda tek eksenli olarak hizalanmış nanoliflerden oluşan çeşitli 2D ve 3D matların tendon ve bağ doku mühendisliğinde kullanımı dikkat çekmektedir. Şekil 1.24'te görülen kumaş, doku iskelesinde kullanılmak üzere üretilmiştir. Kumaşın 3D hizalanmış bir görüntü göstermekte olduğunu ve genişletilmiş gözenek boyutu ve geliştirilmiş çekme mekanik özellikleri, tendonun yenilenmesini teşvik ettiğini belirtmişlerdir. Dokuma kumaş, PCL ile düz dokuma ile imal edilmiştir. Atkı olarak nanofiber iplikler ve çözgü olarak mekanik özellikleri olarak çoklu PLA filamentleri kullanılmıştır.

Baura (2015) yaptıkları tez çalışmasında, hizalanmış bir Elektro lif çekimi kurulumu geliştirmişlerdir. Kollektör olarak dönen dairesel bir disk kullanmışlardır. Kollektörün bir başka özelliği de kenarlarının bakırdan iç yüzeyinin plastikten olmasıdır. Böylelikle iç yüzeyinde lif oluşumunu engellemişlerdir. PAN polimeri ve DMF çözücüsünden %5-30 arası konsantrasyonlarda solüsyon hazırlamışlardır. Hazırlanan solüsyon için dikey şırınga kullanılarak beslemişlerdir. Hacimsel yük yoğunluğu ile nanolif üretiminin ilişkili olduğunu yüksek debilerin yüksek çap; yüksek voltajın yüksek üretim oranı sağlayabileceğini belirtmişlerdir. Çalışmalarında nanoliflerden paralel lif demetleri elde etmişlerdir.

Ali, Yaqiong, Xungai ve Tong (2012) nanoliflerin kullanıldığı modifiye bir Elektro lif çekimi düzeneği oluşturmuşlardır. Kollektör olarak döner bir huni toplayıcı kullanılarak nanoliflerden iplikler eğrilmiş, bükülmüş ve bir iplik sarma sistemi kullanılarak sarılmıştır. İplik üretim hızı maksimum 5 m/dk'dır. İplik büküm seviyesi ve lif oryantasyonu kollektör dönüşüyle kontrol edilebilmektedir. Kollektör hızı arttığında büküm açısının arttığı, lif ve iplik çaplarının ise azaldığı belirtilmiştir. Kollektör dönüşü 7400 d/dk'ya kadar çıkarılmıştır. Çalışmalarında kullandıkları sistemde PAN polimeri ile iplik üretilmeyi denemişlerdir fakat başarısız olduklarından çalışmaya PVDF-HPF polimeri ile devam edildiği belirtilmiştir. Çalışmada ayarlanan yüksek gerilimin iplik oluşumuna etkisi 9 kV'nin altına indiğinde yetersiz lif oluşumu; 21 kV'nin üzerinde lifler havada uçtuğundan kolektöre ulaşamadığı şeklinde belirtilmiştir. Yanısıra iğne-toplayıcı arası mesafe elektrik alanının yoğunluğunu etkilediğini paylaşmışlardır.

Levitt vd. (2017) çalışmalarında bakır malzemeden huni şeklinde kollektör kullanmışlar ve çift enjektörlü modifiye edilmiş bir Elektro lif çekimi sistemi oluşturmuşlardır. Farklı 3 polimerden nanolif iplik oluşturmuşlardır. PAN/DMF çözeltisi %15 konsantrasyonda, PVDF-TrFe çözeltisi %65/35 konsantrasyonda, PCL solüsyonu %10 konsantrasyonda üretilmiştir. Ürettikleri tüm nanolif iplikler için 500, 700, 900 ve 1100 rpm kollektör dönüşünün iplik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Araştırmaları sonucunda PAN nanoliflerin gözenekliliğinin PCL nanoliflerden daha yüksek olduğunu bu nedenle, nanolif iplikler için gözeneklilik, iplik büküm açısından daha çok (kollektör dönüşü) polimer türünden büyük ölçüde etkilendiğini belirtmişlerdir. Nanolif çapı ve nanolif iplik bükümünü kullandıkları huni şeklindeki kollektörün dönüş hızını değiştirerek ayarlanabileceğini belirtmişlerdir. Kollektör dönüş hızı arttırıldığında PAN ve PCL ortalama lif çaplarında azalma gözlenmekte olup, PVDF-TrFe lif çapında ise artma görüldüğü belirtilmiştir. Sonuç olarak PCL nanolif iplikler en yüksek büküm açısına sahiptir. Her üç polimerde de kollektör dönüş hızına bağlı olarak iplik yüzey büküm açıları artmıştır. Şekil 1.25'te nanolif üretim düzeneği görülmektedir.

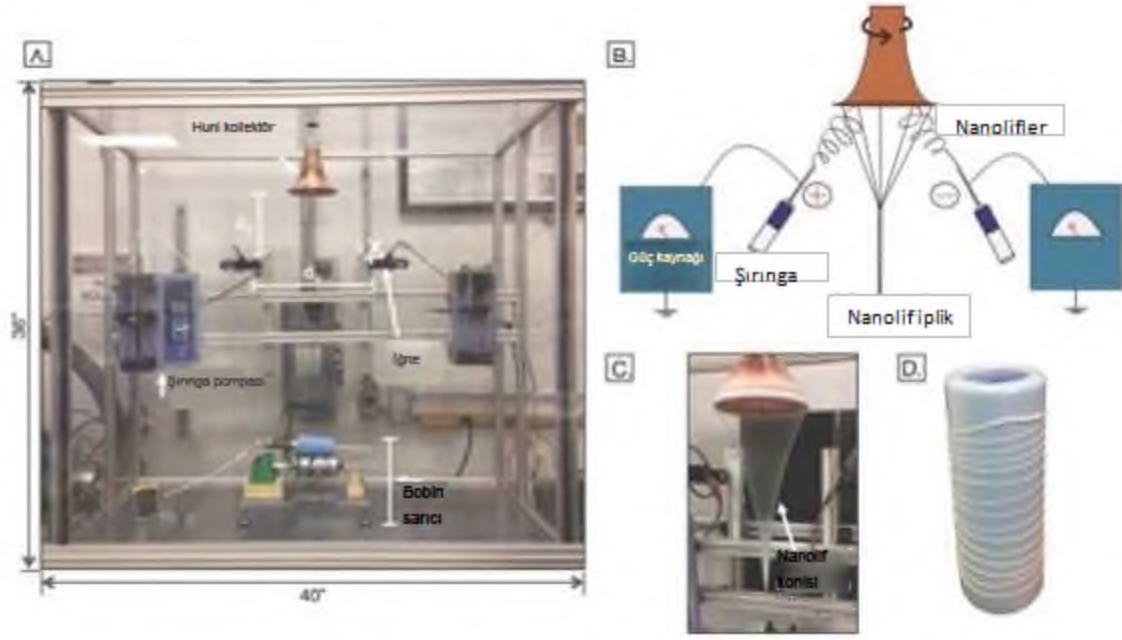


Şekil 1.25. Çalışmalarında kullanılan nanolif üretimi şematığı ve düzeneği (Levitt vd., 2017)

Çalışmalarında nanofiber ipliklerin gözenekliliğini büküm açısının bir fonksiyonu olarak incelemiştir ve PAN nanolif ipliklerin PCL ipliklerinden daha fazla gözenekli olduğunu göstermiştir.

Bosworth, Turner ve Cartmell (2013) tarafından sunulan başka bir çalışmada, nanoliflerden oluşan şerit daha sonra 50 mm uzunluğunda kesilerek ve saf suya batırılarak nanolif ipliklerin elde edildiği belirtilmiştir. Şeritlere manuel olarak büküm verilerek yaklaşık 200 μm çapında ipliklerin elde edildiği ifade edilmiştir. Çalışmada elde edilen ipliğin kök hücre çoğalmasını sağladığı ifade edilmiştir.

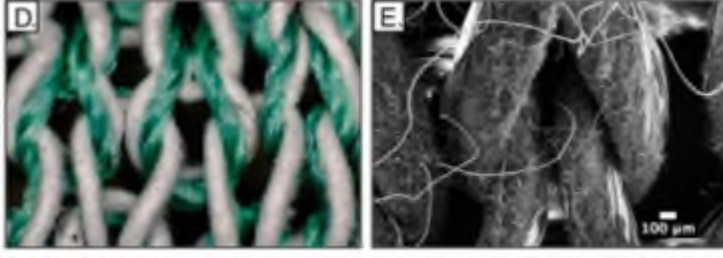
Levitt, Vallet, Dion ve Schauer (2018), PAN/DMF % 10, 12, 15 konsantrasyonlarda 70° C'de homojen hale gelene kadar karıştırılarak hazırlanmıştır. Çözelti viskoziteleri %10 ve %15 konsantrasyon için sırasıyla 480,75-1998,7 cP'a kadar yükselmiştir. Şekil 1.26.'da çalışmada kullanılan nanolif iplik üretim düzeneği görülmektedir.



Şekil 1.26. Çalışmada kullanılan elektro lif çekimi düzeneği şematik görünümü ve nanolif iplik (Levitt vd., 2018)

Çalışmada PAN nonwovenlar ve nanolif iplikler çeşitli polimer konsantrasyonlarından, Elektro lif çekimi parametrelerinde üretilmiştir. Elektro lif çekimi parametreleri (uygulanan voltaj ve mesafe), kolayca eğilemeyen solüsyonlardan iplikler üretmek için ince ayarlanabilse de, polimer konsantrasyonunun nanolif iplik oluşumu üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır. Nanolif iplik üretmek için optimum polimer konsantrasyonu %12 olarak belirtmişlerdir. En ince nanolif çapları ve en uzun iplikler 8 cm dikey mesafede ve 20 kV gerilim ayarında elde edilmiştir. Nanolifler %10 polimer konsantrasyonunda üretilebiliyor olmasına karşın Elektro lif çekimi parametreleri daha sınırlıdır. Sonuç olarak nanolif iplik üretimi için nano yüzey üretimine kıyasla daha yüksek voltajlara ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmanın eğrilmiş nanolif iplik üretimi için diğer polimerler üzerinde uygulanabilir bir sistem olduğunu belirtmişlerdir.

Nanolif iplikler Seiki örgü makinesinde örülmüştür. Şekil 1.27’de örgü kumaş görüntüsü görülmektedir.



Şekil 1.27. Yeşil iplik: ipek, beyaz iplik: PAN nanolif iplik E Örne kumaşın SEM görüntüsü (Levitt vd., 2018)

PAN nanolif ipliklerinendüstriyel ölçekli örme için dayanma kabiliyetini araştırmak için bir çalışma yapmışlardır.

Literatürde nanolif ipliklerden kumaş oluşturma denemeleri bir kılavuz iplik yardımıyla veya el ile dokuma yapılarak gerçekleştirildiği dikkat çekmektedir. Bunun sebebi nanolif ipliklerin sürekli üretilmemesi ve makine üzerinde kumaş oluşturmak için yeterli mukavemete sahip olmaması sebebiyle kopuşlardır. Yanı sıra nanoliflerin spesifik yüzey alanı özellikleri birçok avantaj sağlamasına karşın makine üzerinde mekanik sürtünmenin artması sebebiyle çok sık kopuşları sebep olmasındır. Bu çalışma PAN nanolif ipliğinden literatürdeki ilk makede örme kumaş örneğini sunmaktadır.

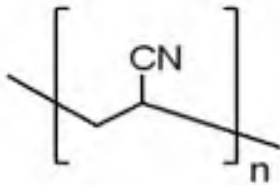
2. MATERYAL METOT

Bu çalışmada, PAN nanoliflerden eğrilmiş ipliklerin (nanolif iplik) örgüde kullanım olasılığının araştırılması amaçlanmıştır. Nanolif iplik, bu amaç için tasarlanan ve geliştirilen PLC kontrollü bir iplik makinası kullanılarak Elektro lif çekimi yöntemi ile eğrilmiştir. Bu nanolif iplik, kopma mukavemeti ve uzaması bakımından geleneksel akrilik ipliği ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, her iki iplik türünün kapilariteleri ve boyama performansı incelenmiştir. Daha sonra, laboratuvar tipi bir yuvarlak örgü makinesinde hem geleneksel hem de nanolif iplikler kullanılarak kumaş örnekleri örülmüştür. Nanolif iplikten örme makinesinde örülmüş kumaş örneği iplik ve kumaş gerginliği optimize edilerek ilk kez başarıyla elde edilmiştir. Ardından, kumaş numuneleri yani geleneksel ve nanolif ipliklerden örülmüş kumaşları bir nanoweb ile birleştirerek hava geçirgenliği ve aerosol filtrasyon performansları açısından test edilmiştir.

2.1. Nanolif İplik Üretiminde Kullanılan Polimer Çözeltilsinin Hazırlanması

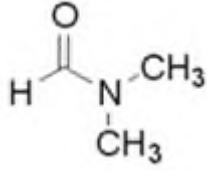
- *PAN polimeri özellikleri*

Kullanılan saf PAN polimeri ise Sigma-Aldrich Chemistry (Amerika) firmasından alınmıştır. Molekül ağırlığı 150.000 g/mol'dür. Kimyasal formülü aşağıda Şekil 2.1.'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. PAN'nın kimyasal formülü (www.sigmaaldrich.com, 2020)

Çözücü olarak ise N,N-Dimetilformamid (Emparta) kullanılmıştır. N, N-Dimetilformamid (DMF) Elektro lif çekimi işleminde en çok kullanılan solventler arasındadır. DMF, bitki dokularından gelen klorofil, reaktif inorganik sentez, bir indirgeyici ajan, dehidrasyon maddesi, katalizör ve benzerleri gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır (www.sigmaaldrich.com, 2020). Şekil 2.1'de kimyasal formülü gösterilmiştir.



2.2. N,N-dimetilformamid`in kimyasal formülü (Seventekin, 2006)

Polimerlerin molekül ağırlıkları 5000-10000`in altında ise, bunların genellikle mekanik dayanımları yoktur. Molekül ağırlığı arttıkça, polimerlerin mekanik dayanımları da yükselmektedir. Özellikle tekstil sanayisinde lif olarak kullanılacak polimerlerin belirli bir kopma mukavemetine sahip olması istenir (Seventekin, 2006).

Komonomer içeren liflerin kopma dayanımları, saf PAC-liflerine (%100 Akrilonitrilden oluşan = homopolimer) nazaran daha düşük çıkmaktadır (Tablo 2.1). Buna göre:

Çizelge 2.1. Poliakrilonitril kopma dayanımları (Seventekin, 2011)

	Kopma Dayanımı (cN/dtex)	Kopma Uzama (%)
Normal lifler (Kopolimer)	2,3- 3,1	20-48
Saf (homopolimer) lifler	3,4-4,6	30-34

Poliakrilonitril liflerinin yoğunlukları 1,14-1,19 g/cm³ civarındadır.

Ticari nem oranları %0,5`tir.

Yaş kopma dayanımları kuru kopma dayanımlarına nazaran %10-15 daha düşüktür (Seventekin, 2011).

• *Solüsyon Hazırlanması*

PAN/DMF çözeltisi %10 oranında manyetik karıştırıcı ile 25-70 °C`de 150 dk. sürekli olarak karıştırılarak elde edilmiştir. Solüsyon hazırlanmasında Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan 0,0001g hassasiyete sahip Precisa marka hassas terazi kullanılmıştır. Şekil 2.3`te çalışmada kullanılan PAN

polimeri ve DMF görülmektedir. Çalışmada kullanılan hassas terazi Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

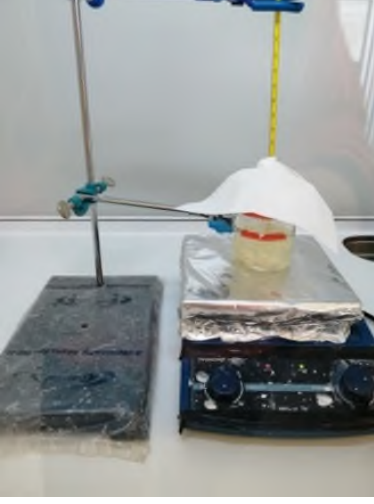


Şekil 2.3. Çalışmada kullanılan polimer ve çözücü



Şekil 2.4. Çalışmada kullanılan hassas terazi

Çalışmada kullanılan WiseStir markasına ait manyetik karıştırıcı Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5. Solüsyon hazırlama

Nanolif iplikler üretilmeden önce çözeltinin viskozitesi Brookfield LVDV-IP viskometre cihazıyla, elektrik iletkenliği WTW Handheld meterCond330i cihazıyla (Şekil 2.6.) ölçülmüştür. Hazırlanan solüsyonun viskozitesi S63 numaralı spindle ile 50 d/dk'da %33 tork değerinde, 791,8 cP ve iletkenliği 120 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ölçülmüştür.



Şekil 2.6. Çalışmada kullanılan iletkenlikve viskozite ölçüm cihazları

2.2. Elektro Lif Çekimi Makinesi Çalışma Parametreleri

Çalışmada kullanılan elektrolif çekim sistemi makinesi Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Elektro lif çekimi makinesi

Nanolif üretimi için kullanılan Elektro lif çekimi makinesi, 3 ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlar, solüsyonun elektrik çekim alanına beslenmesini sağlayan besleme sistemi, çekim ünitesi ve yüksek güç kaynağıdır.

Polimer besleme sistemi 2 kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar besleme pompası, PE boru ve iğnenin (18 gauge) oluşmaktadır. Makine üzerinde çift ekranlı kontrol paneli bulunmakta olup 1. panelde iplik sarım hızı, besleme miktarı ve kollektör dönüş hızı; 2. panelde şırınga kollektör arası mesafe, kılavuz kollektör arası mesafe sarım silindiri kollektör arası mesafe ve iğne açıları ayarlanabilmektedir.

Makinede lif ve iplik eldesi için elektro lif çekim yönteminin ana bileşeni olarak yüksek voltaj güç kaynağı olarak Fraser marka doğru akım güç kaynağı (DC) yer almakta olup, 30 kV kapasiteye sahiptir.

Makinede bulunan güç kaynağının da kontrol paneli bulunmakta olup akım ve voltaj ayarlanabilmektedir. Çalışma boyunca yüksek voltaj güç kaynağında voltaj değeri 15 kV ve akım değeri 0.30 mA ayarlanmıştır. Voltaj güç kaynağından çıkan pozitif elektrot vasıtasıyla polimer çözeltisine uygulanmıştır.

Kullanılan alüminyum kollektör huni şeklinde olup; 3 mm kalınlığında ve 110 mm çapındadır.

Elektrik alan lif çekim sistemi (electrospinning) yöntemiyle nanoliflerden iplik eğirme yöntemiyle kollektör devir hızı 450 rpm, besleme miktarı 1 ml/sa, şırınga kollektör arası mesafe 14 cm, kılavuz kollektör arası mesafe 23 cm, sarım silindiri kollektör arası mesafe 43 cm ve enjektör açıları 30° parametreleri (Tablo 2.2) sabit tutularak iplik üretimi gerçekleştirilmiştir. İplik üretimi esnasında ortam sıcaklığı 25-26° C’de ve izafi rutubet (bağıl nem) %40-45’tir.

Çizelge 2.2 Elektro lif çekimi makinesi çalışma parametreleri

Kollektör Malzemesi	Kollektör Kalınlığı (mm)	Kollektör Devir Hızı (rpm)	Besleme Miktarı (ml/sa)	Şırınga Kollektör Arası Mesafe (cm)
Alüminyum	3 mm	450	1	14
Yüksek Gerilim (kV)	Kılavuz Kollektör Arası Mesafe (cm)	Sarım Silindiri Kollektör Arası Mesafe (cm)	Enjektör Açılırları (°)	Sarım Hızı (m/sa)
15	23	43	30	4,5

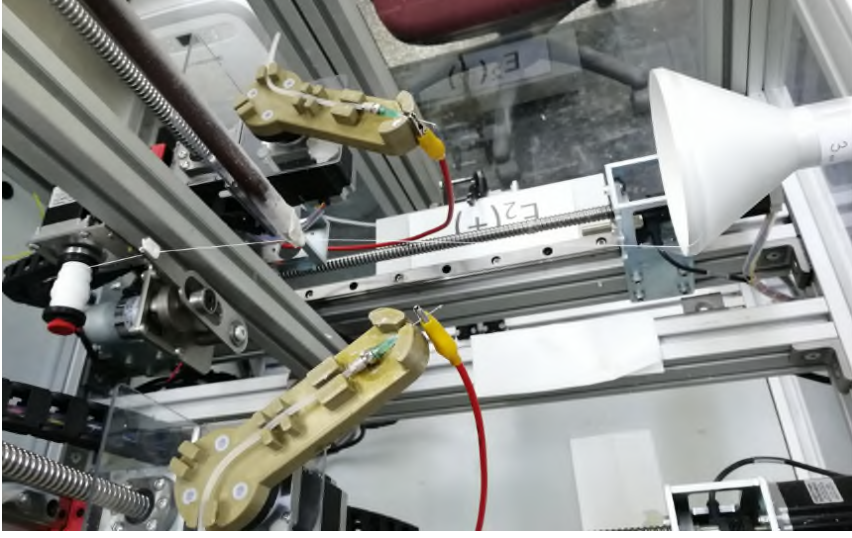
2.3. Nanoweb Yüzey Üzerine Nanolif Yüzey ve Nanolif İplik Üretimi

Nanolif yüzey (Nanoweb) üretimi nanolif iplik üretimi ile aynı koşullarda gerçekleştirilmiştir. Toplayıcı plaka olarak dikdörtgen mukavva üzeri alüminyum folyo ile kaplanmıştır ve enjektörlere 14 cm mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Alüminyum folyo üzerine nonwoven koyularak makine çalıştırılmıştır. Böylelikle 5dk ve 10dk çalışma sürelerinde kompozit yüzeyler elde edilmiştir. Şekil 2.8.’de oluşturulan yüzeyler görülmektedir.



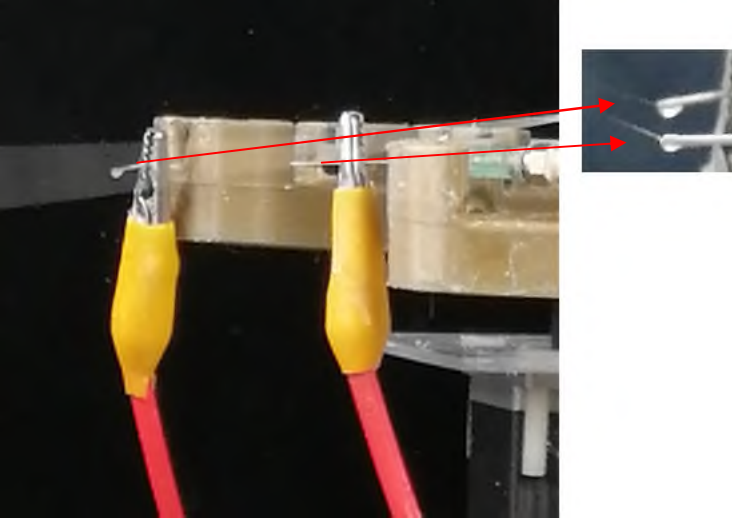
Şekil 2.8. Nanoweb yüzey üretiminde kullanılan kollektör ve nanoweb

Nanolif iplik üretimi kılavuz iplik vasıtasıyla iplik üretimi başlatılmıştır. Tüm iplikler optimum çalışma ayarlarında üretilmiştir. Şekil 2.9’da hiç kopuş olmaksızın 8 saatlik iplik üretimine ait iplik numunesi ve nanolif iplik üretim düzeneği görülmektedir.



Şekil 2.9. Çalışmada kullanılan nanolif iplik üretim düzeneği

Nanolif iplik üretimi esnasında elektro lif çekim jetleri şekilde görülmektedir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Çalışma esnasında elektro lif çekim jetleri

2.4. Yapılan Testler

- *İpliklerin lineer yoğunluğu*

Çalışmada kullanılan ipliklerin lineer yoğunluğu tayininde Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan 0,0001 g hassasiyete sahip Precisa marka hassas terazi kullanılmıştır. İplikler ölçüm öncesi 24 saat iklimik

şartlarda kondüsyonlanmıştır. İplik numaraları için her nano iplikten 10 cm uzunluğunda 5'er numune alınmıştır.

Elektro lif çekimi sisteminde eğrilennanolif ipliğe ait makara Şekil 2.11'de görülmektedir.



Şekil 2.11. Çalışmada kullanılan nanolif iplik

- *İplik Büküm Testi*

Bu çalışmada kullanılan konvansiyonel akrilik iplik Melike Tekstil San. Ve Tic. A.Ş.'den tedarik edilmiştir. İplik lineer yoğunluğu Ne 40'tır. Bu geleneksel ipliğin bükümünün tayininde Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında bulunan Prowhite marka I009 model İplik Büküm Ölçer Cihazı (Şekil 2.12) kullanılmıştır. TS EN ISO 2061 standardına göre ölçüm yapılmıştır. İplik lineer yoğunluğu 15 tex olduğundan ağırlık 7 CN seçilmiştir (Ağırlık = iplik numarası (tex)/2).



Şekil 2.12. Çalışmada kullanılan iplik büküm ölçer

- *Taramalı Elektron Mikroskobu -SEM*

Çalışma sonucunda elde edilen lif ve iplik incelikleri Namık Kemal Üniversitesi Merkez Laboratuvarında FEI marka Quanta FEG 250 model Taramalı Elektron Mikroskobu - SEM- (Şekil 2.13) ile analiz edilmiştir. Çalışmada üretilen ipliklerin her biri için 10 farklı bölgeden görüntü alınmış olup, her bir görüntü üzerinde rastgele 5'er adet ölçüm yapılmış, sonuç olarak her bir numune için toplam 50 adet ölçüm elde edilmiştir. Alınan görüntüler ImageJ programında analiz edilerek nanolif ve nanolif iplik incelikleri belirlenmiştir.



Şekil 2.13. Çalışmada kullanılan SEM cihazı

SEM görüntüleri nanolif iplik çapı için X600 büyütme oranıyla, nanolif çapları için ise X5000 büyütme ile alınmıştır.

- *Mukavemet*

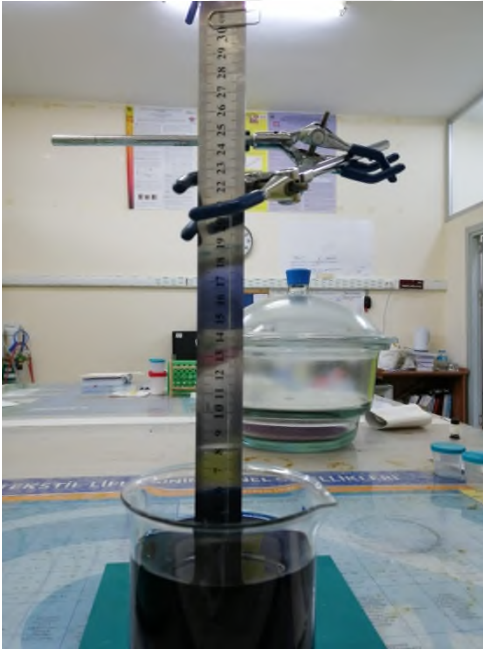
İpliklerin mukavemet ve % kopma uzama değerleri Namık Kemal Üniversitesi Merkez Laboratuvarı'nda bulunan TiniusOlsen H10KS cihazı ile ASTM D 3822-07 test standardına göre olup, çene aralığı 25 mm ve test hızı 20 mm/dk'dır (Şekil 2.14). Her iplik numunesinden 5'er adet ölçüm yapılmıştır. İplik mukavemeti (kg) ve kopma uzaması değerleri (%) birimleriyle ölçülmüştür. Mukavemet testleri öncesinde numuneler 24 saat süreyle standart atmosfer koşullarında kondisyonlanmıştır.

İplik mukavemeti için her nano iplikten 2,54 cm uzunluğunda 5'er numune alınmıştır.



Şekil 2.14. Çalışmada kullanılan mukavemet ölçüm cihazı

- *Kapilarite (Wicking) testi*



Şekil 2.15. Çalışmada kullanılan Wicking düzeneği

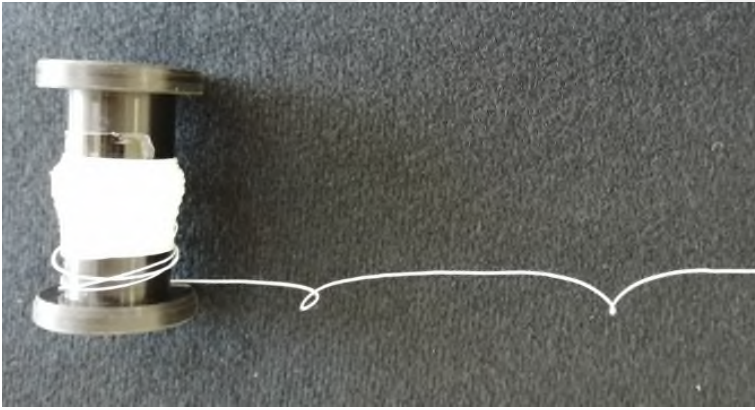
Wicking bir sıvının kendiliğinden taşınmasıdır. Wicking özelliklerini incelemek için birkaç teknik vardır. İlki, kılcal wicking sırasında bir Wilhemy terazisi ile ağırlık değişimi ölçümünden oluşur. İkinci teknik, sıvıya duyarlı ayarlamayı içerir. İplikler boyunca düzenli

olarak sensörler bulunur. Sonucusu renkli bir kapiler akışını gözlemlemek ve ölçmektir. Sıvının yükselişi zamana karşı kaydedilir. Bu çalışmada 3. yöntem kullanılmış olup, wicking testi DIN 53924:1978-11 standardı esas alınarak yapılmıştır. Dikey ıslanma testi için, nanolif iplik ve geleneksel akrilik iplik hazırlanan düzeneğe (Şekil 2.15) sabitlenmiştir. Numunelerin bir uçlarına bir ataş takılarak, içerisine boya damlatılmış saf suya daldırılmıştır. Suyun kumaş üzerinde yükselme miktarı, dakikada bir kez ölçüm alınmak suretiyle 10 dakika boyunca milimetre cinsinden kaydedilmiştir (Zervent, 2010).

2.5. Örme

- *Örme öncesi ipliğe uygulanan işlemler*

Örme öncesinde yaşanacak muhtemel problemler için nanolif ipliklere bazı işlemler uygulanmıştır. Bu çalışmada üretilen nanolif ipliklerde Şekil 2.16'daki gibi büküm canlılığı görülmüştür.



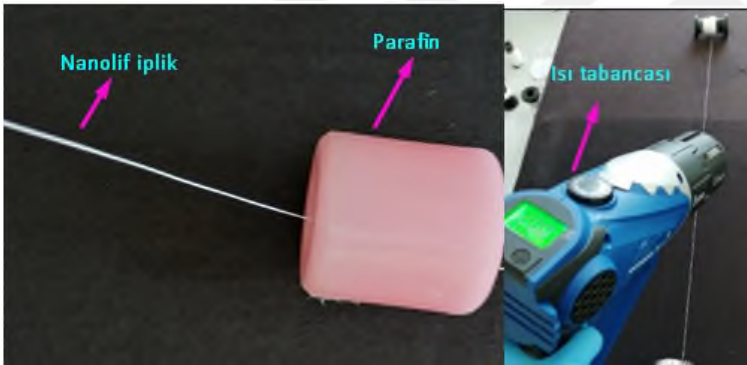
Şekil 2.16. Nanolif iplikte büküm canlılığı

Büküm canlılığı iplikte kıvrımlara neden olmaktadır. Bu kıvrımlar örme işleminde daha fazla problem çıkarır ve buda verimliliği azaltır. Ayrıca nanolif ipliklerin spesifik yüzey alanı özelliğinden dolayı makinedeki mekanik sürtünmeleri geleneksel ipliklere kıyasla çok fazladır.

Ayrıca nanolif ipliklerde büküm geleneksel iplikten **7 kat** fazladır. Büküm arttıkça çapı azalan ipliğin yapısındaki lifler daha da sıkışır ve birbirleriyle olan sürtünmeleri de artar. Böylece, çekme kuvveti etkideğinde kopmaya karşı koyan liflerin sayısı da artmış olur. Büküm miktarı optimum değeri aştığında ise, iplik helisindeki liflerin açısı bir hayli

daralmıştır ve bunun sonucunda lif elastisite modülünün, iplik elastisite modülüne katkısının azalması nedeniyle, iplik dayanım değerinde azalma meydana gelmektedir. Fiziksel olarak bu olgu kısaca şöyle açıklanabilir; özellikle ipliğin dış kısmında kalan liflerin üzerine büküm nedeniyle etkiyen zorlanma, liflerin plastik bölgesini aşmakta ya da başka bir deyişle akma noktasının ötesine geçmektedir ve bu da liflerde kalıcı şekil bozukluğuna neden olmaktadır. Bundan ötürü, liflerin kopma enerjisinde azalma meydana gelmektedir (Lawrence, 2003; Lord, 2003).

İpliğin sürtünme özelliklerini etkileyen en önemli faktör sürtünme katsayısıdır (Karakaya, 1993). İplik sürtünmesini düşürmek için yapılan en yaygın işlem iplik yüzeyini parafin tabakasıyla kaplamaktır. Ayrıca büküm açılmasına ve ipliğin büklümleşmesine karşılık ipliğin dayanımının artırılması için bükümün fikse olması gereklidir. Sonuç olarak büküm canlılığı nedeniyle görülen yüksek torku azaltmak, bükümü fikse etmek, mukavemeti artırmak, sürtünmeyi azaltmak ve statik elektriklenmeyi önlemek amacıyla nanoliflerden üretilen ipliklere parafinleme ve ardından ısı işlem uygulanmıştır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17. Çalışmada nanolif ipliklere uygulanan parafinleme ve ısı işlem

Isıl işlem Ford Tools FX1 100 Sıcak Hava Tabancası ile 200°C olarak uygulanmıştır.

- *Örme işlemi*

Nanoliflerden üretilmiş iplikler ve geleneksel iplikler konvansiyonel yöntemler kullanılarak süprem örme kumaş numuneleri üretilmiştir. Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı ilgili laboratuvarında Şekil 2.18'de gösterilen tek plaka yuvarlak örme makinesi kullanılmıştır.



Şekil 2.18. Çalışmada kullanılan örme makinesi

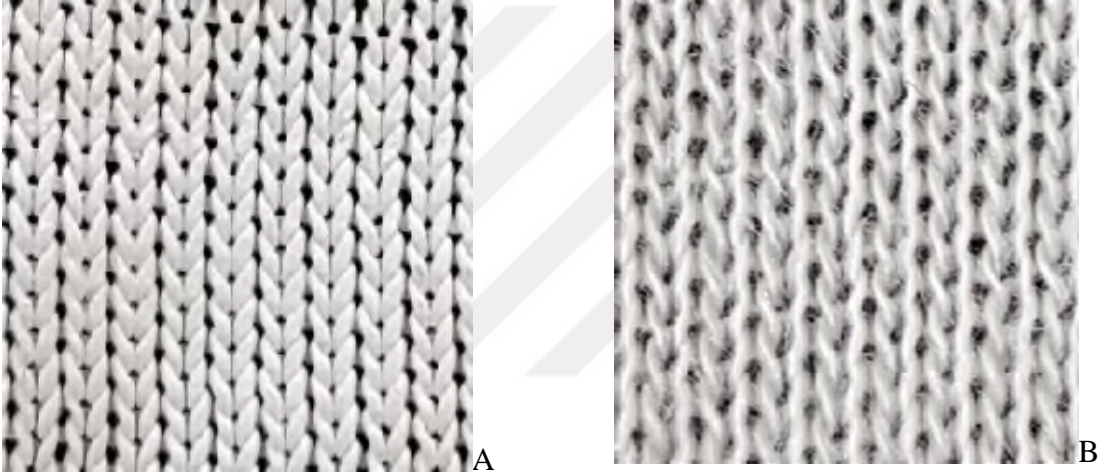
Çalışmada kullanılan örme makinesine ait teknik özellikler aşağıdaki tabloda görülmektedir.

Çizelge 2.3. Örme makinası özelliklerine ait teknik veriler

Marka/Model	IPM/ Faycon CKM 01-S
Üretim yılı	2013
Makine çapı (inç)	3,5
İğne sayısı	198
Makine İnceliği (E)	18
Makinanın hızı (d/dk)	5-350



Şekil 2.20. Nanolif iplikten örülen örgü



Şekil 2.21. Nanolif iplikten örülmüş kumaş (A) ve geleneksel akrilik iplikten örme kumaş (B)

Linear yoğunluğu NE 40/2 olan geleneksel akrilik ipliği kullanılarak örme kumaşlar üretilirken makine 30 rpm; nanolif iplikler kullanılarak örme kumaş üretilirken ise en düşük hız olan 5 rpm hızında çalıştırılmıştır. Şekil 2.20’de örme makinesi üzerinde nanolif iplikten örülen örgü görülmektedir. Oluşturulan kumaşlar Şekil 2.21’de verilmiştir.

Nanolif ipliklerin örülmesi önce manuel yani iğne kovanını el ile çevirerek denenmiş olup; iplik kopuşları ve iplik kopuşlarına bağlı olarak da delikler görülmüştür. Delik ve patlakların oluşmasına sebep olabilecek en önemli faktör iplik sürtünmeleridir (Megep, 2008). Bu problemin önlenmesi için nanolif ipliklere yukarıda örme öncesi işlemlerde bahsedilen parafinleme ve ısıl işlem gibi ard işlemler yapılarak tekrar örme denemesi yapılmıştır.

Yaklaşık 8 cm (76 sıra) kumaş üretilmiştir. Üretim esnasında 9 kez iplik kopuşu gerçekleşmiştir.

2.6. İpliklerin Boyanması

Boyama işlemi Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı ilgili laboratuvarında yapılmıştır.

Geleneksel akrilik ve nanolif iplik önce 100°C'de pH=4,5'te %2 Konsantrasyonunda bazik boyarmadde ile boyanmıştır. Çalışmada kullanılan boyarmadde DyStar Astrazon Blue A-FBLS Şekil 2.22'de görülmektedir.



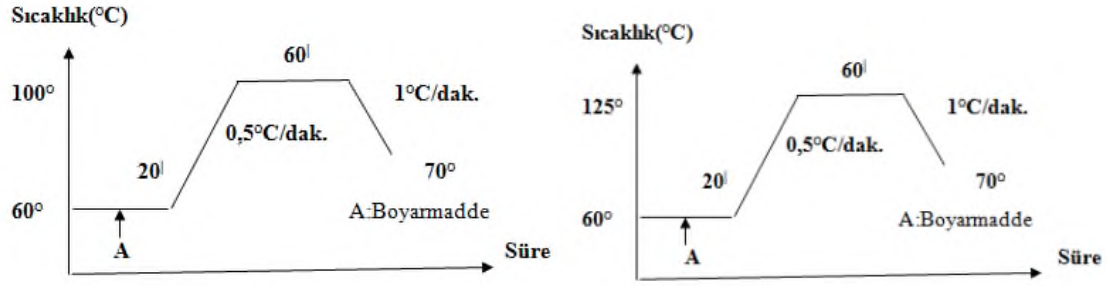
Şekil 2.22. Çalışmada kullanılan boyarmadde

Boyama işlemi HT numune boyama makinesinde yapılmıştır (Şekil 2.23).



Şekil 2.23. Çalışmada kullanılan boyama makinesi

İlk olarak 100 °C'de boyanan iplikler daha sonra camlaşma noktasının etkisini görmek için 125°C'de boyanmıştır. Sıcaklık-süre grafikleri Şekil 2.23'teki gibidir.



Şekil 2.24. Çalışmada boyama işlemindeki sıcaklık ve süreler

Boyama verimliliğini analiz etmek için Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı ilgili laboratuvarında MiniScan EZ spektrofotometre renk ölçüm cihazı (Şekil 2.25) kullanılmıştır.

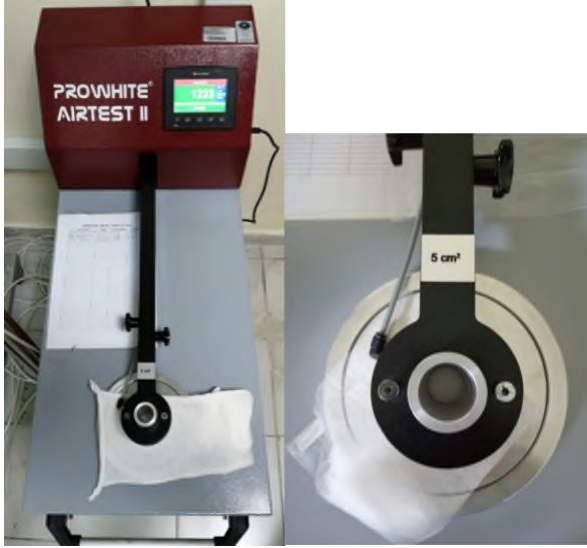


Şekil 2.25. Çalışmada kullanılan spektrofotometre

2.7. Kumaş Testleri

- *Hava geçirgenliği*





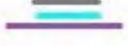
Bir kumaşta hava geçirgenliği, belirli bir alandaki kumaş yüzeyinden belirli bir basınç farkı ile birim zamanda geçen hava miktarı olarak tanımlanmaktadır. Hava geçirgenliği ölçümünde Namık Kemal Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü'nde Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı ilgili laboratuvarında bulunan Prowhite marka Airtest 2 hava geçirgenlik test cihazı (Şekil 2.26) TS 391 EN ISO 9237:1999 standardı esas alınarak yapılmıştır. Numuneler 5cm² ölçüm alanına sahip dairesel kumaş tutucularına yerleştirilerek 100 kPa basınçta l/m²/s cinsinden hava geçirgenlik değerleri ölçülmüştür. Test sonuçlarının ortalaması alınarak, çıkan sonuç kumaşın hava geçirgenlik değeri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.26. Çalışmada kullanılan hava geçirgenliği test cihazı

Ölçüm yapılan numuneler Tablo 2.5 sembolize edilmiştir.

Çizelge 2.4. Yüzeylerin sembolik gösterimi

Yüzey yerleşimleri	Açıklama
	Geleneksel Örgü
	Nano Örgü
	Nonwoven Yüzey Üzerine Nanolif Yüzey
	Geleneksel Örgü+Nonwoven Yüzey Üzerine Nanolif Yüzey
	Nano Örgü+Nonwoven Yüzey Üzerine Nanolif Yüzey

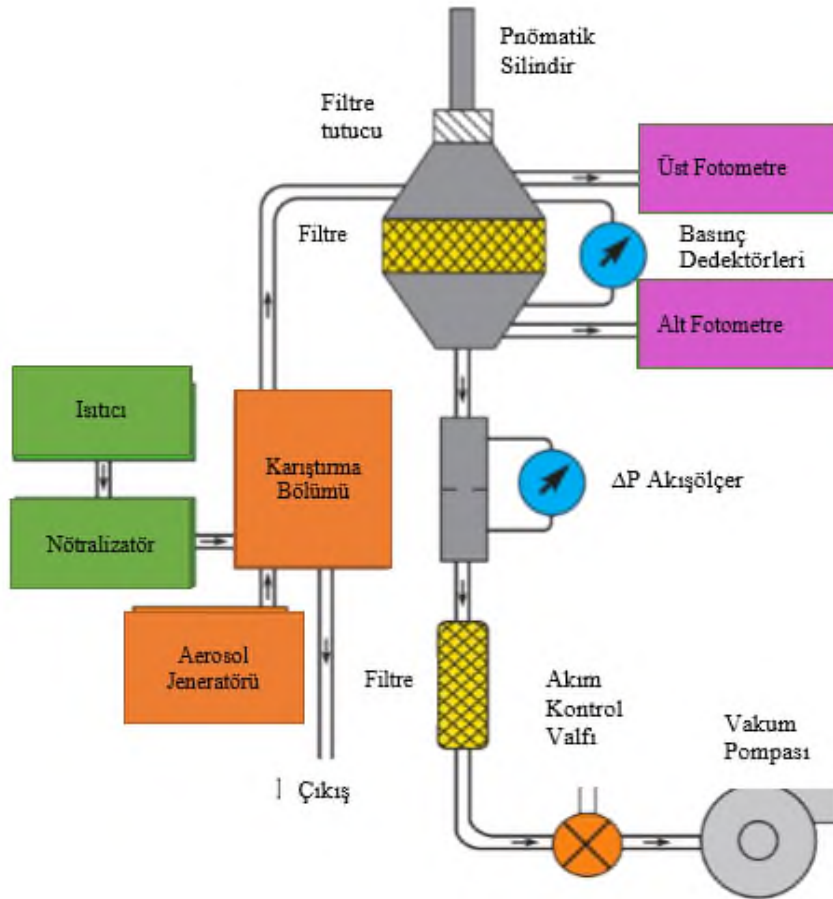
- *Filtrasyon Testi*

Filtrasyon; hava ve sıvı içerisindeki belirli boyutlardaki partiküllerin ayrılarak akışkanın saflığının artırılması işlemidir.

Filtrasyon sürecinde verimliliğin ölçülmesi, işlem kalitesinin saptanması ve kullanılan filtre malzemesinin konstrüksiyon parametrelerinin optimum hale getirilmesi için belirli

standartlar dahilinde hava filtrasyon testleri uygulanmaktadır. Bu bölümde kullanılan test standartı ise EN 149:2001 “Kişisel Koruyucu Donanımlar Arasında Yer Alıp Bakım Gerektirmeyen Toz, Sis Ve Duman Maskeleri” standardıdır.

Bu amaçla ülkemizde sınırlı sayıda bulunan Certitest 8130 hava filtrasyon test cihazı, 3M firması tarafından sağlanan imkanlar dahilinde kullanılmıştır. Söz konusu test cihazı Katı NaCl ve sıvı (Parafin yağı) aerosolleri kullanarak, yüzeylerin filtre penetrasyonlarını ve hava rezistanslarını göstermektedir. Cihazın şematik görünümü Şekil 2.27’de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.27. Certitest 8130 cihazı çalışma prensibine ait şematik görünüm

Bu çalışmada çap aralığı 0,2-0,33 μm olan sıvı aerosol kullanılmıştır. Söz konusu analizde kullanılan akım oranı 90-95 litre/dk., numune çapı 5 cm’dir (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. Filtrasyon performans testi

Bir filtrenin verimliliği, partiküllerin filtre ortamına nüfuz etmek için karşılaştıkları zorluğu ifade eder, verimlilik yüzde olarak ifade edilir ve E ile sembolize edilir. Bir filtrenin penetrasyonu, partiküllerin filtre ortamına nüfuz etmek için bir araya gelme olanağını ifade eder ve P ile sembolize edilir. Bir filtrenin verimliliği ve penetrasyonu arasındaki ilişki eşitliğe göre alınır ve formülü $E = 1 - P$ 'dir (Kouropoulos, 2007).

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. İplik Test Sonuçları

- *Geleneksel ve nanolif iplik lineer yoğunlukları*

Akrilik iplik için lineer yoğunluk 15 tex ölçülmüştür. Deneysel çalışmada örme kumaş üretilirken 15X2 tex iplik kullanılmıştır.

Nanolif iplik için ölçülen lineer yoğunluk 34 tex tir.

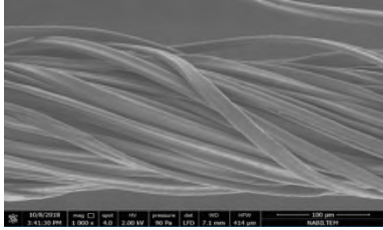
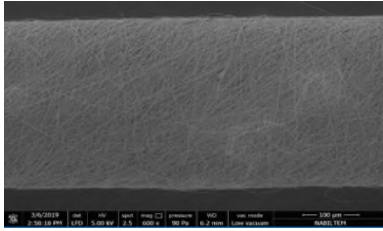
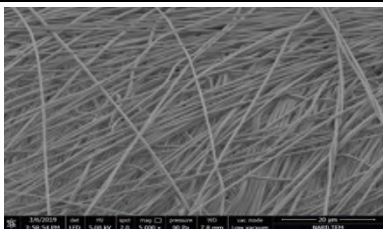
- *İplik bükümü testi*

Akrilik ipliğin bükümü 896 tur/m olarak ölçülmüştür.

- *Nanolif ve geleneksel iplik görüntüleri SEM*

Çalışmada kullanılan ipliklere ait SEM görüntüleri ve büyütme oranları Tablo 3.1'de görülmektedir.

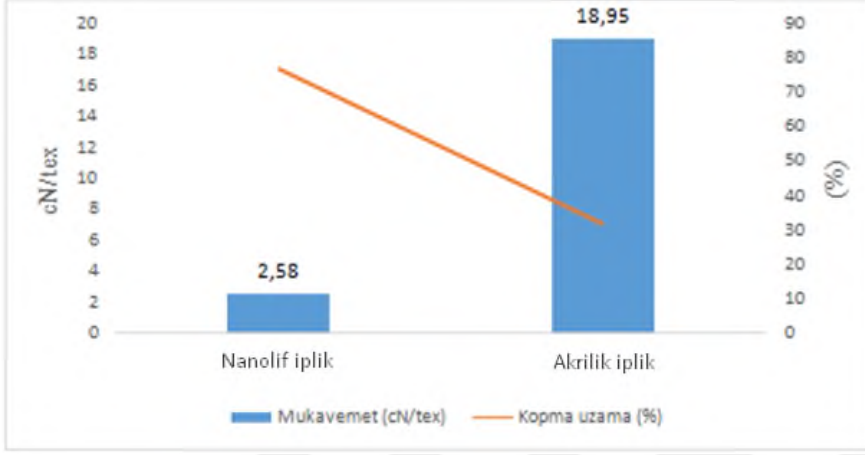
Çizelge 3.1. SEM Görüntüleri

AÇIKLAMA	BÜYÜTME ORANI	SEM GÖRÜNTÜSÜ
Geleneksel akrilik iplik	X1000	
Nanolif iplik	X600	
Nanolif ipliğe ait lif görüntüsü	X5000	

- *Nanolif ve geleneksel iplik çapları*

Geleneksel iplik çapı 194,5 mikrometre; nanoliflerden elde edilen iplik çapı 266 mikrometre ve lif çapı 373 nanometre olarak ölçülmüştür.

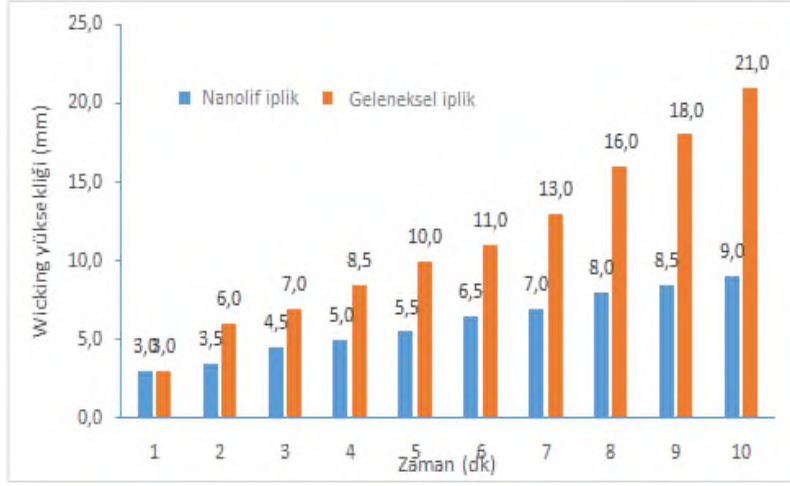
- *Mukavemet testi sonuçları*



Şekil 3.1. Çalışmada kullanılan ipliklere ait mukavemet ve kopma uzaması

Geleneksel ve nanolif ipliklere ait mukavemet ve kopma uzama değerleri Şekil 3.1'de verilmiştir. Sonuçlarda görüldüğü gibi, nanolif ipliğin mukavemeti geleneksel akrilik ipliğe göre oldukça düşüktür. Öte yandan nanolif iplik, geleneksel ipliğe göre çok daha yüksek kopma uzama özelliğine sahiptir. Nanolif ipliklere mukavemeti arttırmak için uygulanan ısı işlem sonucu iplik tekrar test edilmiştir. İşlem sonucu mukavemet değerinde bir miktar artış görülmüş olup, 3,36 cN/tex ölçülmüştür. Isıl işlem nanolif ipliğin mukavemetinde %30 iyileşme sağlamıştır.

- *Wicking test sonuçları*



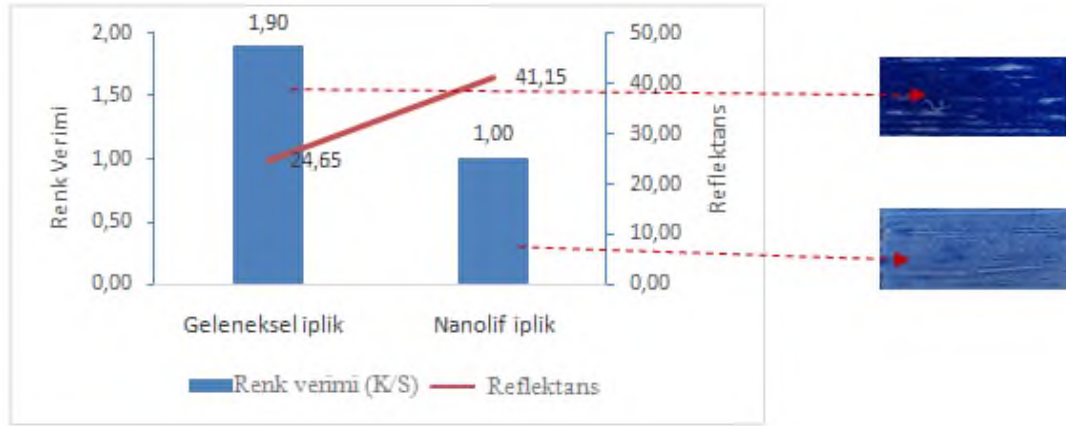
Şekil 3.2. Wicking test sonuçları

% 100 akrilik iplikler pamuk ipliklerine göre yüksek kapilariteye sahiptir. Bunun sebebinin düşük nem emme kapasitesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Akrilik elyaf suyun içeri girmesine izin vermez. Sonuç olarak, su hareketi ve emilimi sadece akrilik liflerin yüzeyinde gerçekleşir(Öztürk, 2010).

Öte yandan nanolif ve geleneksel akrilik ipliklerin kapilaritelerinde büyük bir fark vardır. Şekil 3.2'deki sonuçlar geleneksel akrilik ipliğin nanolif ipliğe göre daha iyi kapilariteye sahip olduğunu göstermektedir. İplik pürüzlülüğünün fazla olması liflerin su taşıma hızında bir azalmaya neden olur çünkü temas açısı artar. Dolayısıyla bu fark, nanofiber ipliklerin daha geniş özgül yüzey alanına bağlanabileceği düşünülmektedir. İplik pürüzlülüğü arttıkça iplik üzerindeki su artar ve kılcallığın sürekliliği lif arttıkça azalır.

- *Nanolif iplik boyama verimliliği*

Renk verimi ve reflektans sonuçları Şekil 3.3.'te görülmektedir.



Şekil 3.3. Renk verimi ve reflektans sonuçları

Camlaşma noktasının (T_g) üzerindeki sıcaklıklarda aktivasyon enerjisi azalmaktadır. Çünkü T_g 'nin üzerinde segmentlerin hareketliliği fazladır ve bunun sonucu olarak da boyarmaddenin difüzyonu daha hızlı olmaktadır. Bu teoriye dayanılarak difüzyon katsayısının sıcaklığa ve aynı zamanda boyarmaddenin bağlanabileceği bölge içeriğine bağlılığı açıklanabilmektedir. Segmentlerin hareketliliğini artırıcı herhangi bir işlem difüzyon hızını da arttırmaktadır (Bhangale, 2001-2002).

Nanolif iplik ile konvansiyonel ipliğin boyama performansı renk verimi (K / S) ve yansıtma değerleri (Şekil 3.3) açısından karşılaştırıldığında nanolifiplik, konvansiyonel ipliğe göre çok daha düşük K/S değerine sahipken, çok daha yüksek yansıtma göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, nanofiber ipliğin çok geniş özgül yüzey alanına ve geleneksel ipliklerle karşılaştırıldığında pürüzsüz bir yüzeye sahip olmasıdır. Bunun yanı sıra renk veriminin açıklanmasında bir başka faktör geleneksel akrilik liflere daha iyi bir boyanabilirlik için bazı kopolimerlerin eklenmesidir.

3.2. Kumaş Test Sonuçları

- *Örme Kumaş Sıklıkları*

Nanolif ipliklerden örülen örgünün, geleneksel akrilik iplikten örülen kumaşa kıyasla daha yüksek ilmek sıklığına sahip olduğu Çizelge 3.2'de açıkça görülmektedir.

Çizelge 3.2 Örme kumaş sıklıkları

Numune	sıra/cm	çubuk/cm
Nano örgü	12	9,5
Geleneksel Akrilik (Ne 40/2)	10,6	9,4

- *Kumaş gramajları*

Geleneksel akrilik iplikten örülmüş kumaş gramajı 139,7 g/m² Nanolif ipliklerden örülmüş kumaş gramajı 148,7 g/m² olarak ölçülmüştür.

- *Kumaş kalınlıkları*

Geleneksel akrilik ve nanolif iplikten örülmüş kumaşların test sonuçları sırasıyla: kumaş kalınlığı 0,975 mm, standart sapma 0,039 % CV 3,99; kumaş kalınlığı 0,865 mm, standart sapması 0,095 % CV 10,93 olarak ölçülmüştür.

- *Kumaş çekme testi sonuçları*

Ham örme kumaşların çekme yüzdeleri, kumaşlar örüldükten 24 saat sonra kumaş enleri ölçülerek hesaplanmıştır.

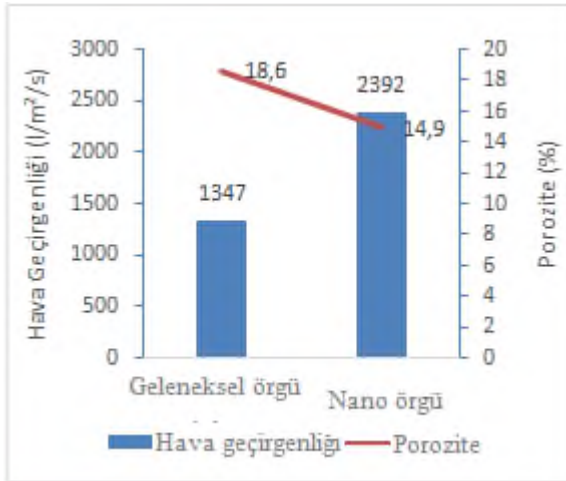
$$\% \text{çekme} = [(\text{makine çevresi} - \text{kumaş eni}) / \text{makine çevresi}] * 100$$

Geleneksel örgünün nano örgüye kıyasla makineden çıktıktan sonraki ham kumaş çekme yüzdesi değerinin yüksek olduğu Çizelge 3.3'te görülmektedir. Bu sonuç nano örgünün ham halde geleneksel akriliğe kıyasla daha stabil olduğunu göstermektedir.

Çizelge 3.3. Örme kumaşların ham çekme oranları

Numune	Ham Kumaş Eni (cm)	Çekme (%)
Nano Örgü	23,1	18,3
Geleneksel Akrilik (Ne 40/2)	22,6	20

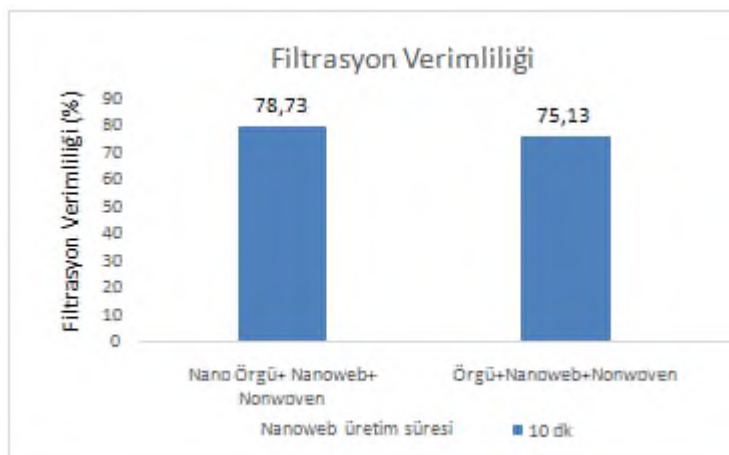
- *Hava geçirgenliği test sonuçları*



Şekil 3.4. Hava geçirgenliği ve porozite test sonuçları

Şekil 3.4 nanolif iplikten örülen kumaşların, daha düşük gözenekliliğe sahip olmasına rağmen geleneksel akrilik iplikten örülenden daha yüksek hava geçirgenliğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu, filtre ortamı olarak nano örgü kumaşın geleneksel kumaştan daha iyi basınç düşüşü sağlayabileceğini göstermektedir.

- *Filtrasyon test sonuçları*



Şekil 3.5. Filtrasyon test sonuçları

Şekil 3.5'te test sonuçlarına göre her iki örgü kumaş türü de yüksek gözeneklilikleri nedeniyle aerosol filtrasyonunda yeterli bir verimlilik sağlayamaz. Bu nedenle, nanolif kaplı nonwovenlardan oluşan filtrede destek malzemesi olarak örme kumaşlar kullanılmıştır.

Sonuçlar nanoliflerden üretilen kumaşın, filtre ortamının destek malzemesi olarak kullanıldığında geleneksel kumaştan biraz daha iyi filtrasyon verimliliği sağladığını göstermektedir.



4. SONUÇ

Bu çalışmada öncelikle, PAN polimerinden Elektro lif çekimi yöntemiyle nanolif iplik eğrilmesi sağlandı. Nanolif lif iplik üretimi, ipliklerin eğrilmesi ve ipliklerin sürekli (kesintisiz) üretimi için tasarlanan özel bir sistemde üretilmiştir. Daha sonra üretilen nanolif iplik ve geleneksel akrilik iplik mukavemet, kopma uzama, kapilerite kabiliyeti ve boyanabilirlik açısından karşılaştırıldı. Son olarak, bu ipliklerden kumaş örüldü ve örülen kumaşların gözenekliliği, hava geçirgenliği ve filtre verimliliği belirlendi.

İplik test sonuçları, nanoliflerden eğrilmiş PAN ipliğinin oldukça düşük mukavemete sahip olduğunu ancak geleneksel akriliğe göre %kopma uzama değerinin daha yüksek olduğunu; geleneksel akriliğin nanolif ipliğe göre daha iyi kapilerite kabiliyetine ve renk verimine sahip olduğunu göstermektedir. İplik özelliklerinin belirlenmesinden sonra, nanolif ipliğin örgü performansı incelenmiştir. Nanolif iplik, düşük mukavemetinden dolayı, örme makinesinin minimum hızında örülebilmektedir. Bu çalışma ile literatürde ilk kez, nanolif PAN ipliğinden makinede örülmüş kumaş örneği sunulmuştur. Örme performansı, standart üretim hızlarında çalışmak için nanolif iplik kopma mukavemetinin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Son olarak, nanolif iplikten ve geleneksel akrilik iplikten örülmüş kumaşlar, karşılaştırılarak nanolif iplikten örülmüş kumaşların, geleneksel iplikten örülmüş kumaştan daha yüksek hava geçirgenliğine ve filtrasyon etkinliğine sahip olduğu gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Alan, G., Tercan M. (2013). Hava filtrasyonu amacıyla kullanılan tekstillerin verimlilikleri ve toz tutma kapasiteleri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19:179-186.
- Afshari, M. Kotek, R. ve Tonelli, A.E. (2007). *Producing polyamide nanofibers by electrospinning*, (Doktoro Tezi), North Carolina State University, USA and South Korea.
- Ashraf, R., Sofi, S.H., Malik, A., Beigh, M.A., Hamid, R., Sheikh, F.A. (2019). Recent trends in the fabrication of starch nanofibers: electrospinning and nonelectrospinning routes and their applications in biotechnology. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 187(1), 47–74.
- Ali, U., Yaqiong, Z., Xungai, W., ve Tong, L., (2011). Electrospinning of continuous nanofiber bundles and twisted nanofiber yarns nanofibers - production, *Properties and Functional Applications*, Lin T. InTech:153-174.
- Afifi, A., M., Nakano, S., Yamane, H., ve Kimura Y (2010). Electrospinning of continuous aligning yarns with a funnel target. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2957: 660–665.
- Andray, A., (2008). Science and technology of polymernanofibers. *A John Wiley&Sons. Inc. Publication*, Electrospinning Basics: 55-76.
- Angamma, C.,J., ve Jayaram, S.,H., (2011). Analysis of the effects of solution conductivity on electrospinning process and fiber morphology. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47 (3), 1109–1117.
- Baura, B., (2015). *Investigation of electrospinning process parameters and studies of stabilization kinetics of polyacrylonitrile-Based electrospun carbon nanofibers*. Doktora Tezi, University of Oklahoma.
- Beese, A.M., Papkov, D., Li, S., Dzenis, Y., ve Espinosa, H.D., (2013) In situ transmission electron microscope tensile testing reveals structure–Property relationships in carbon nanofibers. *Carbon* 60, 246–253.
- Bonino, C., Krebs, M., Saquinga ., Jeong, S., Shearera, K., Alsberg E., ve Khana S., (2011). Electrospinning alginate-based nanofibers: From blends to crosslinked low molecular weight alginate-only systems, *Carboh. Polym*

- Bosworth, L.A., Turner, L.A. ve Cartmell S.H. (2013) State of the art composites comprising electrospun fibres coupled with hydrogels: a review . *Nanomedicine* 9(3):322-35. doi: 10.1016/j.nano.2012.10.008
- Bottino, M.C., Kamocki, K., Yassen, G.H., Platt, J.A., Vail, M.M., Ehrlich, Y., Spolnik, K.J., Gregory, R.L. (2013) Bioactive nanofibrous scaffolds for regenerative endodontics. *J Dent Res* 2013; 92(11): 963-9.
- Buer, A., Ugbolue, S., C. ve Warner, S., B. (2001). Electrospinning and properties of some nanofiber textile. *Research Journal*, 71(4), 323-328.
- Biana, Y., Zhanha, L. ve Chena C (2018). Experimental and modeling study of pressure drop across electrospun nanofiber air filters. *Building and Environment*, 142(244-251). doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.021
- Bhardwaj, N., Kundu, S. C., (2010), Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique, *Biotechnology Advance*, 28, 3, 325-347.
- Chawla, S ve Naraghi, M. (2013) Effect of twist and porosity on the electrical conductivity of carbon nanofiber yarns *Nanotechnology* 24(25):255708 doi:10.1088/0957-4484/24/25/255708
- Çay, A., Kumbasar P.E.A., Akduman Ç., (2015). Effects Of Solvent mixtures on the morphology of electrospun thermoplastic polyurethane nanofibres. *Tekstil ve Konfeksiyon* 25(1), Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Dabirian F, Ravandi H S A (2009). Novel method for nanofiber yarn production using two differently charged nozzles. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*,. 17-3 (74): 45-47.
- Dabirian F., Ravandi H.S.A., Pishavar A.R. ve Abuzade R.A. (2011) A comparative study of jet formation and nanofiber alignment in electrospinning and electrocentrifugal spinning systems. *Journal of Electrostatics* 540-546.
- Dabirian, F. Ravandi H.S.A. Sanatgar H.R. ve Hinestroza, J.P. 2011 Manufacturing of twisted continuous PAN nanofiber yarn by electrospinning process. *Fibers and Polymer* 12 610-615. doi 10.1007/s12221-011-0610-6
- Dabirian, F., Ravandi, H.S.A., Pishavar, A.R. (2013) The effects of operating parameters on the fabrication of polyacrylonitrile nanofibers in electro-centrifuge spinning fibers and polymers. 14 1497-1504. doi 10.1007/s12221-013-1497-1.

- Duzyer, Ş., (2014). *Elektroçekim (Elektrospinning) yöntemiyle üretilen poliester nanoliflerin medikal alanda kullanılabilirliklerinin araştırılması*, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Türkiye.
- Du, J., Hsieh, Y., (2008). Nanofibrous membranes from aqueous electrospinning of carboxymethyl chitosan. *Research Gate*. Nanotechnology 19. doi: [10.1088/0957-4484/19/12/125707](https://doi.org/10.1088/0957-4484/19/12/125707)
- Demirel, R.B., (2016). *Elektroçekim yöntemi ile nanofiber üretimi ve uygulamaları*. Anadolu Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Elmarco Company (2019). The nanofiber market is projected to grow nearly to \$4.3 billion in 2023 Erişim adresi: <https://elmarco.com/news/the-nanofiber-market-is-projected-to-grow-nearly-to-4-3-billion-in-2023-n448563.html>
- Evcin, A. (2017) *Nanolif üretimi ve uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi), Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon.
- Fennessey, S.F ve Farris R.S. (2004) Fabrication of aligned and molecularly oriented electrospun polyacrylonitrile nanofibers and the mechanical behavior of their twisted yarns. *Polymer*. 45(12) 4217-4225 doi.org/10.1016/j.polymer.2004.04.001
- Feng, S., Zhang, F., Ahmed, S., Liu, Y., (2019) Physico-mechanical and antibacterial properties of PLA/TiO₂ composite materials synthesized via electrospinning and solution casting processes. *Coatings*. 9(8): 525
- Fong, H; Chun, I. & Reneker, D.H. (1999). Beaded nanofibers formed during electrospinning. *Polym.*, 40, 4585-4592.
- Formhals, A., (1934). *Process and apparatus for preparing artificial threads*, US Patent No.1, 975, 504.
- Gao, H., Yang, Y., Akampumuza, O., Hou, J., Zhang, H. Ve Qin, X., (2017) Environmental science nano. Royal Society of Chemistry, 0-13. DOI: [10.1039/C6EN00696E](https://doi.org/10.1039/C6EN00696E).
- Gökçe, A.Y. (2018) *Santrifüj eğirme sistemi ile üretilen çift bileşenli ağların filtre ve membran özelliklerinin iyileştirilmesi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Göktepe, F., ve Mülayim, B., (2018). Long path toward success in electrospun nanofiber yarn production, DOI: [10.1515/aut-2018-0004](https://doi.org/10.1515/aut-2018-0004)

- Gümüş, T. (2009). *Design and manufacture of polimeric nanofiber membranes via electrospinning method*(Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Enstitüsü, İstanbul.
- Gündoğdu, H.A.S. (2016) *Aerosol filtration performance of nanofibrous webs produced via centrifugal spinning technique* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Güçlü, S. (2012). *İki Farklı Polimerden Simultane Olarak Elektrospinning Yöntemiyle Nanolif ve Membran Üretimi* (Doktora Tezi) , İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Haghi, A. (2012). Instabilities in the production of electrospun nanofibers. *Advances in Nanofiber Research*, 2: 83-92.
- Huang, Z. M., Zang, Y. Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S., 2003 :A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications on nanocomposites, *Composite Science and Technology*, 63, 2223-2253.
- İpek, M., Canbolat, M. Fatih. (2017). Farklı tipteki toplayıcı plakaların elektrostatik çekim ile elde edilen nanoliflerin morfolojisi üzerine etkilerinin araştırılması, *Science and Engineering Journal of Fırat University*, 29(1), 161-170.
- Park, J.,S.(2010) *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology* doi:10.1088/2043-6262/1/4/043002
- Ji L, Medford AJ, Zhang X (2009). Electrospun polyacrylonitrile/zinc chloride composite nanofibers and their response to hydrogen sulfide. *Polymer*, 50: 605-612.
- Jianxin, H. Kun, Q. Yuman, Z. ve Shizhong, C. (2013) Multiple conjugate electrospinning method for the preparation of continuous polyacrylonitrile nanofiber yarn journal of polymer science. *Journal of Applied Polymer*, DOI: 10.1002/app.40137.
- Jiang G. Qin X. (2014) An improved free surface electrospinning for high throughput manufacturing of core-shell nanofibers. *Materials Letters*, 128, 259-262.
- Joshi, M., Adak, B., (2019). Advances in nanotechnology based functional, smart and intelligent textiles: a review. *Comprehensive Nanoscience and Nanotechnology*, 253-290.

- Qin, X., H. (2007) Effect of different salts on electrospinning of polyacrylonitrile (PAN) polymer solution. *Journal Applied Polymer Science*, 103(6), 3865–3870.
- Kenry, Lim, C., T., (2017) Nanofiber technology: current status and emerging developments. *Progress in Polymer Science* 70 (1-17).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2017.03.002>
- Ko, F. (2003). Nanofiber technology Nato-Advance study institute (ASI). *Nanoengineered Nanofibrous Materials*, 1-18, Antalya.
- Kozanoğlu G. (2006). *Elektrospining yöntemiyle nanolif üretim teknolojisi* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Kılıç A., 2008, *Eriyikten elektro üretim yöntemiyle polipropilennanolif üretimi* (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koski, A., Yim, K., Shivkumar, S. (2004) Effect of molecular weight on fibrous PVA produced by electrospinning, *Mater. Lett.*, 58(3–4), 493–497.
- Kampalanonwat P, Supaphol P (2011) Preparation of hydrolyzed electrospun polyacrylonitrile fiber mats as chelating substrates: a case study on copper (II) ions. *Ind Eng Chem Res*, 50(21):11912–11921.
- Kwak, H., W., Woo, H., Kim, I., C., Lee, K., H. (2017) Fish gelatin nanofibers prevent drug crystallization and enable ultrafast delivery. *RSC Advances*, 64
doi.org/10.1039/C7RA06433K
- Kurtuluş., M. (2015). *Santrifüj eğirme yöntemiyle nanolif yapıları dokusuz kumaş üretiminin optimizasyon çalışmaları ve filtrasyon özellikleri* (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Levitt, A.S., Knittel, C.E., Vallett, R., Koerner, M., Dion, G., Schauer, C.L. (2017). Investigation of nanofiber preparation by modified electrospinning setup. *Journal of Applied Polymer Science*, 134. DOI: [10.1002/app.44813](https://doi.org/10.1002/app.44813)
- Levitt A.S., Vallet R., Dion G., ve Schauer C.L. (2018) Effect of electrospinning processing variables on polyacrylonitrile nanofibers. *Applied Polymer Science*, DOI: [10.1002/app.46404](https://doi.org/10.1002/app.46404)
- Lee, J.H., Ahn, K., Kim, S.Y., Kim, J.M., Jin, J.S., Jeong, E.D., Cho, C.R. (2014) Thickness effect of the TiO₂ nanofiber scattering layer on the performance of the TiO₂

- nanoparticle/TiO₂ nanofiber-structured dye-sensitized solar cells. *Current Applied Physics*, 14(6), 856-861.<https://doi.org/10.1016/j.cap.2014.04.001>
- Li, W.J, Laurencin, C.T., Caterson, E.J., Tuan, R.S., Ko, F.K. (2002) Electrospun nanofibrous structure: a novel scaffold for tissue engineering. *J Biomed Mater Res* 60(4): 613-21.
- Li, N., Xiong J., Xue H., (2011). Effect of wheel rotating speed and LiCl additives on electrospun aligned polyacrylonitrile nanofiber. *Polymer Engineering and Science*, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech Universities, Hangzhou 310018, Çin, [doi: 10.1002/pen.21989](https://doi.org/10.1002/pen.21989).
- Li, F., Wang, G., Jiao, Y., Xie, S. (2014) Efficiency enhancement of ZnO-based dye-sensitized solar cell by hollow TiO₂ nanofibers. *Journal of Alloys and Compounds*, 611(19-23).<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.05.100>
- Lim Y., Gwon H., Jeun J. Ve Nho C., (2010). Preparation of Cellulose-based nanofibers using electrospinning. *Research Gate*, DOI: [10.5772/8153](https://doi.org/10.5772/8153)
- Lipol L.S. ve Rahman M. (2015) Electrospinning and electrospun nanofibers world journal of nano science and engineering, 6, 45-50 <http://dx.doi.org/10.4236/wjnse.2016.62005>
- Lin, L. , Ping, L., Qin, S. F., Yong, G. Shi, R. Z. Heng, J. H. Jian C. (2019) Study on preparation of polyacrylonitrile/polyimide composite lithium-ion battery separator by electrospinning. Sichuan University of Science and Engineering China.
- Lim, Y.M., Gwon, H.J., Jeun, J.P., and Nho Y.C. (2010). Preparation of cellulose based nanofibers using electrospinning, nanofibers, Ashok Kumar, ISBN: 978-953-7619-86-2, InTech.
- Megelski, S., Stephens, J.S., Bruce Chase, D., Rabolt, J.F., 2002. Micro and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers. *Macromolecules*, 35 (22), 8456–8466.
- Memarian, N. ve Mohammadi, M. (2013). Fabrication and characterization of TiO₂ nanoparticles for using as gas sensor. Fizik Fakültesi. İran.
- Merritt, Sonia R., Agata A. Exner; Zhenghong Lee., Horst A. (2012). Electrospinning and Imagination. *Advanced Engineering Materials*. 14 (5), 266–278. [doi:10.1002/adem.201180010](https://doi.org/10.1002/adem.201180010)
- Mokhtari-Shourijeh, Z., Montazerghaem, L. ve Olyal, M. (2018). Preparation of porous nanofibers from electrospun polyacrylonitrile/ polyvinylidene fluoride composite

- nanofibers by inexpensive salt using for dye adsorption. *Journal of Polymers and the Environment*, doi.org/10.1007/s10924-018-1238-z.
- Munir, M., Suryamas A., Iskandar F, Okuyama K., (2009). Scaling law on particle to fiber formation during electrospinning, *Polymer*, 50: 4935-43.
- McGill university. (2015). An Introduction to Electrospinning and Nanofibers Erişim adresi: www.worldscientific.com
- Nataraj, S., Yang, K., Aminabhavi, T. 2012 Polyacrylonitrile-based nanofibers. A state-of-the-art review. *Prog. Polym. Sci.*, 37, 487–513.
- Neghlani PK, Rafizadeh M, Taromi FA (2011) Preparation of aminated-polyacrylonitrile nanofiber membranes for the adsorption of metal ions: comparison with microfibers. *J Hazard Mater*, 186(1):182–189.
- Nie, H., He, A., Zheng, J., Xu, S., Li, J., Han, C. C. (2008). Effects of chain conformation and entanglement on the electrospinning of pure alginate, *Biomacromolecules*, 9 (5), 1362-1365.
- Özdoğan, E., Demir, A., Seventekin, N., (2006). Nanoteknoloji ve tekstil uygulamaları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 1, 159-168.
- Patel S. Konar M. Sahoo H.K. ve Hota G. (2019) Surface functionalization of electrospun PAN nanofibers with ZnO-Ag heterostructure nanoparticles: Synthesis and antibacterial study. *Nanotechnology*, 1-24 <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab045d>
- Patra, J. K., Gouda, S., (2013). Application of nanotechnology in textile engineering: An overview. 5(5), 104-111.
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.E., Yong, T., Ma, Z. (2005). An introduction to electrospinning and nanofibers. *World Scientific Publishing*, Singapur, 382 s.
- Ravandi, S.A.H. Torki, B.R. (2015). Characteristics of yarn and fabric made out of nanofiber. *Scientific Research Publishing*, <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2015.61013>
- Reneker, D. H., Chun, I., (1996). Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning, *Nanotechnology*. (7), 216-223.
- Subramanian S., Tana K.L., Lima S.H, Ramakrishna S., 2014. Electrospun nanofibers for air filtration applications, *Procedia Engineering*, 75 159 – 163. [doi: 10.1016/j.proeng.2013.11.034](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.11.034)

- Seventekin, N. (2006) Makromolekül Kimyası (Giriş). Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma- Uygulama Merkezi Yayınları, İzmir.
- Seventekin, N. (2011) Kimyasal Lifler. Ege Üniversitesi Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma- Uygulama Merkezi Yayınları, İzmir.
- Subbiah, T.,Bhat, G. S., Tock, R. W., Parameswaran, S. AndRamkumar, S. S., (2005). Electrospinning of nanofibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 96(2), 557– 569.
- Sun, B.,Long, Y.Z., Zhang, H.D., Li, M.M., Duvail, J.L., Jiang, X. Y., Yin, H.L., (2014). Advances in three-dimensionalnanofibrousmacrostructuresviaelectrospinning. *Progress in Polymers Science*, 39 (5), 862– 890.
- Shaohua Wu, Yue Zhang, Penghong Liuand Xiaohong Qin (2016). Polyacrylonitrile nanofiber yarns and fabrics producedusing a novel electrospinning method combined with traditional textiletechniques *Textile Research Journal* DOI: [10.1177/0040517515603808](https://doi.org/10.1177/0040517515603808)
- Shaohua, J., Yiming, C., Gaigai D., Changtong M., Andreas G., Seema A. (2018). Electrospun nanofiber reinforced composites: a review. *Polymer Chemistry* College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China. DOI: [10.1039/C8PY00378E](https://doi.org/10.1039/C8PY00378E)
- Shin, Y.M., Hohman, M.M., Brenner, M.P. and Rutledge, G.C., (2001). Electrospinning: A Whipping Fluid Jet Generates Submicron Polymer Fibers, *Applied Physics Letters*, 78-8,1-3.
- Smit E, Buttner U, Sanderson R D (2007). Continuous yarns from electrospun nanofibers. *Nanofibers and Nanotechnology in Textiles*, 45-71.
- Şenol, F., Tayyar, A.E., Doğan, G., Yaman, N., 2005. Nanolifler ve Uygulama Alanları. *Tekstil Maraton*, 15(78):20-25.
- Taylor, G. I., (1964). Disintegration of waterdrops in an electricfield. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and PhysicalSciences*, 280, 383-397.
- Tsai C.C (2013) *Electrospun nanofiber yarns for nanofluidic applications*(Doktora Tezi). Clemson University.
- Tülü, G., Kaya, B.,Ü. (2020) Endodontik Doku mühendisliğinde nanoteknolojinin kullanımı.*Sdü Sağlık Bilimleri Dergisi*, 11(1) 107-111. doi: [10.22312/sdusbed.605360](https://doi.org/10.22312/sdusbed.605360).

- Xua, B., Wanga, X., Huanga, Y., Liua, J., Wanga, D., Fenga, S., Huangb, X. Ve Wang H. (2020). Electrospinning preparation of PAN/TiO₂/PANI hybrid fiber membrane with highly selective adsorption and photocatalytic regeneration properties. *Chemical Engineering Journal*, 399, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125749>.
- Xue, J., Wu, T., Dai, Y. Ve Xia, Y. (2019). Electrospinning and electrospun nanofibers: methods, materials, and applications. *Chemical Review*, 119, 5298–5415. DOI: [10.1021/acs.chemrev.8b00593](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00593)
- Wang, X., Zhan, C., Kong, B., Zhu, X., Liu, J., Xu, W., Cai, W., Wang, H. (2015). Self-curved coralloid-like Al₂O₃ nanoplates for use as an adsorbent. *J. Colloid Interface Sci.* 453 244–251.
- Wu, Z.Y., Monro, A.K., Milne, R.I. Wang, H.Yi, T.S., Liu, J. ve Li D. (2013) Molecular phylogeny of the nettle family (Urticaceae) inferred from multiple loci of three genomes and extensive generic sampling 69(3) 814-827 <https://doi.org/10.1016/j.ymp.2013.06.022>
- Yanılmaz, M., Karakaş, H., (2011). Yüksek performanslı tekstiller için nanoteknoloji uygulamaları. *Tekstil ve Mühendis*, 18(81), 35-41.
- Yarin, A.L., Koombhongse, S. and Reneker, D. H., (2001). Taylor cone and jetting from liquid droplets in electrospinning of nanofibers, *Journal of Applied Physics*, 90-9, 4837-4846.
- Zhang, Q., Wang, L., Wei, Z., Wang X., Long S., Yang J., (2012). *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 50, 1004–1012. doi: 10.1002/polb.23096. 54

EKLER

Ek Tablo. 1: Geleneksel akrilik mukavemet testi sonuçları

Deneme detay	Kopma (kg)	Kopma (Newton)	Mukavemet (cN/tex)	Mukavemet (MPa)	Kopma uzaması (%)	Kesit alanı (mm ²)	Lineer yoğunluk (tex)
Geleneksel akrilik	0,2950	2,8940	19,6067	97,3705	33,1000	0,0297	14,76
Geleneksel akrilik	0,3480	3,4139	23,1293	114,8642	33,3000	0,0297	14,76
Geleneksel akrilik	0,2610	2,5604	17,3470	86,1482	33,9000	0,0297	14,76
Geleneksel akrilik	0,2470	2,4231	16,4165	81,5272	29,1000	0,0297	14,76
Geleneksel akrilik	0,2420	2,3740	16,0841	79,8769	31,1000	0,0297	14,76
Ortalama	0,2786	2,7331	18,5167	91,9574	32,1000	0,0297	14,76
Standart sapma	0,0440	0,4313	2,9224	14,5129	1,9799	0,0000	0,00
Cv	0,0019	0,1861	8,5401	210,6252	3,9200	0,0000	0,00

Ek Tablo. 2: Nanolif iplik ısıtma işlem sonrası mukavemet testi sonuçları

Deneme detay	Kopma (kg)	Kopma (Newton)	Mukavemet (cN/tex)	Mukavemet (MPa)	Kopma uzaması (%)	Kesit alanı (mm ²)	Lineer yoğunluk (tex)
200 °C ısıtma işlem	0,1340	1,3145	3,5111	17,4029	91,60	0,0755	37,44
200 °C ısıtma işlem	0,1330	1,3047	3,4849	17,2730	94,80	0,0755	37,44
200 °C ısıtma işlem	0,1360	1,3342	3,5635	17,6626	98,50	0,0755	37,44
200 °C ısıtma işlem	0,1280	1,2557	3,3538	16,6236	93,60	0,0755	37,44
200 °C ısıtma işlem	0,1200	1,1772	3,1442	15,5846	94,30	0,0755	37,44
200 °C ısıtma işlem	0,1180	1,1576	3,0918	15,3249	85,20	0,0755	37,44
Ortalama	0,1282	1,2573	3,3582	16,6453	93,00	0,0755	37,44
Standart sapma	0,0076	0,0746	0,1991	0,9871	4,4349	0,0000	0,00
Cv	0,0001	0,0056	0,0397	0,9743	19,6680	0,0000	0,00

Ek Tablo. 3: Nanolif iplik mukavemet testi sonuçları

Deneme detay	Kopma (kg)	Kopma (Newton)	Mukavemet (cN/tex)	Mukavemet (MPa)	Kopma uzaması (%)	Kesit alanı (mm ²)	Lineer yoğunluk (tex)
Standart iplik	0,0943	0,925083	2,72	12,25	80,1	0,0755359	34
Standart iplik	0,0968	0,949608	2,79	12,57	85,1	0,0755359	34
Standart iplik	0,0825	0,809325	2,38	10,71	78,2	0,0755359	34
Standart iplik	0,0951	0,932931	2,74	12,35	77,4	0,0755359	34
Standart iplik	0,0808	0,904237	2,66	11,97	85,1	0,0755359	34
Standart iplik	0,0789	0,774009	2,28	10,25	76	0,0755359	34
Ortalama	0,0881	0,8825	2,5957	11,6836	80,32	0,0755	34,00
Standart sapma	0,0082	0,0727	0,2139	0,9630	3,9352	0,0000	0,00
Cv	0,0001	0,0053	0,0458	0,9274	15,4857	0,0000	0,00