

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO ÜFLEME YÖNTEMİ İLE POLİSÜLFON
MEMBRANLARIN ÜRETİMİ VE HAVA UYGULAMALARINDA
KULLANIMI

ZÜLEYHA SARAÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO ÜFLEME YÖNTEMİ İLE
POLİSÜLFON MEMBRANLARIN ÜRETİMİ
VE HAVA UYGULAMALARINDA
KULLANIMI

ZÜLEYHA SARAÇ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ ÇİĞDEM TAŞDELEN-YÜCEDAĞ

GEBZE

2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**PRODUCTION OF POLYSULFONE
MEMBRANES BY ELECTRO-BLOWING
AND USAGE IN AIR APPLICATIONS**

ZÜLEYHA SARAÇ

**A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING**

THESIS SUPERVISOR
ASSIST. PROF. DR. ÇİĞDEM TAŞDELEN-YÜCEDAĞ

GEBZE
2022

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 02/06/2022 tarih ve 22/27 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 17/06/2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Züleyha SARAÇ'ın tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem TAŞDELEN-YÜCEDAĞ

ÜYE

: Prof. Dr. Melek TÜTER

ÜYE

: Doç. Dr. Rezan DEMİR-ÇAKAN

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../ .../ ... tarih ve.../.....sayılı karar

ÖZET

Hava kirliliği, günümüzde karşılaşılan en büyük çevresel sorunlardan biridir. Nanolifler, yüksek porozite, dayanıklı geçirgenlik performansı, düşük üretim maliyeti ve kolay ölçeklenebilirliklerinden dolayı hava filtrasyonu için cazip seçeneklerdir. Bu çalışmada, yüksek kimyasal ve mekanik kararlılık ve kolay işlenebilirlik gibi üstün özelliklerinden dolayı polisülfon (PSU) kullanılarak elektro-üfleme yöntemi (EBS) ile dayanıklı, sağlam ve hidrofobik bir hava filtrasyon ortamı üretilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışma, hava filtreleme uygulamaları için EBS ile PSU nanolif üretiminin ilk optimizasyon çalışmasıdır. Üretimin optimizasyonu için incelenecek bağımsız değişkenler konsantrasyon, hava basıncı ve voltaj olarak seçilmiştir. Taguchi deney tasarımının “en küçük en iyi” yaklaşımıyla en küçük ortalama lif çapını (AFD) sağlayan, değişkenlerin optimize edilmiş değerleri sırasıyla konsantrasyon, hava basıncı ve voltaj için ağırlıkça %13 PSU, 3 bar ve 7.5 kV olarak belirlenmiştir. Doğrulama deneyinden elde edilen numunenin AFD'si 105 nm'dir. Numunelerin yüzey morfolojileri, porozite değerleri ve ıslanabilirlik davranışları sırasıyla taramalı elektron mikroskobu (SEM), gravimetrik yöntem ve su temas açısı (WCA) ölçümleri yapılarak incelenmiştir. Hidrofobik özellik gösteren PSU nanolifleri yüksek WCA değerine (159,8'e kadar) ve yüksek gerilme mukavemeti değerine (1,38 MPa'ya kadar) sahiptir. Farklı biriktirme sürelerinde (15, 30, 45, 60 dk.) hazırlanan numuneler filtrasyon verimliliği, basınç düşüşü, kalite faktörü ve Knudsen sayısı (Kn) açısından incelenmiştir. 60 dakika üretim süresi ile hazırlanan numunenin filtrasyon verimi ve basınç düşüşü sırasıyla %98.09 ve 202 Pa olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Polisülfon, Elektro-Üfleme Yöntemi, Nanolif, Hava Filtresi, Taguchi Deney Tasarımı.

SUMMARY

Air pollution is one of the biggest environmental problems faced today. Nanofibers are attractive options for air filtration due to their high porosity, resilient permeability performance, low production cost and easy scalability. In this study, it was aimed to produce a durable, robust, and hydrophobic air filtration media by electro-blowing method (EBS) using polysulfone (PSU) due to its superior properties such as high chemical and mechanical stability and easy processability. This study is the first optimization study of EBS and PSU nanofiber production for air filtration applications. Concentration, air pressure and voltage were determined as independent variables for the optimization based on “smaller is better” approach of Taguchi design of experiment. The optimized values which supplied the smallest average fiber diameter (AFD) possible, were obtained 13 wt% PSU, 3 bar, and 7.5 kV for concentration, air pressure and voltage, respectively. The AFD of the sample obtained from the confirmation experiment is 105 nm. Surface morphologies, porosity values, and wettability behaviours of the samples were investigated by using scanning electron microscopy (SEM), gravimetric method, and contact angle (WCA) measurements, respectively. Super hydrophobic PSU nanofibers have high water contact angle value (up to 159.8) and high stress value (up to 1.38 MPa). Samples prepared at different deposition times (15, 30, 45, 60 min) were investigated in terms of filtration efficiency, pressure drop, quality factor and Knudsen number (Kn). The filtration efficiency and the pressure drop of the sample with 60 min of spinning time were measured as 98.09% and 202 Pa, respectively.

Key Words: Electro-Blown Spinning, Polysulfone, Nanofiber, Taguchi Optimization, Air Filtration.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca her konuda bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren, çalışmalarım sırasında beni motive eden, yardımını ve desteğini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Çiğdem TAŞDELEN-YÜCEDAĞ'a,

Tez çalışmamda, bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan Sayın Doç. Dr. Ali KILIÇ'a,

Emekleri, destekleri ve sevgileriyle yanımda olan sevgili anneme, babama, kardeşime ve teyzeme,

Desteğini hayat boyu hissettiğim, bana inanan ve her zaman yanımda olan annem Nesrin SARAÇ'a çalışmalarım sırasında göstermiş olduğu sabır ve anlayış için,

Tez çalışmamda kullandığım Polisülfon granüllerini temin etmemi sağladığı için SOLVAY, Almanya yetkililerine, filtrasyon testleri için TEMAG araştırma laboratuvarına ve çalışmama maddi olarak 2021-A-101-18 projesiyle destek sağlayan GTÜ-Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne (GTÜ-BAP) teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BÖLÜM	3
2.1. Hava Kirliliği	3
2.2. Hava Filtreleri	4
2.2.1. Polimer Bazlı Lifli Hava Filtreleri	5
2.3. Nanolif Üretim Yöntemleri	6
2.3.1. Elektro Eğirme Yöntemi (ES)	7
2.3.2. Eriyikten Eğirme veya Eriyikten Üfleme	8
2.3.3. Çözeltilerden Üfleme Yöntemi, (SBS)	9
2.3.4. Elektro Üfleme Yöntemi (EBS)	10
2.4. Üretimi Etkileyen Parametreler	10
2.5. Lifli Hava Filtrelerinin Çalışma Mekanizması	12
2.6. Taguchi Deney Tasarımı	15
2.7. Literatürde Hava Filtrelerinde PSU Liflerinin Kullanımı	17
3. MALZEME ve YÖNTEM	20
3.1. Malzemeler	20
3.2. Çözeltilerin Hazırlanması	20
3.3. Taguchi Yöntemiyle Nanolif Üretiminin Tasarlanması	21
3.4. Deney Düzenegi ve Nanolif Üretimi	23
3.5. Karakterizasyon Testleri	24
3.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	24
3.5.2. Porozite Ölçümü	25

3.5.3. Temas Açısı (WCA)	25
3.5.4. Çekme Testi	25
3.5.5. Filtrasyon Performanslarının İncelenmesi	27
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	30
4.1. Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi	30
4.2. Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi	31
4.3. Optimum Çalışma Şartlarının Belirlenmesi	36
4.4. Doğrulama Deneyi	37
4.5. Varyans Analizi (ANOVA)	39
4.6. PSU Nanoliflerin Filtrasyon Performanslarının İncelenmesi	40
4.7. PSU Nanoliflerin Mekanik ve Islanabilirlik Davranışlarının İncelenmesi	43
5. SONUÇLAR	45
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	53
EKLER	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler ve</u> <u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklamalar</u>
μL	: mikrolitre
μm	: mikrometre
3D	: Üç Boyutlu
ΔP	: Basınç Farkı/ Basınç Düşüşü
λ	: Ortalama serbest yol
ρ_{IPA}	: İzopropil alkol yoğunluğu
ρ_{PSU}	: Polisülfon yoğunluğu
σ	: Çekme Mukavemeti
d	: Hava moleküllerinin etkin çapı
C_{alt}	: Alt akım konsantrasyonu
F	: Kuvvet
k	: Boltzmann sabiti
N	: Newton
L_0	: İlk uzunluk
$C_{\text{üst}}$	: Üst akım konsantrasyonu
K	: Kelvin
η	: Filtrasyon verimliliği
P	: Basınç
P	: Penetrasyon
Pa	: Pascal
Kn	: Knudsen sayısı
PM_{10}	: 10 mikrometreden küçük partikül madde
$\text{PM}_{2.5}$	: 2.5 mikrometreden küçük partikül madde
Al_2O_3	: Alüminyum oksit
BaTiO_3	: Baryum titanat
Fe_3O_4	: Ferrik oksit, Demir (II,III) Oksit
Re	: Reynolds
S/N	: Sinyal/ Gürültü oranı
SiO_2	: Silisyum dioksit

T	: Sıcaklık
TiO ₂	: Titanyum dioksit
NaCl	: Sodyum klorür
AFD	: Ortalama lif çapı
ANOVA	: Varyans analizi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Birliği
CEN	: Avrupa Standardizasyon Komitesi
COVID-19	: Korona Virüs 2019
DMF	: N,N-Dimetilformamid
EBS	: Elektro Üfleme Yöntemi
EPA	: Verimli Partikül Hava Filtreleri
ES	: Elektroeğirme
HEPA	: Yüksek Verimli Partikül Hava Filtreleri
HVAC	: Avrupa İç Mekan İklimi Endüstri Birliği
IPA	: İzopropil Alkol
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
NMP	: N-Methyl-Pyrrolidone
OD	: Ortagonal Dizi
PAN	: Poliakrilonitril
PEO	: Polietilen oksit
PM	: Partikül Madde
PSU	: Polisülfon
QF	: Kalite Faktörü
SBS	: Çözüldüden Üfleme Yöntemi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
ULPA	: Ultra Düşük Penetrasyonlu Hava Filtreleri
WCA	: Temas Açısı
WHO	: Dünya Sağlık Örgütü (World Health Organization)

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Hava kirliliği kaynaklarının sınıflandırılması.	4
2.2: Nanoliflerin kullanım alanları.	7
2.3: ES düzeneğinin şematik gösterimi.	7
2.4: (a) Eriyikten eğirme yöntemi ve (b) eriyikten üfleme yönteminin şematik gösterimi.	8
2.5: SBS düzeneğinin şematik gösterimi.	9
2.6: EBS düzeneğinin şematik gösterimi.	10
2.7: Üretimi etkileyen parametreler.	11
2.8: Şekil 2.8: Lifli hava filtrelerinde partiküllerin filtrasyon mekanizmaları (a) yakalanma etkisi, (b) atalet etkisi, (c) difüzyon etkisi, (d) elektrostatik etkisi ve (e) yerçekimi etkisi.	13
2.9: (a) Kn'ye göre akışın sınıflandırılması ve (b) kayma akışının gösterilmesi.	14
3.1: (a) PSU'nun kimyasal yapısı; (b) PSU granülleri; (c) farklı konsantrasyonlarda hazırlanan PSU/DMF çözeltileri.	20
3.2: Polimer moleküllerinin çözünmesinin şematik gösterimi, mavi çizgiler polimer zincirlerini sarı noktalar ise çözücü moleküllerini temsil eder. (a) katı polimer moleküllerinin bir çözücüye eklendikten hemen sonraki durumu; (b) şişmiş bir polimerik jel; (c) bir çözücü içinde dağılmış ve kümelenmiş polimer molekülleri.	21
3.3: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.	23
3.4: (a) EBS deney düzeneği; (b) deney sisteminde kullanılan nozülün birleştirilmesi; (c) fiber oluşumu; (d) lif- damlacık oluşumu; (e) damlacık oluşumu.	24
3.5: Test numunesinin hazırlanması ve çekme testinin yapılması.	26
3.6: (a) TSI Certiest® Model 8130A filtre test cihazı; (b) filtre test cihazının çalışma mekanizması; (c) deney numunesinin test cihazına yerleştirilmesi ve aerosol geçişi.	28
3.7: Hava geçirgenlik testinin yapılması.	29

4.1:	Taguchi L9 ortogonal dizisindeki deneysel çalışmalardan elde edilen EBS tekniği ile üretilmiş PSU nanolif örneklerinin SEM görüntüleri: (a) $C_{13}P_3V_0$, (b) $C_{13}P_4V_{7.5}$, (c) $C_{13}P_5V_{15}$, (d) $C_{16.5}P_3V_{7.5}$, (e) $C_{16.5}P_4V_{15}$, (f) $C_{16.5}P_5V_0$, (g) $C_{20}P_3V_{15}$, (h) $C_{20}P_4V_0$ ve (i) $C_{20}P_5V_{7.5}$.	31
4.2:	EBS tekniği ile üretilmiş PSU nanoliflerinin lif çapı dağılımlarının histogram grafiği: (a) $C_{13}P_3V_0$, (b) $C_{13}P_4V_{7.5}$, (c) $C_{13}P_5V_{15}$, (d) $C_{16.5}P_3V_{7.5}$, (e) $C_{16.5}P_4V_{15}$, (f) $C_{16.5}P_5V_0$, (g) $C_{20}P_3V_{15}$, (h) $C_{20}P_4V_0$ ve (i) $C_{20}P_5V_{7.5}$.	33
4.3:	Konsantrasyon, basınç ve voltaj uygulamasının üretilen PSU nanoliflerin çapına etkisi.	35
4.4:	İkili faktör etkileşimlerine ait seviye değişikliklerinin üç boyutlu çizimleri: (a) konsantrasyon-hava basıncı, (b) voltaj-hava basıncı, (c) konsantrasyon-voltaj.	36
4.5:	Seviyelerle birlikte tüm parametrelerin sinyal-gürültü (S/N) oranının ortalaması.	37
4.6:	Doğrulama deneyine ait SEM görüntüsü ve lif çapı dağılımı.	38
4.7:	Taguchi L9 OD'sindeki 9 deneye ve doğrulama deneyine karşılık gelen lif çaplarının kutu grafiği.	38
4.8:	Parametrelerin lif çapını etkileme yüzdeleri.	39
4.9:	(a) Çeşitli hava akış hızları altında $0,3 \mu m$ NaCl partiküller için PSU nanolif numunelerinin filtrasyon verimliliği ve basınç düşüşü (biriktirme süresi 15 dakika), (b) Çeşitli üretim sürelerine sahip PSU nanoliflerinin filtrasyon verimliliği ve basınç düşüşü.	40
4.10:	(a) 15 dakika biriktirme süresinde üretilen PSU nanoliflerin farklı hava akış hızı değerleri için hesaplanan QF değerleri ve (b) Çeşitli biriktirme sürelerinde üretilen PSU nanoliflerin basınç düşüşü ve birim ağırlık değerleri.	41
4.11:	(a) Üretilen PSU liflerinin Knudsen sayısı ile basınç düşüşü ilişkisinin değerlendirmesi, (b) farklı biriktirme sürelerinde üretilen PSU nanoliflerin mekanik davranışlarının incelemesi ve (c) deney tasarımı üretilen liflerin ıslanabilirlik davranışın incelenmesi.	42
4.12:	Farklı biriktirme sürelerinde üretilen numunelerin hava geçirgenlik değerleri.	42

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
3.1: EBS kullanılarak PSU nanolif üretiminde seçilen üç parametre ve seviyeleri.	22
3.2: Taguchi L9 OD'sine göre yapılan deney tasarımı.	22
4.1: Taguchi OD'sine ait AFD değerleri (standart sapmaları ile), porozite değerleri ve S/N oranları.	34

1. GİRİŞ

Hava kirliliği, günümüzde karşı karşıya kalınan en önemli çevresel problemlerden biridir. Hava kirliliğini oluşturan partikül maddeler (PM) havada asılı halde bulunan sıvı damlacıklar ile katı partiküllerin bir karışımıdır. Yapılan çalışmalar neticesinde PM' nin insan sağlığı, ekosistem ve üretim verimliliği üzerinde son derece olumsuz etkileri olduğu tespit edilmiştir. Dünya Sağlık Örgütü (WHO)'nın 2014 verilerine göre her yıl 7 milyon insan PM kaynaklı sebeplerden dolayı hayatını kaybetmektedir [1]. Hava ile sürüklenen partiküllerin üzerine tutunarak taşınan mikroorganizmalar, virüsler, bakteriler, organik maddeler, ağır metaller ve polen gibi oluşumlar insan sağlığını etkileyerek ciddi hastalıkları (akciğer kanseri gibi) tetiklerken, bakteriyel ve virüs (COVID-19 Pandemisi) kökenli hastalıkların yayılması için de ortam oluşturmaktadır [2], [3]. Hava filtrasyon membranlarının geliştirilmesi PM'nin yol açtığı olumsuz sonuçların azaltılması ve canlılar için daha kaliteli hava sahası oluşturulması açısından oldukça önemlidir. Hava kirliliğiyle mücadelede yüksek porozite ve kirletici partiküllerin yakalanması için kıvrımlı kanalları olan lifli filtreler uygulanabilir. Bu filtreler verimli ve gelecek vadeden bir yapıdır [2]. Nanoliflerden oluşturulan filtreler, geliştirilmiş filtrasyon kapasiteleri ve daha uzun hizmet ömürleri nedeniyle hava filtrasyonu için en iyi seçenek olarak değerlendirilmektedir [4].

Bu tez çalışmasının amacı, ülkemizin ve dünyanın karşı karşıya kaldığı kritik problemlerden biri olan hava kirliliğini önlemeye yönelik yeni bir hava filtresi membranı geliştirmektir. Bu amaçla, yüksek termal, kimyasal ve mekanik kararlılık gibi üstün özellikleriyle ön plana çıkan kolay işlenebilir polisülfon (PSU) polimeri lif üretimi için tercih edilmiştir [5]. Dayanıklı ve sağlam nanolif hava filtresi üretmek için yüksek üretim kapasitesi, düzgün lif oluşumu, kolay uygulanabilirlik ve nispeten düşük elektrik alan ihtiyacı gibi özelliklere sahip elektro üfleme yöntemi (EBS) kullanılmıştır. Çalışma kapsamında bağımsız değişkenlerden polimer konsantrasyonu, hava basıncı ve voltaj kullanılarak nanolif üretimi optimize edilmiştir. Optimizasyon çalışmasında, en düşük lif çapını veren parametre seviye kombinasyonunu tespit etmek için Taguchi deney tasarımının “en küçük en iyi” yaklaşımı kullanılmıştır. Taguchi L9 ortogonal dizisinden (OD) elde edilen numunelerin yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM), su temas açısı (WCA) ve porozite ölçümleri yapılarak

incelenmiştir. Optimum koşullarda ve farklı biriktirme sürelerinde üretilen nanolif numunelerinin filtrasyon verimi, basınç düşüşü, kalite faktörü (QF) ve hava geçirgenlik değerleri ölçülmüş, çekme mukavemeti analizleri yapılmıştır.



2. TEORİK BÖLÜM

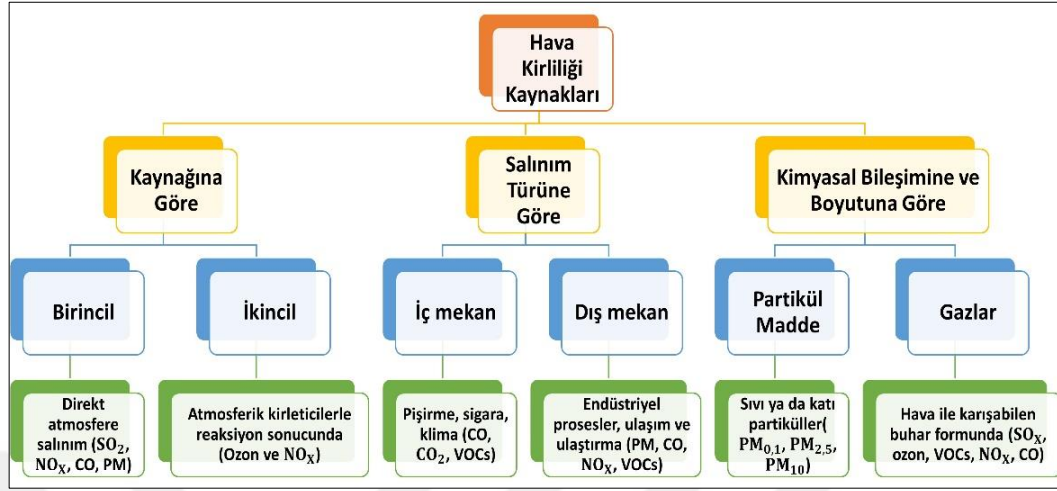
2.1. Hava Kirliliği

Hava kirliliği, WHO tarafından atmosferin doğal özelliklerini değiştiren herhangi bir kimyasal, fiziksel veya biyolojik ajan ile iç veya dış hava ortamının kirlenmesi olarak tanımlanmıştır. İç ve dış hava kirliliği, başta solunum yolu hastalıkları olmak üzere ölümle sonuçlanabilen birçok hastalığa sebep olmaktadır. WHO verilerine göre küresel nüfusun neredeyse tamamı (~%99) hava kirliliği sınır değerlerinin üstünde yani yüksek kirletici içeren havaya maruz kalmaktadır. Ayrıca bu maruziyetten en çok düşük ve orta gelirli ülkelerin muzdarip olduğu da belirtilmektedir [1].

Hava kirliliği, fabrikalar, motorlu taşıtlar, şehirler ve orman yangınları gibi çeşitli kirletici kaynakları olan önemli bir çevre sorunudur [1], [6]. Sülfatlar, nitratlar, elementel ve organik karbon, toz, organik bileşikler, mikroorganizmalar, bakteriler, polen ve virüsler dahil olmak üzere PM olarak adlandırılan havadaki katı ve sıvı partiküller hava kirliliğinin ana bileşenleridir [2], [7]. Konvansiyonel hava filtrasyonu ve insan solunum yolu ile filtrelenmesi zor olan boyutlara sahip PM'ler, insan bronşlarına ve akciğerlerine nüfuz edebilir. Filtrelenmemiş PM'lerin insan vücudunda birikmesi akciğer kanserine, akut solunum yolu enfeksiyonlarına, kalp hastalığına, kronik akciğer hastalığına ve milyonlarca erken ölüme yol açar [8]. Dünyanın şu anda mücadele ettiği COVID-19 pandemik küresel krizi üzerine yapılan son araştırmalar, Çin, İtalya ve ABD gibi hava kirliliğinin en fazla olduğu ülkelerde virüsün son derece hızla yayıldığına işaret etmektedir. Bu pozitif korelasyonun, PM'nin virüs için taşıyıcı ortam yaratmasından ve ayrıca akciğer hücrelerine zarar vererek inflamasyon üzerindeki baskılayıcı etkisinden kaynaklandığı düşünülmüştür [9], [10]. Artan yaşam standartlarına eşlik eden hızlı kentleşme ve sanayileşmenin yol açtığı hava kirliliği çeşitli sağlık sorunlarına ve ölümlere yol açmaktadır. Bu durum ülkeleri hava kirliliği ile etkin mücadele vermeye zorlamıştır [11], [12].

Hava kirleticilerinin sınıflandırılması Şekil 2.1'de [13] gösterilmektedir. Hem iç hem de dış mekanlarda bulunabilen hava kirleticileri PM ve gazlardan oluşmaktadır. İç ortam havasındaki PM konsantrasyonunun, sigara, yemek pişirme, ısıtma ve klima

kullanımı gibi sebeplerden dolayı dış ortam havasındaki PM konsantrasyonundan iki ila beş kat daha kirli olduğu bildirilmiştir [13].



Şekil 2.1: Hava kirliliği kaynaklarının sınıflandırılması.

PM'ler boyutlarına göre farklı yöntemler kullanılarak filtrelenebilirler. Örneğin çapı 10 µm'den büyük PM'ler yıkayıcılar, siklonlar, çöktürme tankları gibi ekipmanları kullanılarak filtrelenirken, çapı 10 µm ile 2.5 µm arasındaki PM'ler (PM₁₀) burun kanalları yardımıyla tutulabilmektedir [2]. Çapı 2.5 µm'den daha küçük partiküller (PM_{2.5}) ise burun kanallarıyla tutulamayarak akciğerlere inebilecek kadar küçük partiküllerdir ve ciddi sağlık sorunlarına sebep olurlar. PM'lerin ekosistemler ve halk sağlığı üzerindeki bilinen tehlikelerini önlemek için kaynak yönetimi, yeni enerji geliştirme ve filtreleme teknolojileri vb. gibi bir dizi strateji geliştirilmiştir. Bunlar arasında hava filtreleme teknolojisi, düşük enerji tüketimi ile ekonomik, yüksek performanslı ve geniş uygulama alanına sahip olması gibi çeşitli avantajları nedeniyle önde gelmektedir [2].

2.2. Hava Filtreleri

Hava filtreleri performanslarına, uygulama alanlarına, çalışma prensiplerine veya malzeme bileşimlerine göre sınıflandırılabilir. Genel olarak hava filtreleri, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (ISO) gibi uluslararası kuruluşlar, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) ve Avrupa İç Mekan İklimi Endüstri Birliği (HVAC) gibi bölgesel kuruluşlar ya da Amerikan Test ve Malzeme Birliği (ASTM) gibi ulusal kuruluşlar tarafından belirlenen standartlar kullanılarak filtre

verimliliklerine göre sınıflandırılır. Bu kuruluşlar sadece hava filtrelerini sınıflandırmakla kalmaz aynı zamanda filtrasyon testleri için yaygın olarak kabul gören standartlar oluşturur [9]. Örneğin, ISO 29463 numaralı standarttan geliştirilen Avrupa standardı EN 1822'ye göre, hava filtreleri, %85-99,5 verimliliğe sahip Verimli Partikül Hava (EPA) filtreleri, %99,95-99,9995 verimliliğe sahip Yüksek Verimli Partikül Hava (HEPA) filtreleri ve %99,9995-99,9999995 verimliliğe sahip Ultra Düşük Penetrasyonlu Hava (ULPA) filtreleri olarak sınıflandırılır. Hava filtreleri genellikle 0,3-0,5 µm boyutlu partiküllerle hazırlanan aerosoller kullanılarak test edilir [9].

Yapılan düzenlemeler ve geliştirilen yöntemlerle esas olarak PM'lerin atmosfere salınımını azaltmak amaçlansa da iç mekân hava kalitesi, gözenekli membranlar ve lifli hava filtreleri kullanarak iyileştirilebilir [14], [15]. Lifli filtrelerin yüksek gözenekli yapısı ve kıvrımlı kanalları sayesinde hava iletimiyle eş zamanlı olarak PM yakalama kabiliyetleri gelişmiştir [16]. Böylelikle, lifli filtreler PM kirliliği için uygulanabilir, verimli ve gelecek vaat eden bir teknolojidir. Nanolif üretiminde kullanılan malzemeler polimer ve polimer olmayan malzemeler olarak iki kategoriye ayrılabilir [2].

2.2.1. Polimer Bazlı Lifli Hava Filtreleri

Polimer bazlı lifli hava filtreleri: tek polimer bileşenli hava filtreleri, kompozit polimer hava filtreleri, hibrit hava filtreleri(polimer-organik nano partikül katkılı hava filtreleri, polimer-inorganik nano partikül katkılı hava filtreleri), nanolif-ağ yapılı hava filtreleri olarak sınıflandırılabilir [2].

Daha ince lif çapı, daha küçük gözenek boyutu ve yüksek porozite gibi benzersiz özellikleriyle nanolif membranlar hava filtrasyonu için elverişli malzemelerdir. Tek polimer bileşenli nanolif hava filtreleri PM filtrasyonu için başarıyla tasarlanmış ve üretilmiştir. Bu membranlar, küçük lif çapı ve yüksek porozite gibi birçok dikkat çekici özellik sergilerler. Buna karşın, tek bileşenli filtrelerin çoğu, mekanik mukavemet, kimyasal direnç, kirlenme önleyici özellikler gibi bazı özelliklerden yoksundur. Bu malzemelerin yoksunlukların üstesinden gelmek için, kompozit polimer lifli hava filtreleri geliştirilmiştir. Bu tasarıma sahip hava filtreleri üretmek için farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla polimer eş zamanlı lif formuna getirilir [2].

Hibrit filtreler genel olarak iki farklı gruba ayrılırlar. Polimer-organik nanopartikül katkılı hibrit hava filtreleri genellikle filtreyi oluşturan liflerin negatif veya pozitif gruplarla kutuplu hale getirilmesi ve lif çevresinde makroskobik elektrik alan oluşturmalarıyla elde edilir. Bu filtrelerin çalışma mekanizması yüklü kirletici partiküllerin filtre yüzeyine çekilmesi ve filtre yüzeyinde adsorblanması olarak ifade edilebilir [2].

Polimer-inorganik katkılı hava filtrelerinde ise TiO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , $BaTiO_3$ ve Fe_3O_4 gibi çeşitli inorganik nano partiküller lif çapını ve gözenek boyutunu küçültmek, yüzey pürüzlülüğünü ve porozitesini artırmak, yapının mukavemetini güçlendirmek gibi filtre performansını iyileştirecek amaçlarla nanolif yapısına dahil edilir [9].

Nanolif bazlı filtreler, mikro lif filtrelerle kıyaslandıklarında filtreleme verimliliği ve kullanım ömrü özellikleri daha gelişmiş olsa da yüksek basınç düşüşü ve buna bağlı düşük QF özellikleri geliştirilmeye devam etmektedir. 2012 yılında Wang ve ark. Poliamit-66 ile ilk nanolif-ağ yapılı hava filtresini geliştirmişlerdir [17]. Geliştirilmiş hidrodinamik teknikle üretilen bu yeni ağsı yapıların gözenek boyutu gibi özellikleri çözelti parametreleri ve proses parametreleri ayarlanarak kolaylıkla kontrol edilebilmektedir. Nano ve mikro liflere kıyasla daha küçük gözenek boyutu ve yüksek porozite değerlerine sahip nano-ağlar, yüksek filtrasyon verimliliği ve daha düşük basınç farkı gerektiren birçok alanda kullanılabilir [2].

2.3. Nanolif Üretim Yöntemleri

Nanolifler, çapı 1 μm 'den küçük yüksek yüzey alanı/hacim oranına sahip birbirine bağlı ağlardan meydana gelen ince nano gözenekli katmanlardır. Nanolifler, koruyucu malzemeler, enerji depolama ürünleri, sensörler, fonksiyonel malzemeler ve doku mühendisliği gibi çeşitli uygulama alanlarında yararlanılan çok yönlü malzemelerdir [18]. Şekil 2.2'de nanoliflerin bazı kullanım alanları verilmiştir.

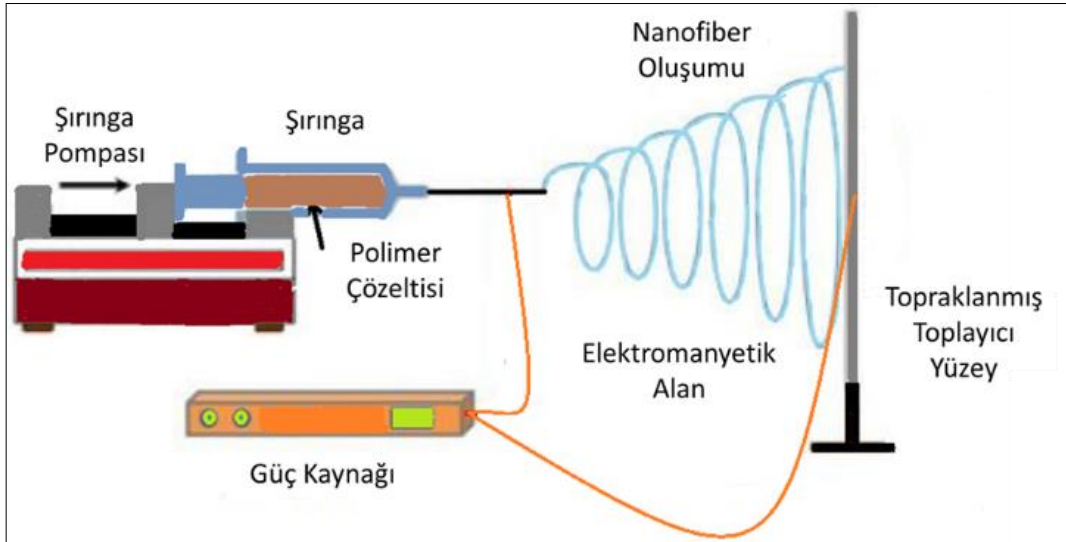
Nanoliflerin üretilmesinde eriyikten eğirme, eriyikten üfleme, ıslak eğirme, elektro eğirme (ES) ve faz ayrımı gibi birçok klasikleşmiş yöntem kullanılmaktadır [19], [20]. Nanoliflerin üretilmesinde ortaya çıkan alternatif yöntemler ise santrifüjlü jet eğirme, plazma kaynaklı sentez ve çözeltiden üfleme yöntemi (SBS) olarak sıralanabilir [21], [22].



Şekil 2.2: Nanoliflerin kullanım alanları.

2.3.1. Elektro Eğirme Yöntemi (ES)

ES yöntemi, bir polimer çözeltisine veya polimer eriyiğine yüksek voltaj uygulanmasıyla mikron altı çap aralığında ultra ince lifler üretmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Şekil 2.3'te [23] gösterildiği gibi tipik bir ES düzeneği üç ana bileşenden oluşur: polimer çözeltisini şarj etmek için yüksek voltajlı bir güç kaynağı, polimer çözeltisinin beslenmesini sağlayan şırınga pompası ve nanoliflerin biriktirildiği toplayıcı yüzey [22].



Şekil 2.3: ES düzeneğinin şematik gösterimi.

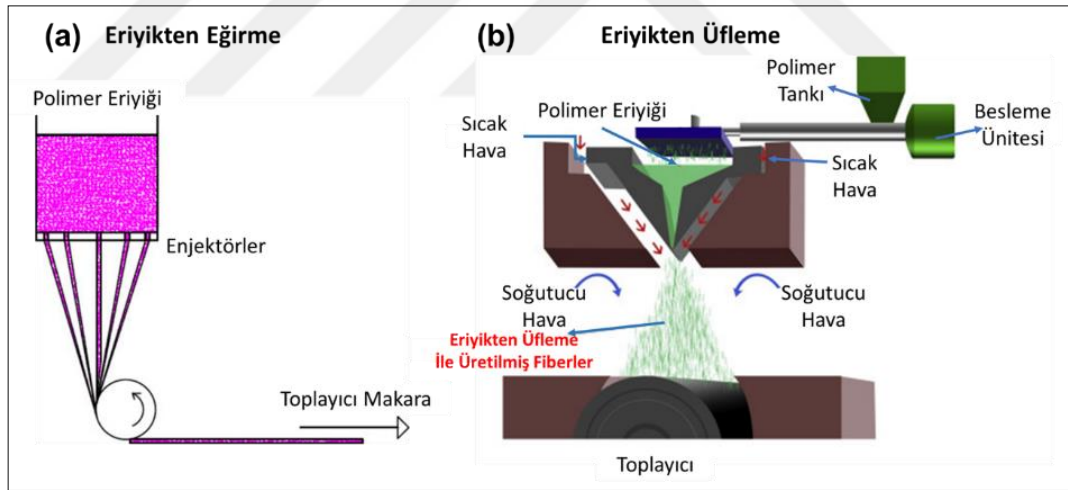
Elektro eğirme işlemi sırasında, çözelti elektriksel olarak yüklenir ve yüzey gerilimini yenerek iğne ucunda bir Taylor konisi oluşturur. Bu koni daha sonra

topraklanmış bir toplayıcı plakaya veya döner toplayıcı yüzeye doğru jet şeklinde gerilir. Toplayıcıya giderken, jet kurur ve mevcut çözücü buharlaşarak, çapları onlarca ila birkaç yüz nanometre arasında değişen lifler elde edilir [9].

ES bahsi geçen teknikler arasında en düzgün gerilmiş nanolif üretimi sağlayan literatürde kullanılan en yaygın yöntem olmasına rağmen, düşük üretim kapasitesi ile seri üretimler için yetersiz kalmaktadır [24], [25].

2.3.2. Eriyikten Eğirme ve Eriyikten Üfleme

Eriyikten eğirme (Şekil 2.4.a) [25] ve eriyikten üfleme (Şekil 2.4.b) [26] genellikle mikrometre boyutunda lif üretmek için endüstride çok kullanılan yöntemlerden biridir [26], [27]. Her iki yöntemde erimiş bir polimerin bir veya birkaç delikten ekstrüde edilmesine dayanır. Eriyikten üfleme tekniğinde farklı olarak eritilmiş polimer yüksek hızlı sıcak hava jeti ile gerilir [9]. Üretim sonucunda rastgele dağılmış ince lifler toplayıcı yüzeyinde biriktirilir.



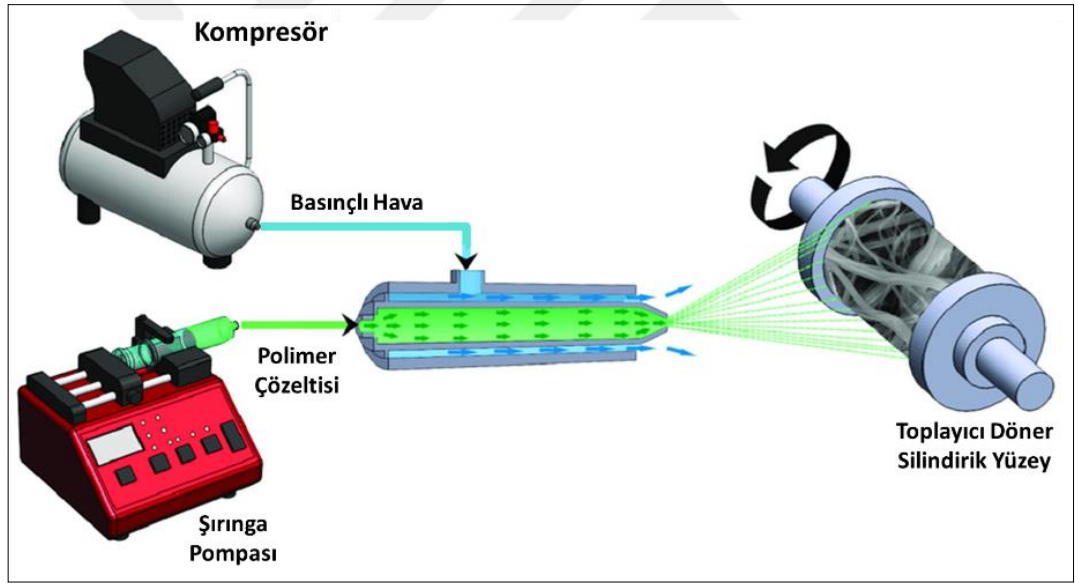
Şekil 2.4: (a) Eriyikten eğirme yöntemi ve (b) eriyikten üfleme yönteminin şematik gösterimi.

Bu yöntemlerle üretilen liflerin ortalama çapı eriyiğin çıkış hızına, eriyiğin viskozitesine, eriyiğin sıcaklığına, havanın sıcaklığına ve havanın hızına bağlı olarak değişir [22]. Ancak bu teknik sadece termoplastik polimerlerle sınırlıdır ve üretilen liflerin çapları çoğunlukla nano boyutun dışında kalır [20].

2.3.3. Çözeltiden Üfleme Yöntemi (SBS)

SBS, elektro eğirme yönteminde olduğu gibi nanometre boyutunda lif üretebilme özelliğine sahip eriyikten üfleme yöntemini model olarak geliştirilen bir yöntemdir [9], [19]. SBS yöntemi (Şekil 2.5) [28] basit ve yüksek oranda ölçeklenebilir bir nanolif üretim teknolojisidir.

SBS’de iç içe geçmiş ko-sentrik iki borudan oluşan nozül (Şekil 2.5) [28] kullanılarak üretim yapılmaktadır. Dış çeperlerden gönderilen basınçlı hava, içteki borudan gönderilen polimer çözeltisi ile gaz/polimer ara yüzeyinde basınç düşüşü sağlayarak polimerin esneyerek uzamasını ve lif yapısına kavuşmasını sağlamaktadır. Polimer çözeltisi ile yüksek hızlı gaz (genellikle hava) nozülün ucunda bir araya gelirler. Nozülün hemen çıkışında polimer çözeltisindeki çözücünün yüksek basınçlı gaz etkisinde hızla buharlaşmasıyla liflerin oluşumu meydana gelir [29].

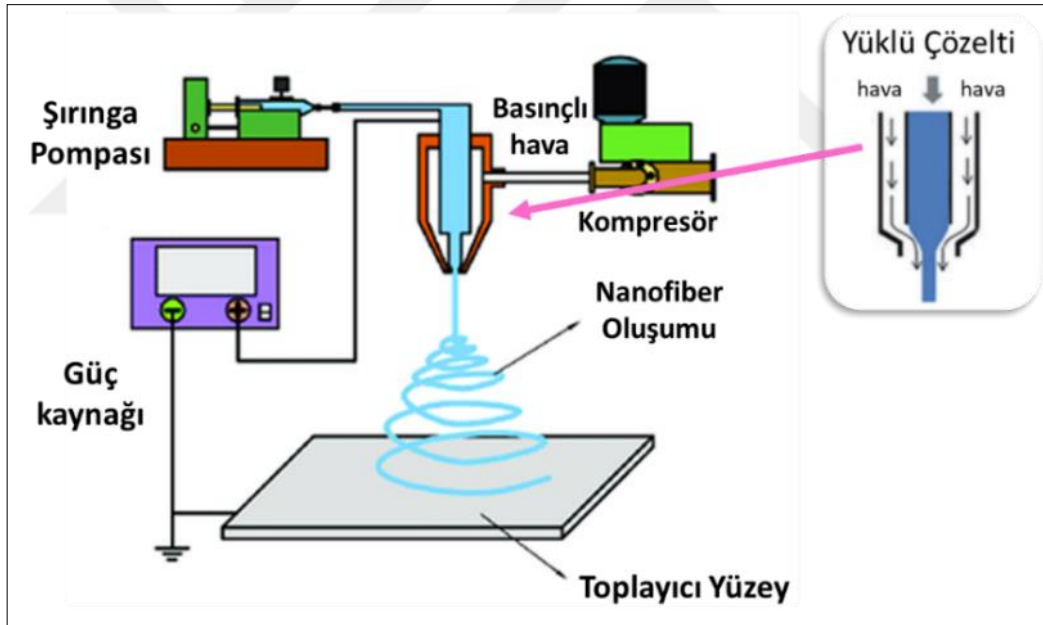


Şekil 2.5: SBS düzeneğinin şematik gösterimi.

SBS düzeneği, sıkıştırılmış gaz kaynağı, basınç regülatörü, şırınga, şırınga pompası, eş merkezli nozül içeren bir püskürtme aparatı ve toplayıcıdan oluşur. SBS kolay ve düşük maliyetli bir yöntem olmasına rağmen, geniş lif çapı dağılımı, dolaşık lif ve filamentlerin oluşum eğilimi iyileştirilmesi gereken hususlardır [20], [24].

2.3.4. Elektro Üfleme Yöntemi (EBS)

EBS, eriyikten üfleme ve elektro eğirme sistemlerin birleştirildiği ya da SBS'ye yüksek voltajlı güç kaynağının dahil edildiği sistem olarak tanımlanabilir [22]. Bu yöntemde, çözeltiden üfleme yönteminde olduğu gibi polimer önce bir çözücü içinde çözülür ve daha sonra şırıngaya çekilerek şırınga pompasına yerleştirilir. Polimer çözeltisi ve basınçlı hava hat yardımıyla nozüle beslenir. Basınçlı hava ve nozülün uç kısmından uygulanan voltaj yardımıyla topraklanmış toplayıcı yüzey üzerinde nano ve mikro boyutlu lifler oluşturulur (Şekil 2.6) [30]. Eriyikten üfleme ve çözeltiden üfleme yöntemleri lif oluşumu için basınçlı havayı kullanırken, elektro üfleme yöntemi SBS sisteminden farklı olarak elektrostatik alandan da faydalanmış ve böylece daha küçük çaplı, düzgün gerilmiş ve homojen lif dağılımına sahip nanoliflerin elde edilmesi hedeflenmiştir [31].

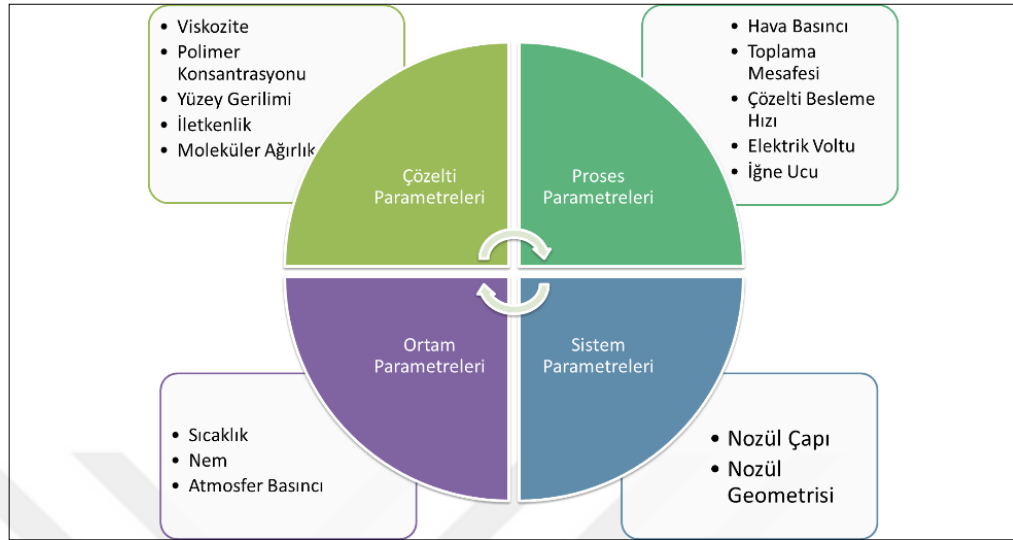


Şekil 2.6: EBS düzeneğinin şematik gösterimi.

2.4. Üretimi Etkileyen Parametreler

Liflerin morfolojisi ve çapı, Şekil 2.7'de [32] sınıflandırıldığı gibi çözelti parametreleri, proses parametreleri, sistem parametreleri ve ortam parametreleri değiştirilerek optimize edilebilir. Moleküler ağırlık, polimer konsantrasyonu, yüzey gerilimi ve viskozite gibi çözelti parametreleri ve hava basıncı, besleme hızı,

uygulanan voltaj gibi proses parametreleri, lif oluşumu üzerinde doğrudan etkisi olan değişkenlerin başında gelir [33].



Şekil 2.7: Üretimi etkileyen parametreler.

Lif oluşumunu sağlayan kararlı jetin gelişimi için gereken kümelenmiş polimer zincirlerinin oluşumu polimerin molekül ağırlığı, çözeltinin konsantrasyonu ve çözeltinin viskozitesine bağlıdır [34]. Polimer çözeltisinin konsantrasyonu arttıkça viskozitesi artar. Viskozitesi artan çözelti gazın sürüklemeye kuvvetlerine karşı daha fazla direnç sergiler ve sonuç olarak daha kalın liflerin oluşumuna yol açar [29]. Gaz basıncının etkisi göz önüne alındığında, yüksek basınçlar polimer akış hatlarının uzayarak incelmesini teşvik ettiğinden daha yüksek gaz basınçlarında üretim yapılarak daha ince lifler üretilebilir [28]. Benzer bir ilişkiden voltaj parametresi içinde bahsedilebilir. Yüksek voltaj uygulanması liflerin daha fazla gerilmesine ve uzamasına dolayısıyla bir üst sınır değerine kadar daha ince liflerin elde edilmesine neden olur [35]. Uygulanan voltajın optimum değerinin aşılması, nozüle yerleştirilen iğneden püskürtülen polimer jetinin sapmasına ve Taylor konisinin bozulmasına sebep olabilir [25]. Ayrıca, nozül çapı ve nozül geometrisi gibi sistem parametrelerinin değiştirilmesi, cihaz tasarımının değiştirilmesini gerektirmektedir. Ortam koşulları ayarlanarak lif üretiminin optimize edilmesi mümkündür ancak bu durum oldukça zordur. Örneğin, atmosfer sıcaklığı artırılarak ve/veya üretim ortamının nemi azaltılarak ortalama lif çapı (AFD) azaltılabilir [36].

2.5. Lifli Hava Filtrelerinin Çalışma Mekanizması

Hava filtrasyonu üzerine teorik araştırmalar çok uzun süredir geliştirilmektedir. Geliştirilen teorilerden faydalanılarak filtrasyon mekanizması yatışkın ve yatışkın olmayan koşul olarak ikiye ayrılır [22], [28]. Filtrasyon işlemi yatışkın koşullarda gerçekleşirken, filtrasyon verimliliği ve filtredeki basınç düşüşü filtre malzemesinin doğal özelliklerine, havanın akış hızına, kirletici PM'lerin yapısına ve davranışlarına bağlıdır ve zaman içerisinde değişiklik göstermez [22], [28]. Yatışkın olmayan koşullarda filtrasyon evresinde ise partikül yakalama kapasitesi ve basınç düşüşü partiküllerin filtrede birikmesiyle değişiklik gösterir [22], [28]. Yatışkın olmayan koşullarda filtrasyon oldukça karmaşık bir süreç olduğundan, filtrasyon sürecini doğru şekilde öngörecektir sistematik teorilerden yoksundur. Pratikte, havadaki kirletici PM konsantrasyonu düşük kabul edildiğinden dolayı filtrasyon işlemlerinde filtrede biriken PM'lerin filtrenin kalınlığını önemli ölçüde değiştirmeyeceği kabul edilir. Bu kabulden yola çıkarak lifli filtrelerinin yatışkın koşullarda çalıştığı söylenebilir [22]. Filtrasyon süreci yatışkın koşullarda beş farklı mekanizma (Şekil 2.8) [37]: elek etkisi, yakalanma etkisi, atalet birikmesi, difüzyon etkisi, elektrostatik etki ve yer çekimi etkisi ile açıklanır [9], [37].

Elek etkisi, partiküller filtrelerin gözeneklerinden geçemeyecek kadar büyük olduğunda filtre yüzeyinde tutulması olarak tanımlanır. Bu mekanizmanın çalışması için genellikle 3-8 nm aralığında küçük gözenekler gerektirdiğinden filtrede basınç düşüşü genellikle birkaç yüz veya binlerce Pa aralığındadır. Diğer filtreleme mekanizmalarına kıyasla filtre boyunca basınç düşüşünün yüksek olması hava filtrelerinde ana filtreleme mekanizması olarak seçilmemesine sebep olur [9].

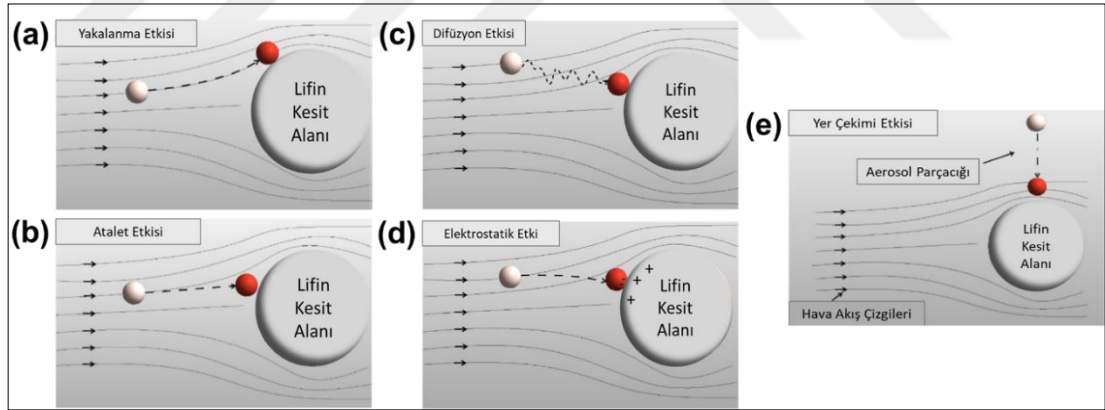
Yakalanma mekanizması, lif yüzeyine yakın hareket eden 0,1-1 μm aralığındaki partikülleri taşıyan hava akım çizgileri varlığında oluşur [2]. Havayla taşınan aerosol parçacığının lif yüzeyine oldukça yakın hareket edeceği ve bulunduğu akım çizgisinden sapmayacağı varsayımı yapılır. Bu esnada partiküller Van der Waals kuvvetlerinin etkisiyle lif yüzeyine temas ederek yakalanır [2], [9].

Atalet etkisi mekanizmasında, hava akışıyla taşınan büyük partiküller akış çizgisinin ani değişimine uyum sağlayamaz ve hava akım çizgisinden ayrılır [2]. Bağımsız bir şekilde hareket eden partiküller lif yüzeyi ile karşılaştıklarında lifli filtre tarafından yakalanır. Atalet yakalama mekanizması özellikle yüksek hava akış

hızlarında $0,3-1 \mu\text{m}$ 'den daha büyük partiküllerin yakalanmasında etkin hale gelir [12].

Gazların kinetik teorisine göre gazlar, aralarında bulunan mesafeye kıyasla çok sayıda küçük boyutlu moleküllerden oluşur. Bu küçük moleküller birbirleriyle çarpışarak rastgele hareket ettiklerinde sürekli hava akım çizgisinde hareket etmezler. Bu rastgele hareket Brown hareketi olarak tanımlanır. Brown hareketleri ile partiküllerin yakalanmasını sağlayan difüzyon mekanizması, küçük boyutlu ($\text{PM}<0,1\mu\text{m}$) partiküllerin akış çizgisinden sapması ve çarpışarak filtreye difüze olmasını ve lif yüzeyinde birikmesini içerir [12].

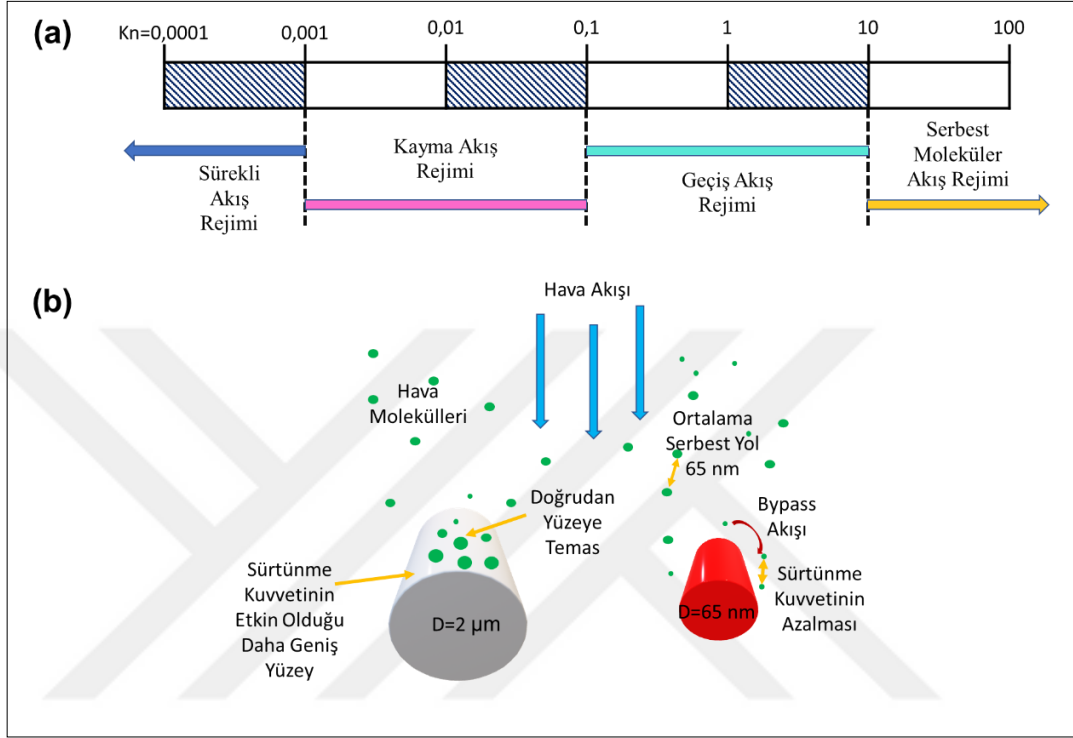
Elektrostatik etkiyle yakalama mekanizması, partiküllerin ve/veya liflerin yüklenmesiyle oluşan elektrostatik etkinin (polarizasyon kuvvetleri ve Coulomb kuvvetleri dahil) partiküllerin izleyeceği yolu değiştirmesi ve bunları filtre yüzeyine çekmesi olarak ifade edilebilir [9], [12]. Bu filtrasyon mekanizması, mikro altı çaplara sahip partikülleri yakalamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrostatik kuvvetin uygulanması, filtrelerin hava direncini korurken filtrasyon verimliliğini artırabilir [2].



Şekil 2.8: Lifli hava filtrelerinde partiküllerin filtrasyon mekanizmaları (a) yakalanma etkisi, (b) atalet etkisi, (c) difüzyon etkisi, (d) elektrostatik etkisi ve (e) yerçekimi etkisi.

$5 \mu\text{m}$ 'den büyük partiküller yer çekiminin etkisiyle belirgin aşağı yönlü hareket gösterirler. Ancak bu mekanizma, partiküller genellikle filtre yüzeyine ulaşmadan önce gerçekleştiğinden genel hava filtreleri için geçerli değildir [9]. Partiküller $0,5 \mu\text{m}$ 'den küçük olduğunda ise yer çekimi etkisiyle partiküllerin çökmesi mekanizması göz ardı edilebilir [2], [12]. Bu nedenle yüksek verimli hava filtrelerinde bu etkinin pek önemi yoktur. Partiküllerin boyutlarına göre filtrasyon süreci farklı

yakalama mekanizmaları üzerinden gerçekleşir. Endüstriyel ve akademik alanlarda yapılan çalışmalara göre, genellikle 300 nm boyutundaki partiküllerin nüfuz edici partikül boyutu olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple çalışmalarda filtre testleri bu boyuttaki aerosoller kullanılarak yapılır [2].



Şekil 2.9: (a) Kn'ye göre akışın sınıflandırılması ve (b) kayma akışının gösterilmesi.

Filtreyi oluşturan liflerin çap uzunlukları yardımıyla filtre yüzeyindeki gaz akış rejimi dört gruba ayrılabilir: serbest moleküler akış rejimi, geçiş akış rejimi, kayma akış rejimi ve sürekli akış rejimi (Şekil 2.9.a) [38]. Farklı akış rejimleri Knudsen sayısı (Kn) ile tanımlanabilir. Kn ise taşıyıcı gazın ortalama serbest yolunun AFD'ye bölünmesiyle eşitlik 2.1 kullanılarak hesaplanır [38].

$$Kn = \frac{2\lambda}{AFD} \quad (2.1)$$

burada λ , gazın ortalama serbest yol uzunluğudur (hava için standart koşullarda λ , 0,065 µm'dir). Liflerin çapı nano boyuta indirildiğinde, liflerin çevresindeki hava akışının aerodinamik davranışı önemli ölçüde değişecektir. Hava akışı, hava moleküllerinin ortalama serbest yolu (λ) ile ilişkilidir ve şu şekilde tanımlanır:

$$\lambda = \frac{kT}{\pi P d^2 \sqrt{2}} \quad (2.2)$$

burada k, Boltzmann sabitini; d, hava moleküllerinin etkin çapını; T, havanın sıcaklığını ve P standart atmosfer basıncını temsil etmektedir. Genellikle, 1 μm^3 havada $2,54 \times 10^7$ hava molekülü bulunmaktadır ve komşu iki hava molekülü arasındaki (standart sıcaklık, T= 288 K ve atmosferik basınçta, P=1,01 x 10⁵ N/m²) ortalama uzaysal mesafe 0,0034 μm 'dir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda, AFD 65 nm'ye yaklaştığında lif yüzeyi ile hava arasındaki sürtünme kuvvetinde önemli bir düşüş olacak ve lif yüzeyindeki hava akışı sıfırdan farklı bir değer olarak kayma akışı sergileyecektir (Şekil 2.9.b) [38].

Nanolifler üzerindeki gaz akışı geçiş akış rejimindedir ve karşılık gelen Kn değeri 0.25 ile 10 arasında değişiklik gösterir [38], [39]. Knudsen sayısı 0.1 ile 10 arasında değişir. Bu aralığa göre dört tip akış rejimi bulunmaktadır: serbest moleküler akış rejimi (Kn > 10), geçiş akış rejimi (0,1 < Kn ≤ 10), kayma akış rejimi (0,001 < Kn ≤ 0,1) ve sürekli akış rejimi (Kn ≤ 0,001) [36], [38]. Akış geçiş rejimindeyken kayma akışının varlığından bahsedilebilir. Kayma akışı, lif etrafında hareket eden hava hızının lif yüzeyinde gerçekleşen sürtünme kuvvetinin etkisiyle sıfırlanmama durumu olarak ifade edilebilir [40].

2.6. Taguchi Deney Tasarımı

Lif oluşum süreci yukarıda bahsedilen çok sayıda değişken parametreden etkilendiğinden, lif çapını optimize etmek için deney tasarım yöntemlerinden yararlanmak oldukça pratiktir [41]. Taguchi deney tasarımı, mühendislik ve istatistik kavramlarını birleştirerek üretim kalitesini artırmak ve üretim maliyetinden tasarruf ederek verimli ve istikrarlı üretim seviyesine ulaşmayı amaçlamaktadır. Bu yöntem, bilimsel araştırmalarda ve mühendislik çalışmalarında yaygın olarak kullanılmaktadır [39]. "Ortogonal Diziler" (OD) ise, istenen çıktıya uygun iyi ayarlanmış deney kombinasyonu sağlayarak optimizasyonların amaç fonksiyonları olarak hizmet eder ve veri analizi yapılırken optimum sonuçların tahmininde yardımcı olur [42]. Tam faktöriyel emsallerine göre deney sayısının daha az olmasıyla hem zamandan hem de üretim maliyetinden tasarruf sağlayan OD'lar oldukça dikkat çekicidir [43]. Farklı yöntemler kullanılarak nanolif üretimlerinin optimize edilmesine kıyasla hem

zamandan hem de üretim maliyetinden tasarruf sağlayan OD'lar, bozan etkenlere karşı oldukça dayanıklı bir deneysel tasarım yöntemi olan Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılmıştır [35], [43].

Taguchi deney tasarım yöntemi, lif üretimini etkileyen parametrelerin optimum seviyelerine karar vermek için sinyal-gürültü oranını (S/N) kullanır. Hedeflenen sonuçlara göre bu oranın hesaplanmasında üç farklı formül kullanılmaktadır [35]. Bunlar “nominal-en iyisi” yaklaşımı (eşitlik 2.3), “en küçük en iyi” yaklaşımı (eşitlik 2.4) ve “en büyük en iyi” yaklaşımıdır (eşitlik 2.5) [35], [44]:

$$\text{nominal-en iyisi} \quad S/N = 10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{Y}_i^2 \right) \quad (2.3)$$

$$\text{en küçük en iyi} \quad S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (2.4)$$

$$\text{en büyük en iyi} \quad S/N = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 1/Y_i^2 \right) \quad (2.5)$$

Y_i , i numaralı deneyin AFD'sini belirtirken, n deney sayısıdır.

Taguchi yönteminde deneysel süreç optimizasyonu için, ilk olarak proses parametreleri seçilir ve her bir proses parametresindeki seviye sayısına karar verilir. Daha sonra parametre sayısı ve parametre seviyelerine göre kullanılacak OD'ler belirlenir. OD'lere göre deneyler yapılır ve hedeflenen özellik ölçülür. Deneysel tasarım programları kullanılarak performans istatistikleri yapılır ve seviyelerin en iyi değerleri belirlenir. Belirlenen parametre seviyelerinde yapılan deney sonucunda en iyi olduğu iddia edilen numunenin hedeflenen değeri ölçülür. Ölçümü yapılan özellik hesaplanan toleransta ise optimizasyon işlemi tamamlanır, eğer değilse iki veya daha fazla parametrenin birleşik etkileri analiz edilir [45]. Optimizasyon çalışmasının amacı, minimum varyansla en küçük AFD değerine sahip lifi belirlemek olduğundan, en yüksek S/N değerine sahip parametre seviyeleri optimum koşulu verir [35].

Taguchi yöntemiyle deney tasarımında S/N oranları belirlendikten sonra varyans analizi (ANOVA) yapılarak deneysel çalışma için seçilen parametrelerin önem dereceleri belirlenir [36], [45].

2.7. Literatürde Hava Filtrelerinde PSU Liflerinin Kullanımı

Polimer bazlı lifli hava filtresi membranlarının geliştirilmesinde literatürde ve endüstride poliakrilonitril (PAN) [46], poliviniliden florür [47], polivinil pirolidon [48], naylon 6 [49], polivinil alkol [50], jelatin [9], polipropilen [51], polimetil metakrilat [52], polietilen tereftalat [53], polistiren [54]'de dahil olmak üzere çeşitli yüksek moleküler ağırlıklı polimerler ve bunların kombinasyonları araştırılmıştır. Ayrıca bu polimerlerle nanolif üretiminde farklı eğirme yöntemleri kullanılmıştır. Buna karşın, elektro eğirme yöntemi ile üretilen PSU liflerinin su arıtma [55], atık su arıtma, su yüzeyinden petrol sızıntısının giderilmesi [56], ilaç salınımı [57], süper kapasitörler [58], hemodiyaliz [59], anyon değişim membranlı yakıt hücreleri [60] ve proton değişim membranlı yakıt hücreleri [61] gibi alanlarda yapılmış çalışmaları bulunurken hava filtrelerinin üretimi için PSU üzerine yoğunlaşan sınırlı sayıda çalışma vardır [6], [11], [14].

Zhang ve arkadaşlarının 2016 yılında yapmış oldukları çalışmada, PSU ve PAN kullanılarak ES ile kompozit hava filtresi üretimi yapılmıştır. Çalışmada kullanılan çözeltilerin konsantrasyonları ağırlıkça %9 PAN ve ağırlıkça %22 PSU olacak şekilde polimerlerin dimetilformamid (DMF) içerisinde çözünmesiyle hazırlanmıştır. Üretim için 4 adet besleme şırıngası kullanılarak PAN/PSU şırınga oranları (4:0/ 3:1/ 2:2/ 1:3/ 0:4) değiştirilerek üretimler gerçekleştirilmiştir. Daha dayanıklı ve stabil bir filtre ortamı oluşturmak için polietilen oksit (PEO) kullanılmıştır. PEO katkısı ile fiziksel bağlar oluşturmak hedeflenerek şırınga oranı (3:1, PAN/PSU) sabit tutulmuş ve farklı PEO yüzdeleri (%0.5, 1, 1.5 ve 2) PAN çözeltisine katılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda, mikro boyutta üretilen PSU ve nano boyutta üretilen PAN lifler ile kompozit bir filtre ortamı oluşturulmuştur. PEO kullanımı ve farklı lif çapına sahip lifler sayesinde por dağılımı ayarlanarak kabarık bir filtre elde edilmiş ve bu sayede filtre boyunca basınç düşüşü azaltılarak filtrasyon verimliliği artırılmıştır [14].

Zhang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada polimerlerin sıralı olarak püskürtülmesi için ES kullanılmış ve iyi entegre olmuş PSU / PAN / Poliamit-6 hava filtresi üretilmiştir. PSU mikro lif (~1 µm çapında) katmanı, PAN nanolif (~200 nm çapında) katmanı ve Poliamit-6 nano-ağ (~20 nm çapında) katmanı kullanılarak kademeli bir filtre ortamı elde etmek hedeflenmiştir. Elde edilen liflerin filtre testleri 300 nm boyutunda partiküller kullanılarak yapılmış ve testler sonucunda filtrasyon

veriminin %99.992 olduğu raporlanmıştır. Ayrıca üretilen kompozit filtrenin hidrofobik yapıya sahip olduğu ve WCA değerinin 130° olduğu belirtilmiştir. Çalışmadaki tüm katmanlar ayrı olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında üretilen liflerin yüzey morfolojileri, mekanik dayanımları ve filtrasyon performansları detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca çalışmada, filtrasyon verimliliği farklı biriktirme sürelerinde detaylı bir şekilde incelenmiş ve filtre performansları ticari olarak kullanılan filtreler ile karşılaştırılmıştır [6].

Wan ve arkadaşları tarafından 2014 yılında yapılan çalışmada PSU ve titanyum dioksit (TiO₂) partikülleri kullanılarak süper hidrofobik özellikli hibrit hava filtresi elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan çözücü karışımı DMF/ N-Metil-2-Pirrolidon (NMP) oranı ayarlanarak PSU liflerinin çapı 1,15 µm'den 1,13 µm'ye düşürülmüş ve nano boyutlu gözenekler elde edilmiştir. Çözücü ortamına NMP'nin (kaynama noktası, 203°C) katılmasıyla çözücünün buharlaşma hızının yavaşlaması ve böylece jetlerinin ıslak kalma süresinin uzatılarak liflerin daha uzun süre gerilmesi amaçlanmıştır. En yüksek filtrasyon verimine sahip NMP/DMF oranının %50 ve %0 olduğu PSU çözeltilerine farklı oranlarda TiO₂ (%2,5-10) nano partikülleri ilave edilmiştir. En yüksek temas açısı değerinin elde edildiği %5 TiO₂ katkısına sahip liflerin filtre performansları katkısız PSU lifleri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak elde edilen pürüzlü yüzeye sahip hibrit membranlar 152° temas açısı, %99,97 filtrasyon verimliliği ve 45,3 Pa basınç düşüşü sergilemiştir [11].

Chen ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada bal peteği yapısının sahip olduğu yapısal bütünlük ve yüksek mukavemet özelliklerinden esinlenerek hava filtresi membranı geliştirmeyi amaçlamışlardır. Bu amaçla toplayıcı yüzey bal peteği benzeri geometrik yapıda tasarlanmıştır. Çalışmada geliştirilen filtre, ağırlıkça % 25 PSU/DMF çözeltisi ile ağırlıkça %5 Poliüretan/ aseton:DMF (1:1) çözeltisi hazırlanarak ES ile çözeltilerin eş zamanlı olarak karşıt yönlerden toplayıcı yüzeye püskürtülmesiyle üretilmiştir. Elde edilen yüzey potansiyeli yüksek filtrelerin filtrasyon performansları hem organik hem de inorganik kirleticiler kullanılarak test edilmiştir [62].

Literatür çalışmalarında, özellikle ES ile üretilmiş PSU mikro liflerin hava filtresi olarak kullanımları incelenirken, nanoliflerinin filtre performanslarının incelenmesi konusunda EBS ile yapılmış bir çalışma bulunmamaktadır. Tez çalışması kapsamında, yenilikçi bir teknik olan EBS kullanılarak PSU nanolif üretiminin optimize edilmesi ve üretilen nanoliflerin hava filtresi olarak kullanımlarının detaylı

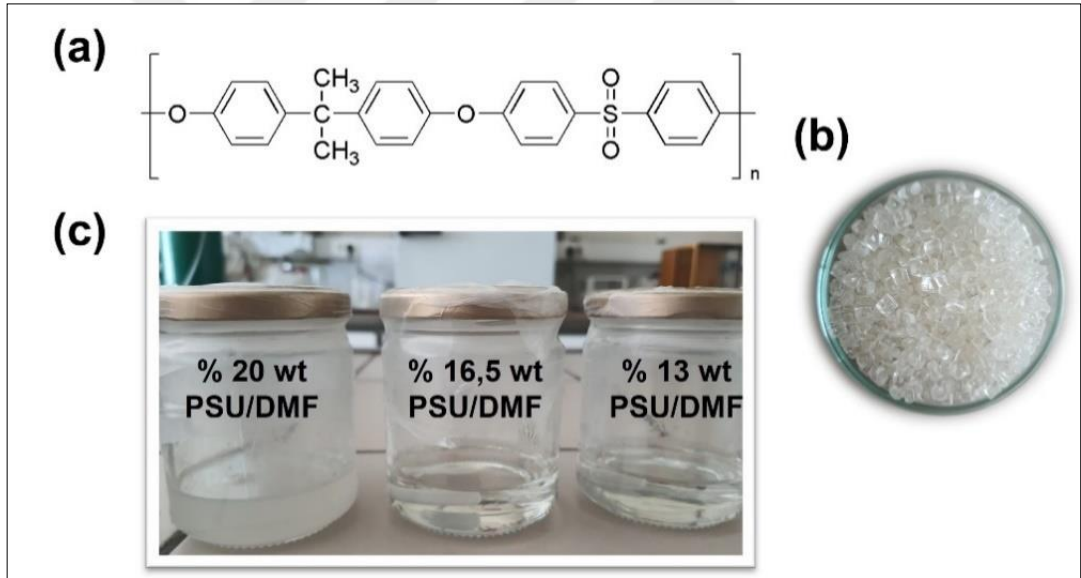
olarak incelenmesi amaçlanmıştır. Bu sayede tek polimer bileşenli hava filtresi olarak alışılmayan PSU nanoliflerinin gelecekte yapılacak çalışmalar için yol gösterici nitelikte olması hedeflenmiştir.



3. MALZEME ve YÖNTEM

3.1. Malzemeler

Tez kapsamında, çözültiden/elektro üfleme tekniği kullanılarak nanolif üretmek için yüksek kimyasal ve mekanik dayanıma sahip bir polimer olan polisülfon (PSU) seçilmiştir. PSU'nun kimyasal yapısı Şekil 3.1a'da gösterilmiştir. Çalışmada kullanılacak olan PSU granülleri (Şekil 3.1b) SOLVAY, Almanya şirketinden temin edilmiş olup 65.000-75.000 dalton ortalama molekül ağırlığına sahiptir. PSU granüllerini çözmek için organik bir çözücü olan DMF (Carlo Erba) seçilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen nanoliflerin porozite değerlerinin belirlenmesi için izopropil alkol (IPA, Merck) kullanılmıştır. Tüm malzemeler analitik saflıkta olup, saflaştırılmadan kullanılmıştır.



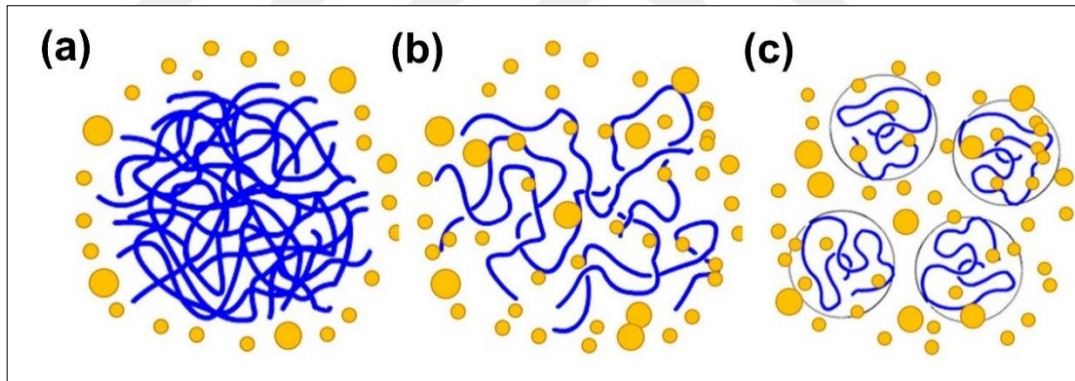
Şekil 3.1: (a) PSU'nun kimyasal yapısı; (b) PSU granülleri; (c) farklı konsantrasyonlarda hazırlanan PSU/DMF çözeltileri.

3.2. Çözeltilerin Hazırlanması

EBS ile nanolif üretimini etkileyen ayarlanabilir parametreler (çözelti konsantrasyonu, hava basıncı, uygulanan voltaj, toplayıcının dönme hızı, toplayıcı ve iğne arasındaki mesafe, iğnenin iç çapı, besleme hızı ve homojenizatörün kayma hızı) yapılan ön çalışmalar ile araştırılmıştır. Bu çalışmaların neticesinde, incelenecek

parametreler çözelti konsantrasyonu, hava basıncı ve uygulanan voltaj olarak seçilmiştir. Çalışılacak konsantrasyon aralığının belirlenmesi amacıyla farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %10-25 PSU/DMF) tek üretimlik çözeltiler hazırlanmıştır. Üretimler, belirlenen diğer parametrelerin (hava basıncı ve uygulanan voltaj) sabit tutulan değerlerinde Taylor konisinin yapısı gözlenerek gerçekleştirilmiştir. Sonrasında hızlı gözlem yapmak amacıyla optik mikroskop kullanılmış ve lif oluşumunun düzenli olduğu konsantrasyon aralığı ağırlıkça %13-20 PSU/DMF olarak tespit edilmiştir. PSU granüllerinin DMF'ye eklenmesi ve ardından iki gece boyunca oda sıcaklığında karıştırılmasıyla farklı konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır (Şekil 3.1c).

Nanolif üretiminde polimer zincirlerinin düzgün bir şekilde uzayarak incelmesini sağlayan gevşemiş polimer ve çözücü içeren kürecik formunun (Şekil 3.2) [63] kazanılması için uzun süreli karıştırma oldukça önemlidir [63]. Bu durum, bir ve iki gün karıştırma sürelerinde aynı konsantrasyonda hazırlanan iki çözeltinin üretim performanslarında açıkça gözlenmiştir.



Şekil 3.2: Polimer moleküllerinin çözünmesinin şematik gösterimi, mavi çizgiler polimer zincirlerini sarı noktalar ise çözücü moleküllerini temsil eder. (a) katı polimer moleküllerinin bir çözücüye eklendikten hemen sonraki durumu; (b) şişmiş bir polimerik jel; (c) bir çözücü içinde dağılmış ve kümelenmiş polimer molekülleri.

3.3. Taguchi Yöntemiyle Nanolif Üretiminin Tasarlanması

İstatistiksel çalışmanın amacı, seçilen parametre seviyelerinin lif çapı üzerindeki etkisini gözlemlemektir. Tez çalışması kapsamında, yapılan ön çalışmalarla belirlenen parametreler için sınır değerleri aralığında Taguchi L9 OD'sine uygun üç farklı seviye

belirlenmiştir. Tablo 3.1’de belirtilen seviyelerin MINITAB 19 yazılımına girilmesiyle elde edilen deney setleri ise Tablo 3.2’deki gibidir.

Tablo 3.1: EBS kullanılarak PSU nanolif üretiminde seçilen üç parametre ve seviyeleri.

Kod	Parametre	Parametre Seviyeleri		
		1	2	3
C	Konsantrasyon (% wt)	13	16,5	20
P	Hava basıncı (bar)	3	4	5
V	Uygulanan voltaj (kV)	0	7,5	15

Tablo 3.2: Taguchi L9 OD’sine göre yapılan deney tasarımı.

Deney kodu	Parametre kombinasyonu	Parametreler		
		C	P	V
E1	C ₁₃ P ₃ V ₀	13	3	0
E2	C ₁₃ P ₄ V _{7,5}	13	4	7,5
E3	C ₁₃ P ₅ V ₁₅	13	5	15
E4	C _{16,5} P ₃ V _{7,5}	16,5	3	7,5
E5	C _{16,5} P ₄ V ₁₅	16,5	4	15
E6	C _{16,5} P ₅ V ₀	16,5	5	0
E7	C ₂₀ P ₃ V ₁₅	20	3	15
E8	C ₂₀ P ₄ V ₀	20	4	0
E9	C ₂₀ P ₅ V _{7,5}	20	5	7,5

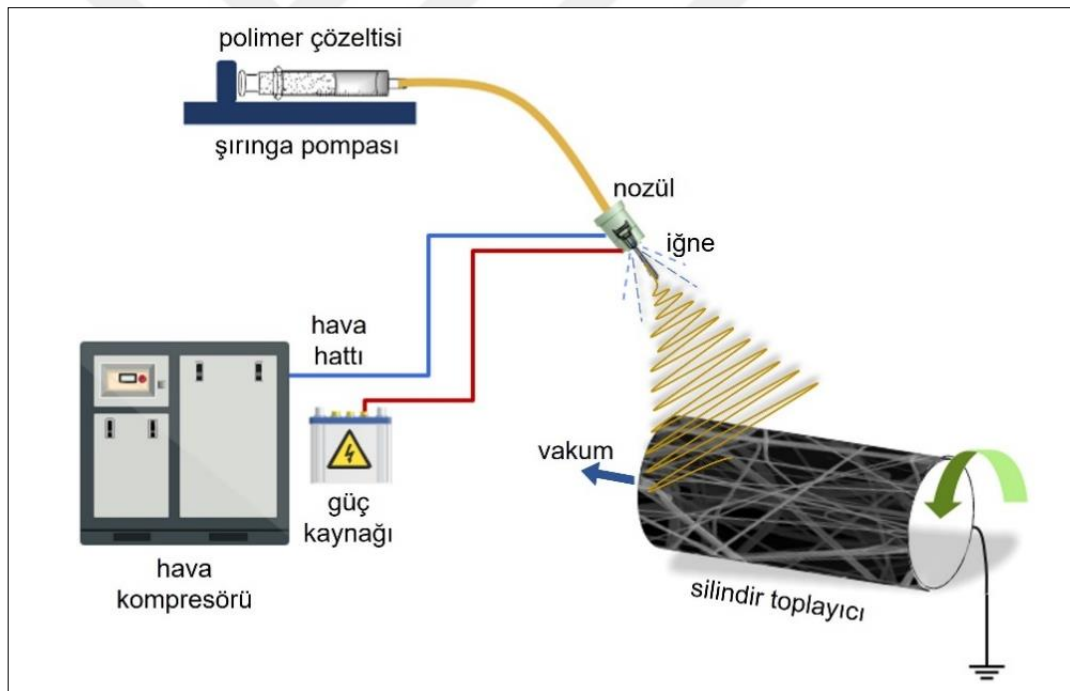
Tez çalışmasında amaç, üretilen liflerin ortalama çapını en aza indirmek olduğundan “en küçük en iyi” yaklaşımı seçilir ve S/N oranı eşitlik 2.4 ile hesaplanır. Kullanılan parametrelerin, numunelerin AFD’lerini etkileme derecesinin belirlenmesi amacıyla çıktı değerlerine ANOVA uygulanmıştır. Seçilen üç parametrenin AFD üzerine yüzde katkısı eşitlik 3.1 aracılığıyla MINITAB 19 yazılımı kullanılarak hesaplanmıştır [34]:

$$P_i = \frac{S_i}{S_T} \times 100 \quad (3.1)$$

P_i yüzde katkı, i parametre sayısıdır (bu çalışma için $i = 3$), S_i her parametrenin lif çapı çıktısına katkısını ve S_T toplam parametre katkısıdır.

3.4. Deney Düzeneği ve Nanolif Üretimi

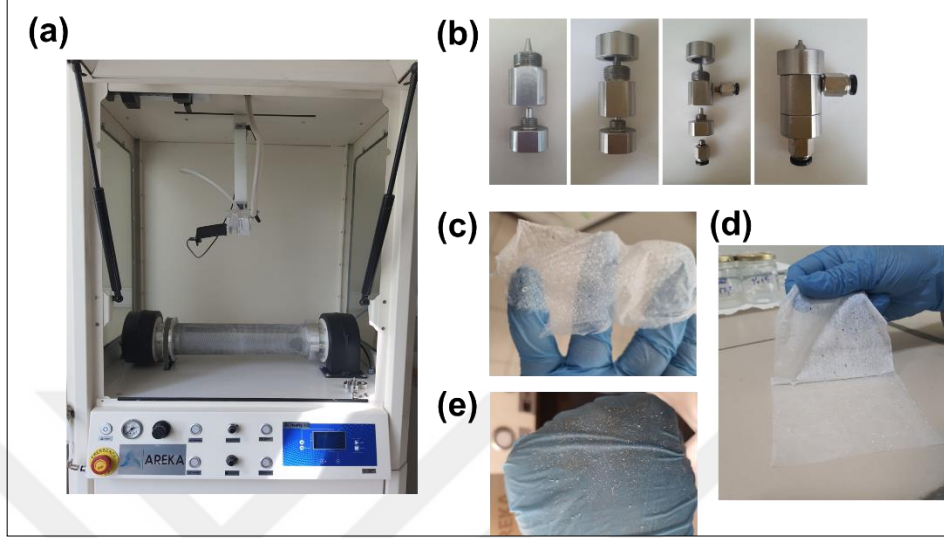
EBS deney düzeneği (Şekil 3.3), polimer çözeltisinin belirli bir debiyle hareket etmesini sağlayan şırınga pompası, hava ve polimer çözeltisini aynı düzlemde bir araya getiren nozül, havayı basınçla ileten bir hava kompresörü, oluşan lifleri üzerinde toplayan topraklanmış vakumlu döner silindirik metal yüzey ve bir elektrik güç kaynağından oluşmaktadır.



Şekil 3.3: Deney düzeneğinin şematik gösterimi.

Deneyisel çalışmada kullanılan EBS deney düzeneği Areka Filtrasyon Teknolojileri Ltd. şirketi tarafından üretilmiştir (Şekil 3.4a). Elde edilen homojen, renksiz PSU çözeltileri (ağırlıkça %13, 16,5 ve %20), 10 mL'lik bir tıbbi şırınga yardımıyla çekilip, şırınga pompasına yerleştirilir. Polimer çözeltisi ve kompresörden gelen hava nozüle polipropilen boru yardımıyla ulaştırılır. 21G tek kullanımlık metal

iğnenin (0.819 mm dış çap, 0.514 mm iç çap) ucu zımpara kâğıdı yardımıyla törpülenerek düzleştirilir ve nozüle takılır. Ardından rakorlar da takılarak nozül kapatılır (Şekil 3.4b) ve güç kaynağının da sisteme bağlanmasıyla sistem çalıştırılır.



Şekil 3.4: (a) EBS deney düzeneği; (b) deney sisteminde kullanılan nozülün birleştirilmesi; (c) lif oluşumu; (d) lif-damlacık oluşumu; (e) damlacık oluşumu.

Ticari olarak temin edilen 20 g/m² dokusuz kumaş ile toplayıcı yüzeyi kaplanır. Deneyler üç farklı konsantrasyon (ağırlıkça %13, %16,5, %20), üç farklı hava basıncı (3, 4, 5 bar) ve üç farklı voltaj (0, 7,5, 15 kV) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında iğne ucu ile toplayıcı yüzey arasındaki mesafe ve çözelti akış hızı sırasıyla 35 cm ve saatte 9 mL olarak ayarlanmış ve tüm deneyler boyunca sabit tutulmuştur. Ayrıca toplayıcının dönüş hızı, enjeksiyon pompasını yatay hareket ettirerek liflilerin homojen dağılımını sağlayan homojenizatörün hızı ve kullanılan iğnenin çapı tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Deneyler sonucunda, lif (Şekil 3.4c), lif-damlacık (Şekil 3.4d) ve sadece damlacık (Şekil 3.4e) yapıları gözlenmiştir.

3.5. Karakterizasyon Testleri

3.5.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

PSU liflerinin morfolojisi, 15 kV'luk hızlanma voltajında performans gösteren Philips XL30 SFEG marka SEM ile incelenmiştir. Deney numunelerinin AFD'leri

yakalanan SEM görüntüleri kullanılarak Image J açık kaynak yazılımı ile en az 100 noktadan alınan ölçümler ile hesaplanmıştır.

3.5.2. Porozite Ölçümü

Nanoliflerin poroziteleri (ϵ), gravimetrik yaklaşımla incelenen yapının boşluk hacmi olarak tanımlanır. Porozite değerlerinin belirlenmesi amacıyla 2 cm×2 cm kesilen numuneler izopropil alkol (IPA) içerisine daldırılır. Lifli numunelerin kuru ve ıslak (IPA'ya daldırıldıktan sonra) ağırlıkları not edildikten sonra ve porozite değerleri eşitlik 3.2'teki denklem kullanılarak hesaplanmıştır [64]:

$$\epsilon = \frac{(m_{\text{ıslak}} - m_{\text{kuru}})/\rho_1}{((m_{\text{ıslak}} - m_{\text{kuru}})/\rho_1) + (m_{\text{kuru}}/\rho_2)} \quad (3.2)$$

m, lifli numunesinin ağırlığı (g), ρ_1 ve ρ_2 , sırasıyla IPA ve polimerin ($\rho_{\text{IPA}} = \text{g/cm}^3$ ve $\rho_{\text{PSU}} = 1.24 \text{ g/cm}^3$) yoğunluklarıdır.

3.5.3. Temas Açısı (WCA)

Numunelerin ıslanabilirlik davranışları, KSV CAM 200 marka WCA cihazı kullanılarak hava atmosferinde yaptığı WCA değerleri ölçülerek incelenmiştir. Deneyler, bir mikro şırınga yardımıyla numunenin üzerine 5 μL saf su damlatılması ve akabinde yüzey ile yaptığı açının ölçülmesiyle gerçekleştirilmiştir. Temas açıları, farklı yüzey konumlarından üç farklı ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Tüm deneyler oda sıcaklığında yapılmıştır [65].

3.5.4. Çekme Testi

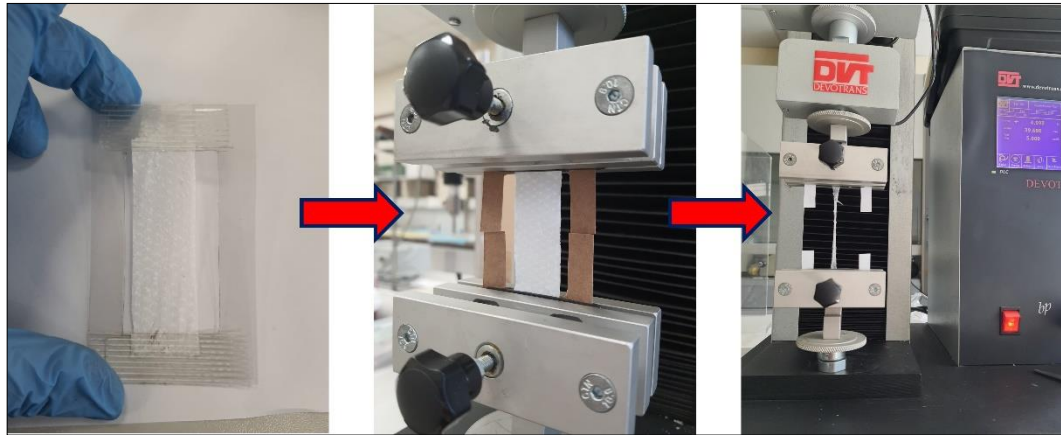
Nanolif biriktirme süresinin stres ve gerinim davranışı üzerine etkisini gözlemlemek amacıyla numunelere çekme testleri yapılmıştır. Lifli malzemelerin çekme mukavemeti (σ) klasik yaklaşımla uygulanan kuvvetin kesit alanına (üretilen lifli yapının kalınlığı ile genişliğinin çarpımı) oranlanmasıyla hesaplanır. Liflerin çekme testleri klasikleşmiş ISO 9073 standardına göre yapıdaki heterojen dağılımdan kaynaklanabilecek düzensizlikleri önlemek için 50 mm genişliğinde ve 200 mm uzunluğunda numune kullanılarak incelenir [11,66]. Ancak, lifli malzemelerin

uzunluk ve genişlik ölçümleri basit iken kalınlık ölçümleri oldukça zordur. Test ve boyut ölçümü esnasında kolayca deforme olabilen yüksek poroziteli (~%90) lifli malzemeler için klasik yaklaşımın kullanılmasının sonuçların güvenilirliğini ciddi şekilde etkilediği iddia edilmiştir. Bu nedenle, Maccaferri ve ark. kalınlık ölçümünden kaynaklanan olası hatayı telafi etmek için klasik yaklaşımlar (ISO 9073 ve BS EN 29073) yerine stres formülü için kütle tabanlı bir normalizasyon yaklaşımı önermiştir. Bu yaklaşım, "klasik yaklaşımı" yeniden formüle eder ve stresi (σ)(eşitlik 3.3), polimer yoğunluğunun ($\rho_{PSU} = 1.24 \text{ g/mm}^3$), uygulanan kuvvetin (N) ve numune uzunluğunun (L_0) numune kütlesine (m) oranı olarak tanımlar [67]:

$$\sigma_{eq} = \rho_{PSU} \frac{F}{m} L \quad (3.3)$$

burada ρ_{PSU} , PSU'nun yoğunluğudur (mg/mm^3), F uygulanan kuvvettir (N) ve m numune kütlesidir (mg).

Test gerçekleştirilirken makine fişküründe kaymayı önlemek amacıyla, Şekil 3.5'te de görülebileceği gibi önceden hazırlanan çerçeveye 5 cm × 2 cm boyutlarında kesilen numuneler yapıştırılır ve cihazın çeneleri arasına yerleştirilir. Cihaz üzerinde gerekli ayarlamalar yapıldıktan sonra 5 mm/dk çekme hızında test gerçekleştirilir. Nanolifler, Devotrans DVT BP D NN test cihazı kullanılarak test edilmiştir.



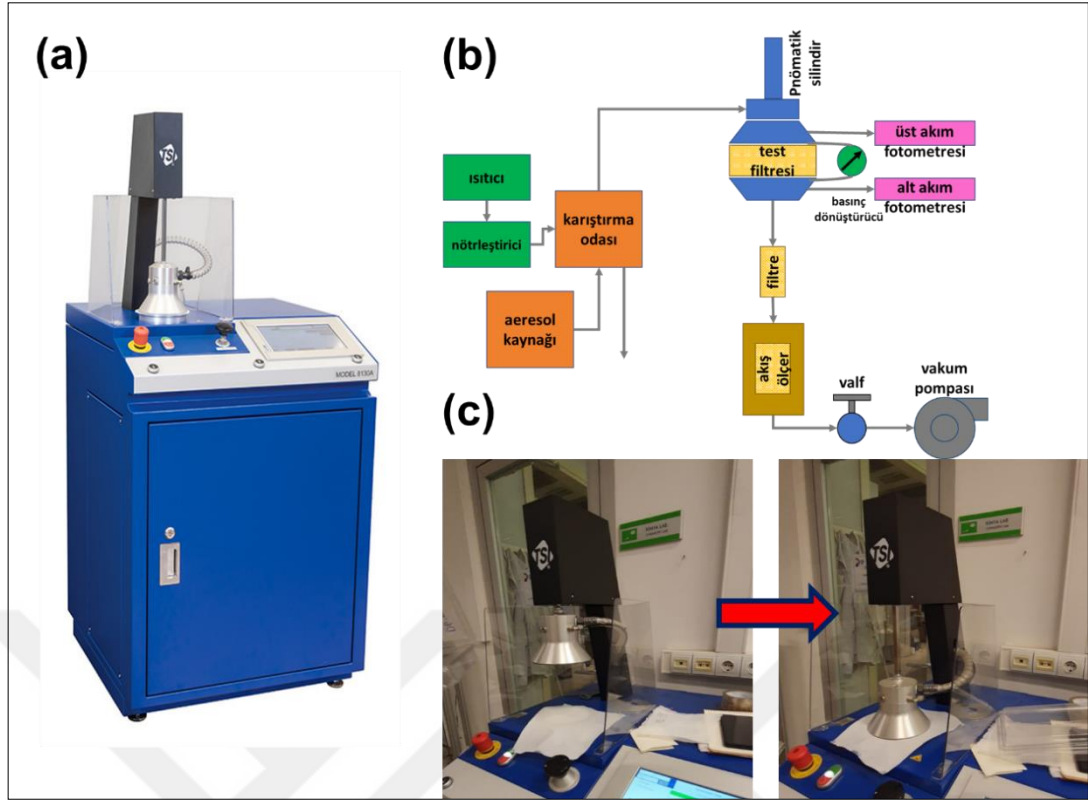
Şekil 3.5: Test numunesinin hazırlanması ve çekme testinin yapılması.

3.5.5. Filtrasyon Performanslarının İncelenmesi

Numunelerin filtrasyon özellikleri, TSI Certiest® Model 8130A (Şekil 3.6a) kullanılarak otomatik filtre test cihazı ile ortalama çapı 0,3 µm olan nötralize NaCl partikülleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışma mekanizması Şekil 3.6b’de gösterilen cihaz açıldıktan ortalama 20 dakika sonra numuneler test başlığının altına gelecek şekilde yerleştirilir (Şekil 3.6c). Nötralize NaCl aerosolü, 100 cm² nanolif yüzeyinden belirli bir akış hızında filtre alanına (Şekil 3.6c) gönderilir. Birkaç saniye süren ölçüm sonucunda test başlığı açılır ve yüzeyin iki tarafı arasındaki basınç düşüşü (ΔP) ile filtrasyon verimliliği (η) cihaz tarafından ölçülür [47]. Alt partikül konsantrasyonunun üst partikül konsantrasyonuna oranı olarak tanımlanan penetrasyon teriminin (eşitlik 3.4) alternatif ifadesi olan filtrasyon verimliliği (η) penetrasyon değerinin birden çıkarılmasıyla eşitlik 3.5’te olduğu gibi hesaplanır [36].

$$P = \frac{C_{Alt}}{C_{Üst}} \quad (3.4)$$

$$\eta = 1 - P \quad (3.5)$$



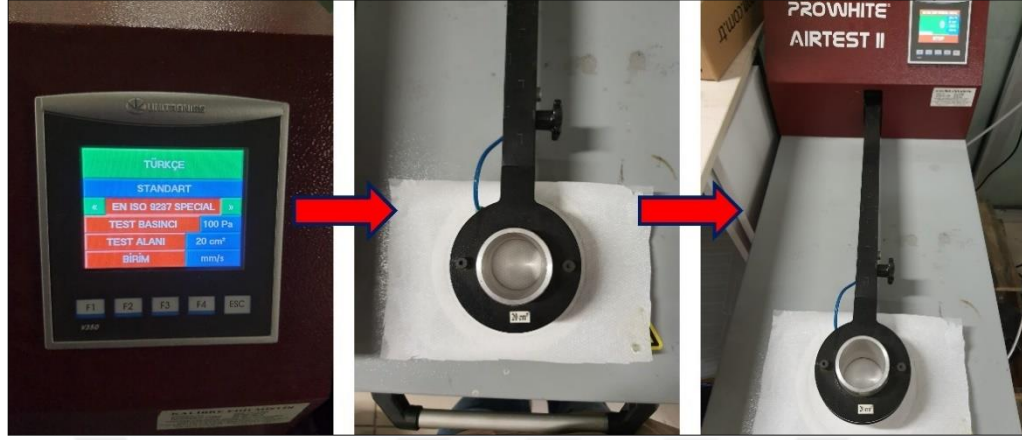
Şekil 3.6: (a) TSI Certiest® Model 8130A filtre test cihazı; (b) filtre test cihazının çalışma mekanizması; (c) deney numunesinin test cihazına yerleştirilmesi ve aerosol geçişi.

Üretilen nanolif filtrelerin filtre performanslarının değerlendirilmesinde QF terimi ve kullanılmıştır [11]. QF, filtre boyunca gerçekleşen basınç düşüşü ile filtre verimliliği arasında kurulan matematiksel bir yaklaşımdır ve eşitlik 3.6 kullanılarak hesaplanır [6], [36]:

$$QF = - \frac{\ln(1-\eta)}{\Delta P} \quad (3.6)$$

Numunelerin hava geçirgenliği performansları, Prowhite Airstest 2 (Şekil 3.7) hava geçirgenlik test cihazı kullanılarak ISO 9237 test standardına göre ölçülmüştür. Cihaz açılarak test için kullanılacak standart kayıtlı değil ise kaydedilir, eğer kayıtlı ise sistemden seçilir. ISO 9237 test standardına uygun 20 cm²'lik test başlığı takıldıktan sonra test kolunun indirilmesiyle 100 Pa basınçta deneyler yapılmıştır. Filtrelerin hava geçirgenlik değerleri, nanolif yüzeyinin üç farklı bölgesinden yapılan ölçümlerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Bu ölçümler, filtre performansının

yüzeyinin farklı bölgelerinde değişkenlik gösterip göstermediği ve nanoliflerin yüzeyde homojen dağılıp dağılmadığı konularında yol gösterici olmuştur.



Şekil 3.7: Hava geçirgenlik testinin yapılması.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında, yüksek filtrasyon verimliliği ve düşük basınç düşüşüne sahip hava filtresinin üretimi için yüksek porozite ve gelişmiş PM yakalama yetenekleriyle ön plana çıkan nanolifler filtre ortamı olarak tercih edilmiştir. Nanoliflerin üretilmesinde kimyasal ve mekanik dayanımı yüksek bir polimer olan PSU tercih edilmiştir. PSU nanoliflerin üretimi, yüksek üretim kapasitesine sahip EBS'nin parametreleri optimize edilerek gerçekleştirilmiştir.

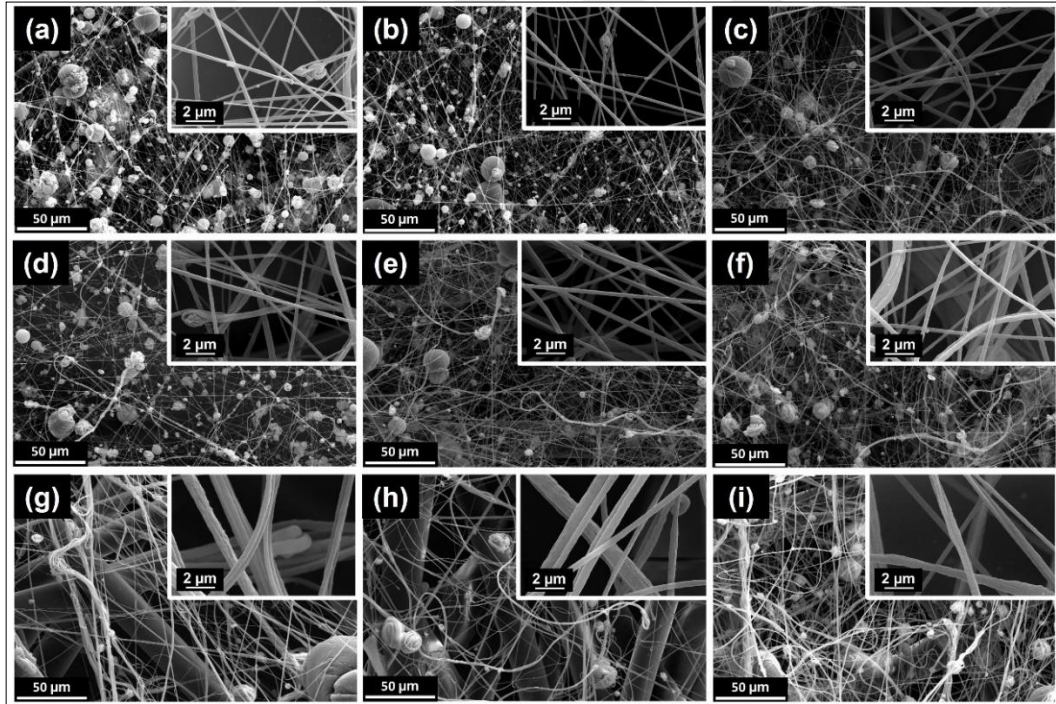
4.1. Çalışma Parametrelerinin Belirlenmesi

EBS ile PSU nanolif üretimini etkileyen birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametrelerden ayarlanabilir parametreler ön çalışmalar yapılarak araştırılmıştır. İlk olarak PSU granüllerinin çözünebileceği uygun bir çözücü seçilmiştir. Yapılan literatür araştırmalarında DMF [11], [14], kloroform [68], NMP [69], dimethylacetamide [69] ve aseton [68], [69] çözücülerinin PSU granüllerini çözmek için tercih edildikleri görülmüştür. Bu amaçla DMF, kloroform ve farklı oranlarda kloroform/aseton, DMF/aseton çözücülerini çalışılmıştır. Bu çözücüler arasından DMF çözücü ortamı olarak seçilmiştir. Ağırlıkça %20 PSU/DMF çözeltisi kullanılarak farklı besleme hızlarında üretimler yapılmış ve besleme hızının lif çapı üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür.

Taylor konisi bozulmaksızın voltaj ve hava basıncının farklı değerlerinde üretimler yapılmış ve optik mikroskop yardımıyla lif oluşumunun sürekli olduğu aralık anlık olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma neticesinde, hava basıncı için 3-5 bar aralığının uygulanan voltaj için ise 0-15 kV aralığının uygun olduğu kanısına varılmıştır. Bu değer aralıklarında yapılan üretimlerde herhangi bir kesinti oluşmamıştır. Çalışılacak konsantrasyon aralığının belirlenmesi amacıyla farklı konsantrasyonlarda (ağırlıkça %10-25 PSU/DMF) tek üretimlik çözeltiler hazırlanmıştır. Diğer üretim koşulları sabit tutularak farklı konsantrasyonlarda deneyler gerçekleştirilmiş ve lif oluşumunun sürekli olduğu aralık ağırlıkça %13-20 PSU/DMF olarak tespit edilmiştir.

4.2. Yüzey Morfolojilerinin İncelenmesi

Taguchi L9 OD'sine göre tasarlanan deneylerin biriktirme süresi 15 dakika olarak belirlenmiştir. Şekil 4.1'de EBS ile belirlenen deney setlerinde üretilmiş (Tablo 3.2) nanoliflere ait SEM görüntüleri bulunmaktadır. Konsantrasyonun birinci seviyesinde (ağırlıkça %13 PSU/DMF) hazırlanan E1, E2 ve E3 deney kodlu numunelerinin morfolojik yapıları incelendiğinde, Şekil 4.1a, 4.1b ve 4.1c'de ultra ince lifler, sıvı damlacıklar ve lif-damlacık yapıları gözlenmektedir. Liflerin üretilmesinde çözültiden çözücünün uzaklaşma süresi oldukça önemlidir. Düşük polimer konsantrasyonunda (yüksek çözücü konsantrasyonu) yüksek hava basıncının kullanılması gaz çözülti ara yüzeyinde gerçekleşen çözücünün buharlaşma hızını artırmıştır [20], [31]. Böylece en yüksek hava basıncı kullanılarak üretilen (ağırlıkça %13 PSU/DMF çözültisi için) E3 deney kodlu numunede damlacık sayısının en aza indiği gözlenmiştir.



Şekil 4.1: Taguchi L9 OD'sindeki deneysel çalışmalardan elde edilen EBS ile üretilmiş PSU nanolif örneklerinin SEM görüntüleri: (a) $C_{13}P_3V_0$, (b) $C_{13}P_4V_{7.5}$, (c) $C_{13}P_5V_{15}$, (d) $C_{16.5}P_3V_{7.5}$, (e) $C_{16.5}P_4V_{15}$, (f) $C_{16.5}P_5V_0$, (g) $C_{20}P_3V_{15}$, (h) $C_{20}P_4V_0$ ve (i) $C_{20}P_5V_{7.5}$.

Ancak yüksek hava basıncı ile yüksek voltaj uygulanması üretilen liflerde dolaşık polimer bobinlerin oluşumunu tetiklemiştir. Bu durumun yüksek hava basıncı uygulanması esnasında çözücünün çözeltiyi hızla terk etmesi nedeniyle polimer zincirlerinin gerilerek uzayıp lif formuna ulaşmadan toplayıcı yüzeye ulaştığı sonucuna varılabilir [20], [70]. Bu sebepten dolayı yüzey morfolojilerinde çözücüsü uzaklaşmış kümelenmiş polimer zincirlerine rastlanmıştır.

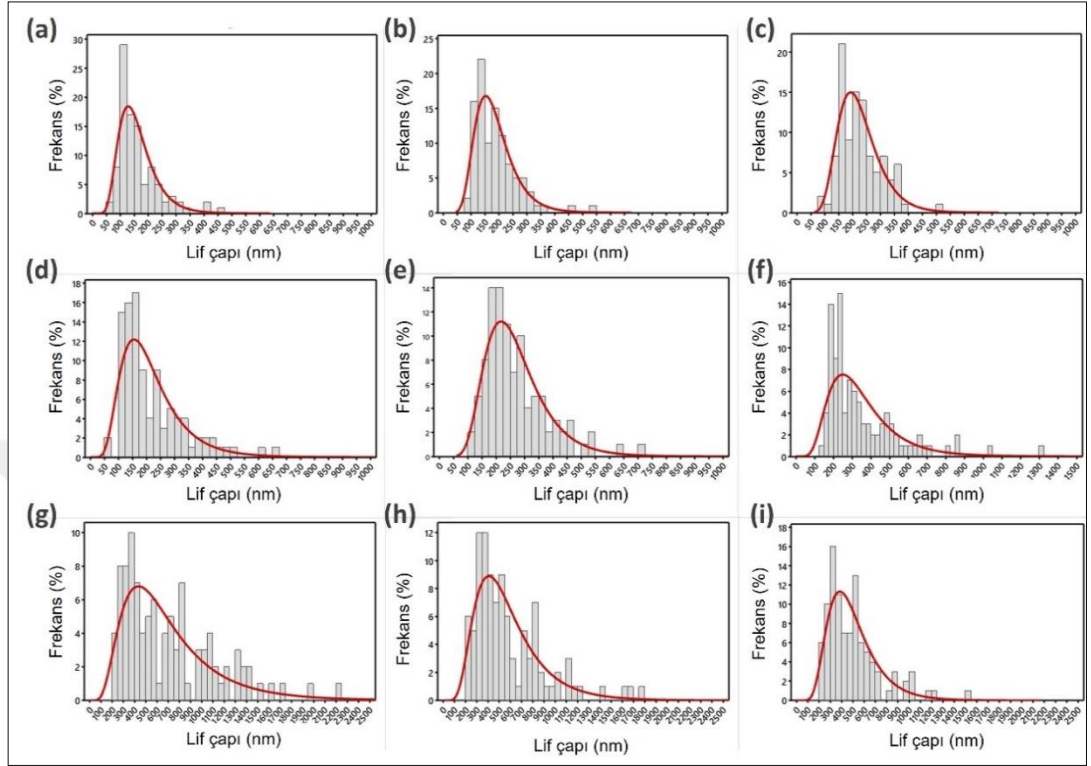
Şekil 4.1d, 4.1e ve 4.1f sırasıyla E4, E5 ve E6 örneklerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Bu üç örnekte ince lifler, sıvı damlacıklar, lif-damlacık ve filament morfolojileri gözlenmiştir. Bu yapılardan farklı olarak E6 kodlu deney numunesinde burgulu filament yapısı da gözlemlenmiştir. E4 kodlu numuneden E6 kodlu numuneye doğru hava hızı arttıkça damlacık ve lif-damlacık yapılarında azalma olduğu görülmüştür. Boncuk yapılarındaki azalmanın nedeni, artan hava hızının bir sonucu olarak çözücü moleküllerinin hızla uzaklaştırılmasıdır. Bunlara ek olarak düşük hava basıncı uygulanması esnasında voltaj uygulanması yarı ıslak liflerin birbirleri ile etkileşerek sürekli kalın birleşmiş lif yapıları ile filament yapılarını oluşturmuştur [71]-[73].

E5 kodlu deneyin SEM görüntülerinde, liflerin daha yüksek voltaj uygulanması nedeniyle E4 ve E6 kodlu deneylere ait SEM görüntülerindeki liflere kıyasla daha fazla gerildiği açıkça görülmektedir. E6 kodlu deneyde, yüksek hava basıncında elektrik alan uygulanmaksızın yapılan üretimin çözücünün difüzyon hızını arttırdığı ve dolaşık bir polimer yapılarının oluşumunu tetiklediği görülmüştür.

En yüksek polimer konsantrasyonuna sahip polimer çözeltisi (ağırlıkça %20 PSU/DMF çözeltisi) kullanılarak üretilen E7, E8 ve E9 kodlu deneylere ait SEM görüntüleri incelendiğinde (sırasıyla Şekil 4.1g, 4.1h ve 4.1i) çözücü oranının düşmesiyle damlacık ve lif-damlacık yapıları kaybolmuştur. Uygulanan basınçlı havanın farklı seviyelerinin çözücü uzaklaştırılmasındaki kritik öneminin azalması sebebiyle uygulanan elektrik alan daha kritik öneme sahip olmuştur. Ayrıca elektrik alan uygulanmasının daha iyi gerilmiş lif yapıları oluşturduğu dolayısıyla liflerin yüzeyde daha homojen dağılmasını sağladığı sonucuna varılmıştır [71].

Taguchi L9 OD'sindeki parametre kombinasyonlarına uygun üretilen nanoliflere ait SEM görüntüleri Image J programı ile açılmış ve liflerin çapları en az 100 farklı noktadan ölçülmüştür. Kaydedilen lif çapı değerleri ile MINITAB 19 yazılımı kullanılarak histogram dağılımları çizilmiştir. Şekil 4.2'de sırasıyla E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7, E8 ve E9 deney kodlu numunelere ait lif çapı değerlerine ait

histogram grafikleri gösterilmiştir. Çizilen histogram grafiklerine karşılık hesaplanan AFD değerleri ile standart sapması değerleri Tablo 4.1’de listelenmiştir.



Şekil 4.2: EBS ile üretilmiş PSU nanoliflerinin lif çapı dağılımlarının histogram grafiği: (a) $C_{13}P_3V_0$, (b) $C_{13}P_4V_{7.5}$, (c) $C_{13}P_5V_{15}$, (d) $C_{16.5}P_3V_{7.5}$, (e) $C_{16.5}P_4V_{15}$, (f) $C_{16.5}P_5V_0$, (g) $C_{20}P_3V_{15}$, (h) $C_{20}P_4V_0$ ve (i) $C_{20}P_5V_{7.5}$.

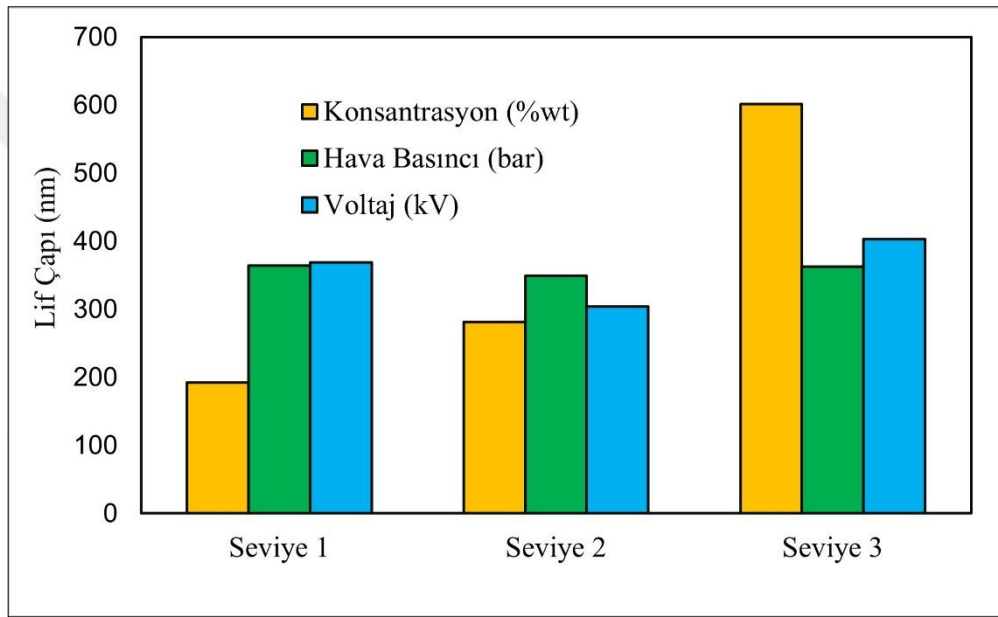
Eşit boyutlarda kesilen nanolif numunelerinin kuru ağırlıkları hassas terazi yardımıyla ölçüldükten sonra 3 saat boyunca IPA içerisinde bekletilmiş ve kâğıt havlu yardımıyla fazla IPA, yapıdan uzaklaştırılmıştır. Daha sonra numunelerin ıslak ağırlıkları yine hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Önceden belirtilen porozite formülü (eşitlik 3.2) kullanılarak numunelerin porozite değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan porozite değerleri Tablo 4.1’de listelenmiştir. PSU nanolifleri %89.70 ile %96.96 arasında değişen porozite değerlerine sahip oldukça gözenekli numunelerdir.

Tablo 4.1: Taguchi OD'sine ait AFD değerleri (standart sapmaları ile), porozite değerleri ve S/N oranları.

Deney Seti	Parametre kombinasyonu	Ortalama lif çapı (AFD) ve standart sapma (nm)	S/N oranları	Porozite (%)
E1	C ₁₃ P ₃ V ₀	163±75	-44,25	95.29
E2	C ₁₃ P ₄ V _{7.5}	188±77	-45,46	96.96
E3	C ₁₃ P ₅ V ₁₅	227±76	-47,12	92.25
E4	C _{16.5} P ₃ V _{7.5}	219±116	-46,78	89.70
E5	C _{16.5} P ₄ V ₁₅	271±112	-48,67	93.51
E6	C _{16.5} P ₅ V ₀	355±203	-50,99	93.09
E7	C ₂₀ P ₃ V ₁₅	711±421	-57,04	92.85
E8	C ₂₀ P ₄ V ₀	588±323	-55,39	91.22
E9	C ₂₀ P ₅ V _{7.5}	505±240	-54,06	93.39
OPT	C ₁₃ P ₃ V _{7.5}	105±34	-	-

Ağırlıkça %13 PSU/DMF çözeltisi ile üretilen E1, E2 ve E3 numunelerinin AFD'leri sırasıyla 163±75 nm, 187±77 nm ve 227±76 nm olarak ölçülmüştür. E1'den E3'e numunelerin AFD'lerinin artmasının ana nedeni, hava hızı ve voltajındaki kademeli artıştır. Yüksek çözücü konsantrasyonlarında hava hızının çok artması dolaşık polimer zincirlerini barındıran kürecik formundan çözücünün hızla uzaklaşmasını sağlayıp polimer zincirlerin toplayıcıya ulaşma süresini kısaltırken aynı anda uygulanan yüksek elektrik alan polimer zincirlerini gerip uzatmak için gerekli zamanı bulamamıştır. E1, E6 ve E8 numuneleri, elektrik alan uygulanmadan sırasıyla 3 bar, 5 bar ve 4 bar hava basıncında sırasıyla ağırlıkça %13, %16,5 ve %20 polimer çözeltisi kullanılarak üretilmiştir. E1, E6 ve E8 kodlu deneylerin AFD'leri sırasıyla 163±75 nm, 355±203 nm ve 588±323 nm olarak belirlenmiştir. Buradan polimer konsantrasyonu arttıkça AFD'nin arttığı ve lif çapı dağılımının genişlediği sonucuna varılabilir [73]. Voltaj etkisi hariç tutularak hava basıncının AFD üzerindeki etkisi incelendiğinde, artan hava basıncının düşük konsantrasyonlarda AFD değerlerini arttırdığı tespit edilmiştir. Bu durumun aksine, yüksek konsantrasyonlarda (ağırlıkça %20 PSU/DMF), hava hızı arttıkça, E7 (AFD: 711±421 nm), E8 (AFD: 588±323 nm) ve E9 (AFD: 505±240 nm) numunelerinin AFD'lerinde kademeli bir düşüş gözlenmiştir.

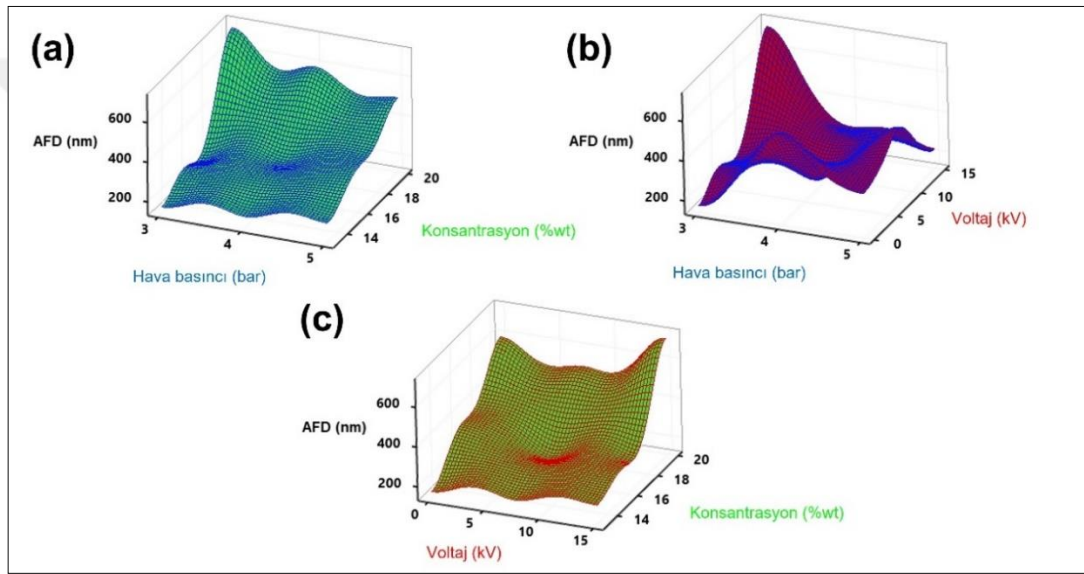
Parametre seviyelerinin bireysel etkilerini incelemek amacıyla Taguchi L9 OD'sine göre yapılan üretimlere ait AFD değerleri kullanılarak, her parametre seviyesinde yapılan üretimlerin AFD'leri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, Şekil 4.3'te verilen grafiğe aktarılmış olup, buradan artan polimer konsantrasyonunun (Seviye 1'den Seviye 3'e kadar) daha kalın lifler elde edilmesine yol açtığı tespit edilmiştir. Öte yandan hava basıncının lif çapı üzerinde, tüm konsantrasyon değerleri için anlamlı bir etkisi olmadığı görülmüştür. Böylece, hava basıncının etkisinin düşük ve yüksek polimer konsantrasyonları için ayrı olarak yorumlanması gerektiği kanısına varılmıştır.



Şekil 4.3: Konsantrasyon, basınç ve voltaj uygulamasının üretilen PSU nanoliflerin çapına etkisi.

Uygulanan voltaj parametresinin farklı seviyelerinde üretim yapılması değiştirilmesi, AFD'lerde farklı bir sonuç ortaya çıkardığı görülmüştür. Yapılan üretimlere elektrik alan eklenmesi (Seviye 2), voltajsız koşullarda üretilen liflere (Seviye 1) kıyasla daha ince liflerin elde edilmesini sağlamıştır. Ancak, elektrik alanının yoğunluğu Seviye 2'den Seviye 3'e yükseltildiğinde, bu durum gerilimsiz duruma kıyasla daha kalın liflerin elde edilmesine sebep olmuştur. Deney esnasında, voltajın sınır değeri aşıldığında Taylor konisinin bozulduğu gözlemlenirken, bu durumun lif yumağı ve filament yapılarının oluşumunu tetiklediği şeklinde yorumlanmıştır [74].

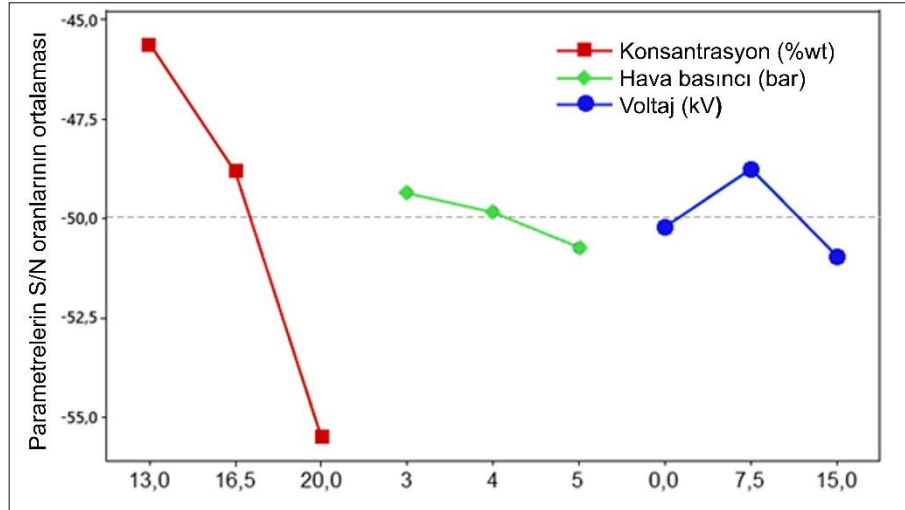
Parametre seviyelerinin lif çapı üzerine kombine etkileri Şekil 4.4'te verilen 3 boyutlu (3D) çizimler kullanılarak incelenmiştir. 3D çizimlerden, Şekil 4.4a'da konsantrasyonun azalmasıyla AFD değerlerinin azaldığı açıkça görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.4a hava basıncı açısından incelendiğinde, konsantrasyonun düşük ve orta seviyelerinde hava basıncının artmasıyla AFD değerleri artarken, yüksek konsantrasyonlarda hava basıncının artmasıyla AFD değerlerini azaltmıştır. Şekil 4.4.b ve Şekil 4.4.c'de oldukça dalgalı 3D yüzeyin oluşması uygulanan elektrik alanının yapılan üretimlerde lif çapı üzerine oldukça değişken davranış sergilediğini ve net bir etkisi olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.4: İkili parametre etkileşimlerine ait seviye değişikliklerinin üç boyutlu çizimleri: (a) konsantrasyon-hava basıncı, (b) voltaj-hava basıncı, (c) konsantrasyon-voltaj.

4.3. Optimum Çalışma Şartlarının Belirlenmesi

“Daha küçük daha iyi” yaklaşımından hareketle, seçilen parametrelere ait optimum seviye kombinasyonunu belirlemek için tüm parametre seviyelerine ait S/N ortalamaları yazılım tarafından hesaplanmıştır. Bu S/N oranları ile elde edilen grafik Şekil 4.5'teki gibidir. Parametrelerin en yüksek S/N oranını veren değerlerinden (en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan) üretim için en uygun seviye kombinasyonu tespit edilir.



Şekil 4.5: Seviyelerle birlikte tüm parametrelerin S/N oranının ortalaması.

Şekil 4.5'te verilen grafikten açıkça görüldüğü üzere, Taguchi yönteminin “en küçük en iyi” yaklaşımı en düşük lif çapını veren parametrelerin optimum seviye kombinasyonunu ağırlıkça %13 konsantrasyon, 3 bar hava basıncı ve 7,5 kV voltaj olarak atamıştır. Taguchi deney tasarım yöntemi bu parametre-seviye kombinasyonun minimum lif çapını sağlayacağını iddia etmektedir [35], [36].

4.4. Doğrulama Deneyi

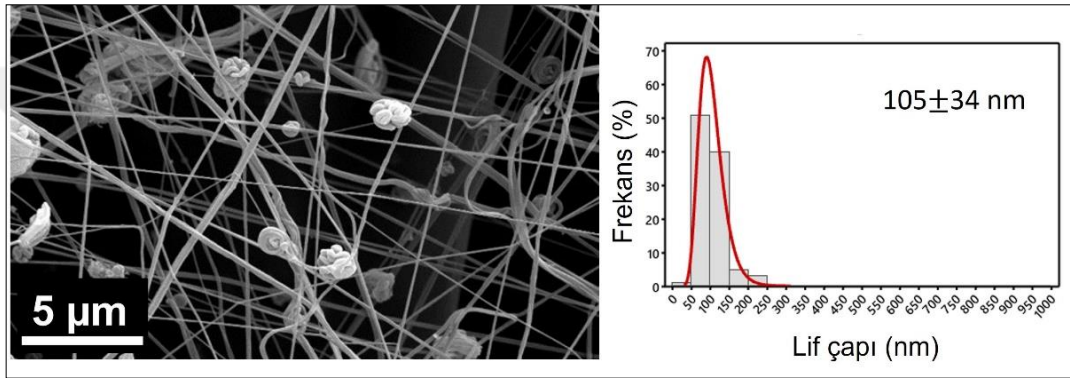
Taguchi yönteminin son adımı, elde edilen optimum seviyelerin en düşük lif çapını vereceği iddiasını doğrulamak için bir doğrulama deneyi yapmaktır. Doğrulama deneyinden elde edilecek olan AFD, matematiksel bir denklem aracılığıyla tahmin edilebilir [36]:

$$AFD (nm) = \bar{X} + (\bar{A} - \bar{X}) + (\bar{B} - \bar{X}) + (\bar{C} - \bar{X}) \quad (4.1)$$

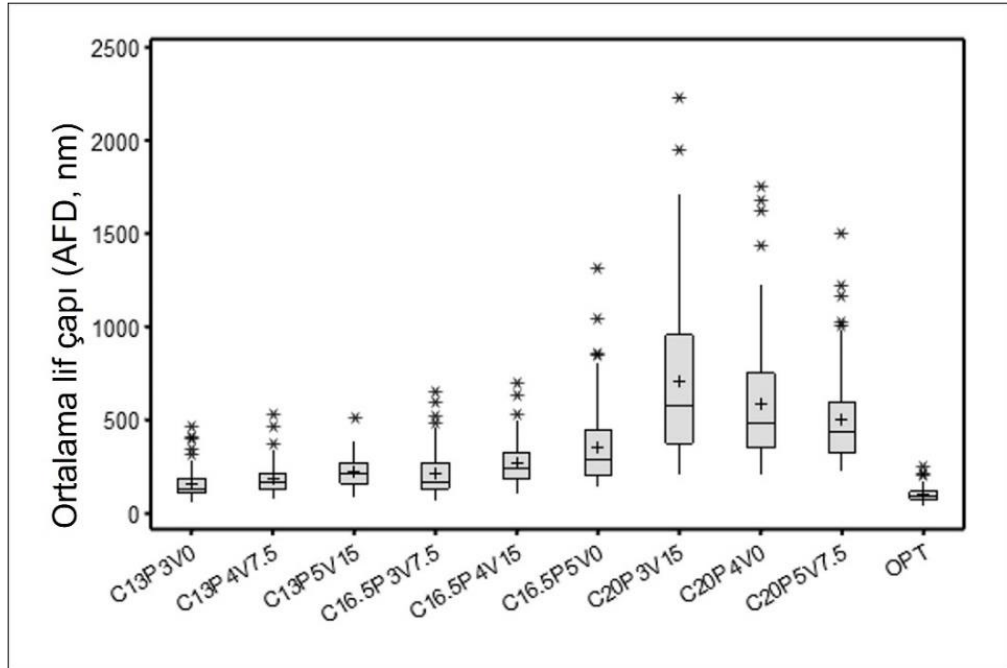
burada $\bar{X}$, tüm deneylerin genel AFD'sidir. $\bar{A}$, $\bar{B}$ ve $\bar{C}$ sırasıyla %13 konsantrasyonda, 3 bar ve 7,5 kV'da üretilen tüm numunelerin AFD'leridir.

$\bar{X}$, $\bar{A}$, $\bar{B}$ ve $\bar{C}$ değerleri sırasıyla 358, 192, 364 ve 304 nm olarak hesaplanmıştır. 4.1 numaralı eşitlik kullanılarak, deney tasarımının verdiği parametre kombinasyonu (ağırlıkça %13 polimer konsantrasyonu, 3 bar hava basıncı ve 7,5 kV voltaj) ile üretilen liflerin AFD'si 143 nm olarak tahmin edilmiştir.

Optimum koşulların en düşük lif çapı iddiasını doğrulamak için, ağırlıkça %13 PSU/DMF çözeltisi hazırlanarak 3 bar hava basıncı ve 7,5 kV elektrik alan uygulanarak (diğer üretim parametrelerin aynı tutulup) doğrulama deneyi yapılmıştır. Bu numunelerin morfolojik yapıları SEM analizi ile incelenmiştir. Şekil 4.6, doğrulama deneyi ile üretilen numunenin SEM görüntüsünü ve lif çapı dağılımını göstermektedir. Optimum koşullarda gerçekleştirilen deneyin AFD'si 105 ± 34 nm olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.1'de görülebileceği gibi, doğrulama deneyi Taguchi L9 OD' sinde elde edilen en düşük lif çapından %35 daha ince lif elde edilmesiyle sonuçlanmıştır.



Şekil 4.6: Doğrulama deneyine ait SEM görüntüsü ve lif çapı dağılımı.

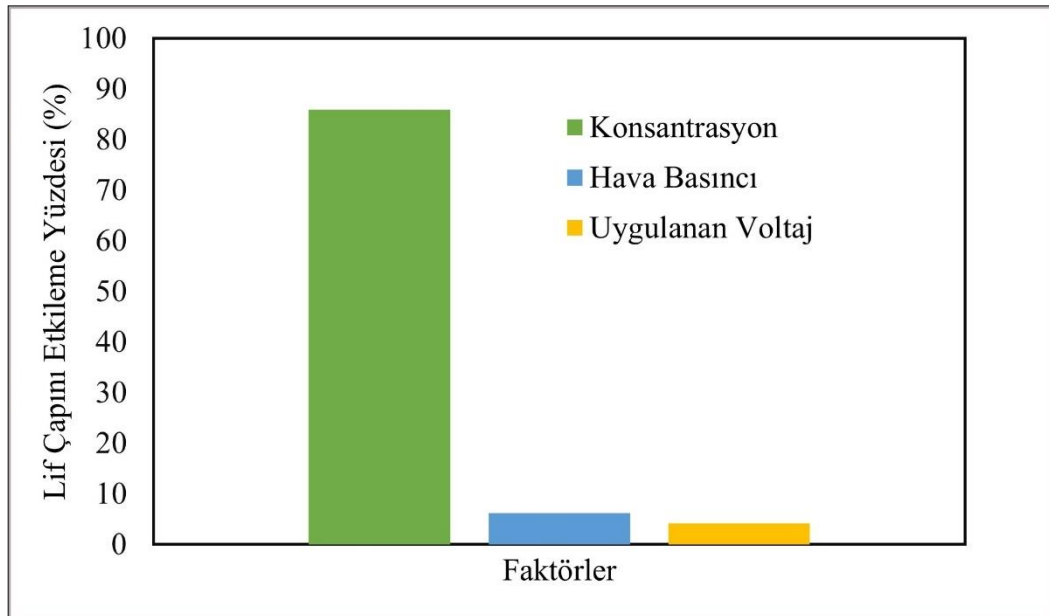


Şekil 4.7: Taguchi L9 OD'sindeki 9 deneye ve doğrulama deneyine karşılık gelen lif çaplarının kutu grafiği.

Şekil 4.7, Taguchi L9 OD' sinde bulunan deneylerine ve doğrulama deneyine ait lif çapı ölçümlerinin kutu grafiğidir. Grafik incelendiğinde, tüm deneyler arasında en düşük AFD ve en düşük standart sapma değerine sahip olan deneyin doğrulama deneyi olduğu açıkça görülmektedir. Kutu grafiğindeki sınırlar lif çapı uzunluklarının yüzdesel olarak bulunma bölgelerini ifade eder. Üst bölünmüş sınır (%75) alt sınır (%25) çeyreklerini temsil eder. Grafikte kullanılan çizgi, artı ve yıldız işaretleri sırasıyla medyan, ortalama ve aykırı lif çaplarını temsil etmektedir.

4.5. Varyans Analizi (ANOVA)

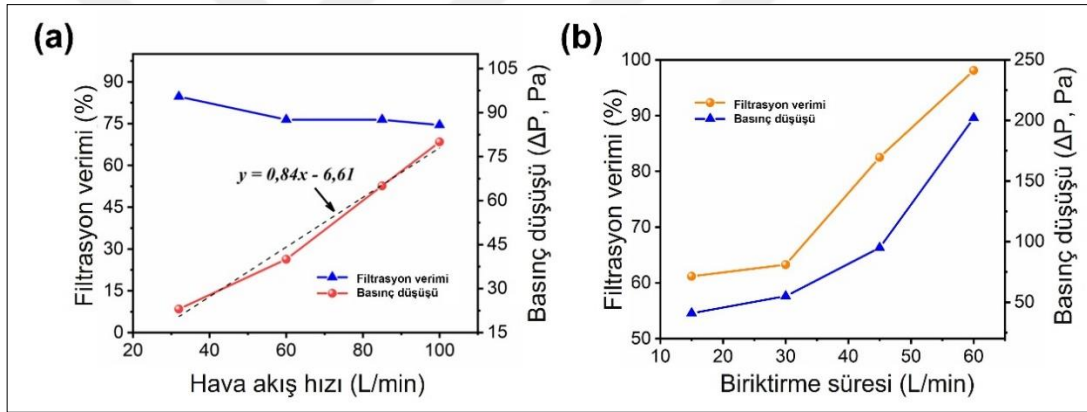
Tasarımda kullanılan parametrelerin lif çapı üretimindeki önemini araştırmak için deneysel tasarımdan sonra varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Polimer çözeltisi konsantrasyonu %85,88'lik katkı ile lif çapını etkileyen en önemli parametre olarak tespit edilmiştir. Azalan önem sırasına göre bu parametreler sırasıyla % 6,22 ve % 4,22'lik yüzde katkılarıyla hava basıncı ve uygulanan voltaj olarak ifade edilebilir (Şekil 4.8). ANOVA sonucunda, uygulanan voltajın belirlenen sınırlar dahilinde nanolif çapı üzerinde gözle görülür bir etkisi olmadığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.8: Parametrelerin lif çapını etkileme yüzdeleri.

4.6. PSU Nanoliflerin Filtrasyon Performanslarının İncelenmesi

Hava filtrelerinin endüstri ekipmanları, iklimlendirme ve havalandırma ekipmanları ve kişisel solunum cihazları gibi birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Hava filtrelerinin kullanım şartları (hava akış hızı, sıcaklık vb.) uygulama alanına göre değişiklik göstermektedir. Bu sebepten dolayı üretilen nanolif hava filtrelerinin filtrasyon verimliliği (η), basınç düşüşü (ΔP) ve QF değerleri 0,3 μm NaCl aerosolü kullanılarak farklı hava akış hızlarında Şekil 4.9a ve 4.9b’de incelenmiştir. Farklı hava hızlarında yapılan testlerde, optimum deney koşullarında 15 dakika üretim sürelerinde elde edilen numuneler kullanılmıştır. Testler için hava akış hızı değerleri 32 L/dk, 60 L/dk, 85 L/dk ve 100 L/dk olarak seçilmiştir [6].

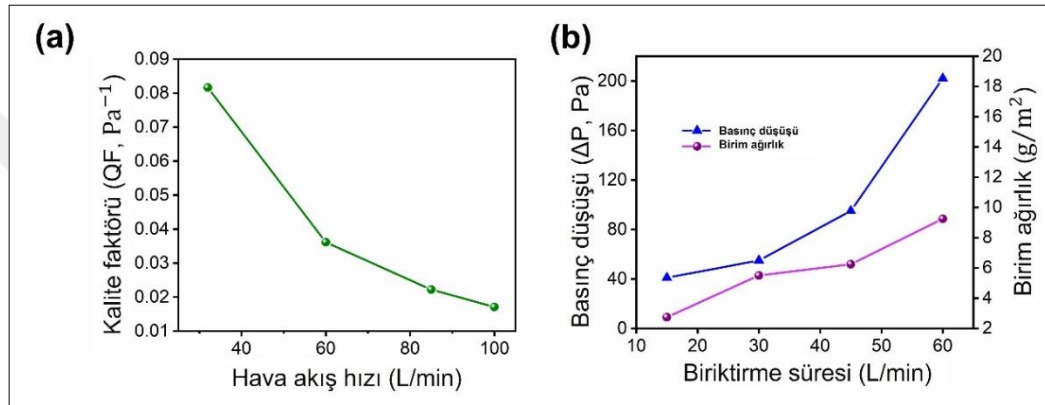


Şekil 4.9: (a) Çeşitli hava akış hızları altında 0,3 μm NaCl partiküller için PSU nanolif numunelerinin filtrasyon verimliliği ve basınç düşüşü (biriktirme süresi 15 dakika), (b) Çeşitli üretim sürelerine sahip PSU nanoliflerinin filtrasyon verimliliği ve basınç düşüşü.

Daha önce yapılan çalışmalarda, $Re < 1$ olduğu durumlarda lifli filtre yüzeyinde Stokes akışının baskın olduğu iddia edilmiştir [11], [38]. Bu sebeple, Darcy'nin viskoz direnç yasası geçerli olduğundan filtre boyunca basınç düşüşü hız ile doğru orantılı olmalıdır [14], [38]. Şekil 4.9a'ya göre hava akış hızı ile basınç düşüşü arasındaki çizilen eğrinin eğim değeri 0,84 olarak hesaplanmıştır. Böylece üretilen filtrenin, Darcy'nin geliştirdiği basınç düşüşünün hava akış hızıyla lineer olarak arttığını ifade eden viskoz direnç yasası ile tutarlı olduğu tespit edilmiştir.

Optimum koşullarda farklı biriktirme sürelerinde üretilen nanoliflerin filtrasyon performansları, 95 L/dk hava akış hızında incelenmiştir (Şekil 4.9b). Şekil 4.9b'de

filtrasyon verimliliklerinin biriktirme süresiyle orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. 15, 30, 45 ve 60 dakika biriktirme sürelerinde üretilen nanoliflerin filtrasyon verimlilikleri sırasıyla % 61,18, % 63,26, % 82,52 ve % 98,09'dur. Bu filtrasyon verimliliklerine karşılık üretilen filtrede gerçekleşen basınç düşüşü değerleri ise test cihazı tarafından 41, 55, 95 ve 202 Pa olarak ölçülmüştür. Şekil 4.10a'da hava akış hızı arttıkça liflerin QF değerlerinin düştüğü görülmüştür. Nanoliflerin biriktirme süresinin artmasıyla üretilen filtrenin birim ağırlığın arttığı ve filtre boyunca basınç düşüşünde artış olduğu Şekil 4.10b'de açıkça gösterilmiştir.

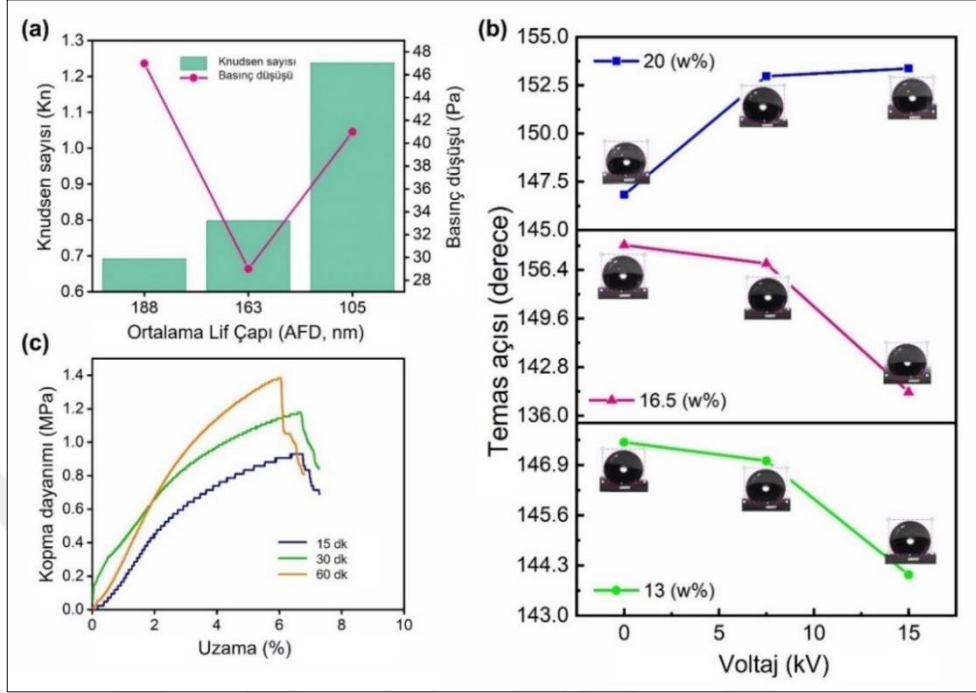


Şekil 4.10: (a) 15 dakika biriktirme süresinde üretilen PSU nanoliflerin farklı hava akış hızı değerleri için hesaplanan QF değerleri ve (b) Çeşitli biriktirme sürelerinde üretilen PSU nanoliflerin basınç düşüşü ve birim ağırlık değerleri.

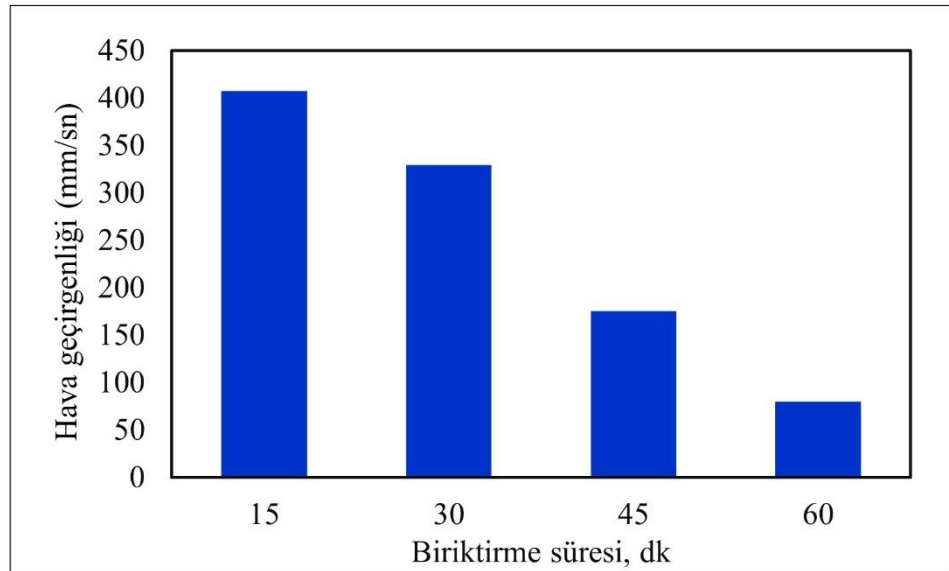
E1, E2 ve doğrulama deneyine ait basınç düşüşü ve Kn değerleri Şekil 4.11a'da gösterilmiştir. Doğrulama deneyine (AFD değeri 105 nm) ait QF ve Kn değerleri 0,023 Pa^{-1} ve 1,23 olarak hesaplanmıştır. E2 (AFD değeri 188 nm) ve E1 (AFD değeri 163 nm) numuneleri incelendiğinde AFD değerinin küçülmesiyle artan Kn hava akışının kayma akış bölgesine geçtiği göstermektedir. Kayma akışında, azalan AFD değeri ile hava-lif ara yüzeyindeki sürtünme kuvveti zayıflayarak havanın sıfırdan farklı bir hızda hareket etmesi sağlayacaktır. Böylece filtre boyunca gerçekleşen basınç düşüşü değeri azalacaktır. Şekil 4.11a'da, E2 ve E1 numuneleri dikkatlice incelendiğinde AFD değerinin azalmasıyla basınç düşüşü değerinin (~ 15 Pa) azaldığı görülmüştür.

Doğrulama deneyi sonucunda AFD değerinin 105 nm'ye düşmesiyle, lif yüzeyinde kayma etkisi zayıfladığı ve böylece lifler ve hava akışı arasındaki karşılıklı etkileşim nedeniyle basınç düşüşünün arttığı görülmüştür [38]. E1 ve E2 numuneleri

için Kn değerleri sırasıyla 0.79 ve 0.69 olarak hesaplanmıştır. Üç örneğin AFD değerleri de geçiş akışı rejimindedir (Şekil 2.9a).



Şekil 4.11: (a) Üretilen PSU liflerinin Kn değerleriyle basınç düşüşü ilişkisinin değerlendirmesi, (b) farklı biriktirme sürelerinde üretilen PSU nanoliflerin mekanik davranışlarının incelemesi ve (c) deney tasarımında üretilen liflerin ıslanabilirlik davranışın incelenmesi.



Şekil 4.12: Farklı biriktirme sürelerinde üretilen numunelerin hava geçirgenlik değerleri.

Üretilen nanoliflerin hava geçirgenlik performansları ISO 9237 standardına göre incelenmiştir. Her numuneden 3 farklı ölçüm alınmıştır. Alınan bu ölçümlerin ortalaması alınarak hava geçirgenlik değerleri hesaplanmıştır. Biriktirme süresi arttıkça numunelerin geçirgenlik değerlerinde düşüş görülmüştür (Şekil 4.12). Hava geçirgenlikleri 15, 30, 45 ve 60 dakikalık biriktirme süreleri için sırasıyla 407.5, 329.5, 175.5 ve 80 mm/s olarak ölçülmüştür.

4.7. PSU Nanoliflerin Mekanik ve Islanabilirlik Davranışlarının İncelenmesi

Yüzey morfolojisi, temas açısını etkileyen önemli parametrelerden biridir. WCA değerleri, konsantrasyon ve uygulanan voltajın farklı seviyelerinde detaylı olarak Şekil 4.11b’de incelenmiştir. Farklı konsantrasyonlar için en yüksek WCA değerleri $C_{13}P_3V_0$ (Şekil 4.1a), $C_{16,5}P_5V_0$ (Şekil 4.1f) ve $C_{20}P_3V_{15}$ (Şekil 4.1g) örnekleri için farklı konsantrasyonlar için sırasıyla 147, 159 ve 153° olarak ölçülmüştür.

Tüm konsantrasyonlar için yüksek temas açıları damlacık yapılarının varlığı ile ilişkilendirilmiştir. Özellikle ağırlıkça %13 konsantrasyonda üretilen numunelerin SEM görüntülerinden (Şekil 4.1a, Şekil 4.1b ve Şekil 4.1c) artan hava basıncı ve voltajın etkisiyle damlacık yapıları azaldığı görülmektedir. Böylece damlacık yapılarının azalmasıyla numunelerin temas açısı değerlerinde azalma olduğu Şekil 4.11b’de açıkça görülmektedir. En yüksek WCA değerine (159°) $C_{16,5}P_5V_0$ numunesi ile ulaşılmıştır. Uygulanan voltajın artırılması düşük ve orta konsantrasyonlarda yapılan üretimlerde numunelerin WCA değerlerini azaltırken, yüksek konsantrasyonlarda yapılan üretimlerde azaltmıştır. Bu durum daha önce yapılan çalışmalar ile tutarlılık göstermiştir [25].

Biriktirme süresinin numunelerin stres (gerilme, σ) ve gerinim davranışları üzerindeki etkisini anlamak amacıyla optimum deney koşullarında farklı biriktirme sürelerinde üretilen numunelerin mekanik özellikleri incelenmiştir. Maccaferri ve ark. tarafından yapılan çalışmada, porozite oranı (~%90) oldukça yüksek lifli malzemelerin mekanik davranışlarını incelemek için test numunesinin kalınlığı yerine kütle değerinden faydalanılmasının daha doğru ve pratik bir yaklaşım olduğu ifade edilmiştir [67]. Yeni geliştirilen numune kütlesine dayalı yaklaşım “klasik yaklaşımı” yeniden formüle ederek stres terimini (σ) uygulanan kuvvetin (N), polimer

yoğunluğuna ($\rho_{\text{PSU}} = 1.24 \text{ g/mm}^3$), test numunesinin kütlesine (m) ve test numunesinin uzunluğuna (L_0) oranı olarak tanımlamaktadır. Bu yaklaşımla, farklı biriktirme sürelerinde (15, 30 ve 60 dakika) üretilen numunelerin mekanik davranışları Şekil 4.11c’de gösterildiği gibidir.

Üretilen PSU nanolif numuneleri, yaklaşık 1 MPa kopma dayanımı ve %60 kopma uzamasına sahip PSU mikro lif emsallerine kıyasla daha yüksek kopma dayanımı ve daha zayıf uzama davranışları göstermiştir [11]. Lif çaplarının küçülmesi ile yapı liflerin üst üste geçiş sayısı artmış ve bu nedenle numuneler gevrek bir davranış sergilemiştir [67]. Biriktirme süresi arttıkça nanoliflerin kopma dayanımı değeri 0.93 MPa’dan 1.38 MPa’a yükselmiş ve kopma uzaması değeri ise % 6,75’ten % 5,95’e düşmüştür.



5. SONUÇLAR

- Tez çalışmasında, EBS ile PSU nanolif üretiminin optimize edilmesi ve bu nanoliflerin hava filtresi olarak kullanılabilirliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır.
- Yapılan ön çalışmalarla nanolif optimizasyonunda incelenecek parametreler konsantrasyon, hava basıncı ve voltaj olarak belirlenmiştir.
- Üretim optimizasyonunda çalışma aralıkları, konsantrasyon için ağırlıkça %13-20, hava basıncı için 3-5 bar, uygulanan voltaj için ise 0-15 kV olarak belirlenmiştir.
- L9 OD'ye göre deneyler oluşturulmuş ve Taguchi yöntemi ile “en küçük en iyi” yaklaşımı ile optimum deney koşulları MINITAB 2019 yazılımı ile belirlenmiştir.
- Deney dizisinde bulunan deneyler yapılırken, besleme hızı 9 ml/sa, toplayıcı ve nozül arasındaki mesafe 35 cm, kullanılan iğne ise 21G olarak sabit tutulmuştur.
- Optimum koşullar (en küçük lif çapını veren) ağırlıkça %13 PSU/DMF çözeltisi, 3 bar hava basıncı ve 7,5 kV voltaj değeri olarak tespit edilmiştir.
- ANOVA ile parametrelerin lif çapını etkileme oranları konsantrasyon, hava basıncı ve voltaj için sırasıyla %85,88, % 6,22 ve %4,22 olarak tespit edilmiştir.
- En düşük AFD değerine ulaşılacağını iddia eden parametre kombinasyonunda doğrulama deneyi yapılmıştır. Optimum deney koşullarında üretilen numunenin SEM görüntüsü çekildi ve Image J yazılımı ile kullanılarak en az 100 farklı noktadan alınan ölçümle AFD değeri 105 nm olarak hesaplanmıştır.
- Optimum koşullarda farklı biriktirme sürelerinde (15, 30, 45, 60 dakika) üretilen nanoliflerin filtre performansları, filtrasyon verimliliği, basınç düşüşü, QF, hava geçirgenliği ve Kn açısından incelenmiştir.
- Filtrasyon verimi en yüksek (% 98.09) numunenin basınç düşüşü, QF, hava geçirgenliği ve Kn değerleri sırasıyla 202 kPa, 0,023 Pa⁻¹, 80 mm/sn ve 1,23 olarak ölçülmüştür.
- Nanoliflerin morfolojik yapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak, porozite değerleri gravimetrik yaklaşımla, ıslanabilirlik davranışları su temas açısı (WCA) ölçümleri yapılarak, mekanik davranışları ise gerilme-gerinim eğrileri çizilerek incelenmiştir.

- Farklı biriktirme sürelerinde üretilen numunelerin çekme testleri yapıldığında en uzun biriktirme süresinde (60 dk) üretilen numunenin kopma dayanımı 1.38 MPa, kopma uzaması ise %5,95 olarak ölçülmüştür.
- Tez çalışması kapsamında üretilen nanoliflerin temas açısı değerleri 140°-160° arasında değişiklik göstermektedir.
- Daha önce bahsedildiği gibi PSU yüksek kimyasal ve mekanik dayanıma sahip bir polimerdir. Bundan sonraki çalışmalarda, PSU nanolif hava filtrelerinin yüksek sıcaklık ve aşındırıcı kimyasal varlığı gibi ekstrem koşullarda davranışlarının incelenecektir.



KAYNAKLAR

- [1] Web 1, (2022), <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>, (Eriřim Tarihi: 25/04/2022).
- [2] Zhang S., Rind N. A., Tang N., Liu H., Yin X., Yu J., Ding B., (2019), "Electrospun Nanofibers for Air Filtration". In: B. Ding, X. Wang, J. Yu, Editors, "Electrospinning: Nanofabrication and Applications", William Andrew Publishing.
- [3] Zhu M., Han J., Wang F., Shao W., Xiong, R., Zhang Q., Pan H., Yang Y., Samal S. K., Zhang F., Huang C., (2017), "Electrospun nanofibers membranes for effective air filtration", *Macromolecular Materials and Engineering*, 302 (1), 1-27.
- [4] Zaarour B., Tina H., Zhu L., Jin X., (2020), "Branched nanofibers with tiny diameters for air filtration via one-step electrospinning", *Journal of Industrial Textiles*, 1-13
- [5] Chee T. Y., Yusoff A. R. M., Rahmat N. A., Malek N. A. N. N., (2019), "Solution parameter effect on polysulfone fibers via electrospinning: fabrication, characterization and water flux property", *Jurnal Teknologi*, 81 (4), 69-74.
- [6] Cui Y., Briscoe J., Wang Y., Tarakina N. V., Dunn S., (2017), "Enhanced photocatalytic activity of heterostructured ferroelectric BaTiO₃/α-Fe₂O₃ and the significance of interface morphology control", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 9 (29), 24518-24526.
- [7] Zhang R., Liu C., Hsu P. C., Zhang C., Liu N., Zhang J., Lee H. R., Lu Y., Qiu Y., Chu S., Cui, Y., (2016), "Nanofiber air filters with high-temperature stability for efficient PM_{2.5} removal from the pollution sources", *Nano Letters*, 16 (6), 3642-3649.
- [8] Web 2, (2022), <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>, (Eriřim Tarihi: 25/04/2022).
- [9] Henning L., M., Abdullayev A., Vakifahmetoglu C., Simon U., Bensalah H., Gurlo A., Bekheet, M. F., (2021), "Review on polymeric, inorganic, and composite materials for air filters: from processing to properties", *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2 (5), 1-30.
- [10] Comunian S., Dongo D., Milani C., Palestini P, (2020), "Air pollution and COVID-19: the role of particulate matter in the spread and increase of COVID-19's morbidity and mortality", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (12), 1-20.
- [11] Wan H., Wang N., Yang J., Si Y., Chen K., Ding B., Sun G., El-Newehy M., Al-Deyab S. S., Yu J., (2014), "Hierarchically structured polysulfone/titania fibrous membranes with enhanced air filtration performance", *Journal of Colloid and Interface Science*, 417, 18-26.
- [12] 1-18Lv D., Zhu M., Jiang Z., Jiang S., Zhang Q., Xiong R., Huang C., (2018),

Green electrospun nanofibers and their application in air filtration. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303 (12), 1-18.

- [13] Kadam V. V., Wang L., Padhye R., (2018), "Electrospun nanofibre materials to filter air pollutants—A review", *Journal of Industrial Textiles*, 47 (8), 2253-2280.
- [14] Zhang S., Liu H., Yin X., Yu J., Ding B., (2016), "Anti-deformed polyacrylonitrile/polysulfone composite membrane with binary structures for effective air filtration", *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (12), 8086-8095.
- [15] Li J., Zhang D., Yang T., Yang S., Yang X., Zhu H., (2018), "Nanofibrous membrane of graphene oxide-in-polyacrylonitrile composite with low filtration resistance for the effective capture of PM_{2.5}", *Journal of Membrane Science*, 551, 85-92.
- [16] Li P., Wang C., Zhang Y., Wei F., (2014), "Air filtration in the free molecular flow regime: a review of high-efficiency particulate air filters based on carbon nanotubes", *Small*, 10 (22), 4543-4561.
- [17] Wang N., Wang X., Ding B., Yu J., Sun G., (2012), "Tunable fabrication of three-dimensional polyamide-66 nano-fiber/nets for high efficiency fine particulate filtration", *Journal of Materials Chemistry*, 22 (4), 1445-1452.
- [18] Kenry, Lim C. T., (2017), "Nanofiber technology: current status and emerging developments", *Progress in Polymer Science*, 70, 1-17.
- [19] Lou H., Li W., Li C., Wang X., (2013), "Systematic investigation on parameters of solution blown micro/nanofibers using response surface methodology based on box-Behnken design", *Journal of Applied Polymer Science*, 130 (2), 1383-1391.
- [20] Dadol G. C., Kilic A., Tijing L. D., Lim K. J. A., Cabatingan L. K., Tan N. P. B., Stojanovska E., Polat Y., (2020), "Solution blow spinning (SBS) and SBS-spun nanofibers: Materials, methods, and applications", *Materials Today Communications*, 25, 1-41.
- [21] Medeiros E. S., Glenn G. M., Klamczynski A. P., Orts W. J., Mattoso L. H., (2009), "Solution blow spinning: A new method to produce micro-and nanofibers from polymer solutions", *Journal of applied polymer science*, 113 (4), 2322-2330.
- [22] Alghoraibi I., Alomari S., (2018), "Different Methods For Nanofiber Design and Fabrication". In: A. Barhoum, M. Beckhelany, A. S. H. Makhoulf, Editors, "Handbook of Nanofibers", Springer.
- [23] Ahmadian A., Shafiee A., Aliahmad N., Agarwal M., (2021), "Overview of nano-fiber mats fabrication via electrospinning and morphology analysis", *Textiles*, 1 (2), 206-226.
- [24] Gao Y., Zhang J., Su Y., Wang H., Wang X. X., Huang L. P., Yu M., Ramakrishna S., Long, Y. Z., (2021), "Recent progress and challenges in solution blow spinning", *Materials Horizons*, 8 (2), 426-446.
- [25] Al-Qadhi M., Merah N., Matin A., Abu-Dheir N., Khaled M., Youcef-Toumi K., (2015), "Preparation of superhydrophobic and self-cleaning polysulfone non-wovens by electrospinning: influence of process parameters on

- morphology and hydrophobicity”, *Journal of Polymer Research*, 22 (11), 1-9.
- [26] Ramazan E., (2019), “Advances in fabric structures for wound care”. In: S. Rajendran, Editor, “Advanced textiles for wound care”, Woodhead Publishing.
 - [27] Asmatulu R., Khan W. S., (2018), “Introduction To Electrospun Nanofibers”. In: S. Holt, Editor, “Synthesis and applications of electrospun nanofibers”, Elsevier.
 - [28] Atif R., Combrinck M., Khaliq J., Hassanin A. H., Shehata N., Elnabawy E., Shyha I., (2020), “Solution blow spinning of high-performance submicron polyvinylidene fluoride fibres: computational fluid mechanics modelling and experimental results”, *Polymers*, 12 (5), 1140-1158.
 - [29] Shi L., Zhuang X., Tao X., Cheng B., Kang W., (2013), “Solution blowing nylon 6 nanofiber mats for air filtration”, *Fibers and Polymers*, 14 (9), 1485-1490.
 - [30] Zhao Y., Jiang J., Li W., Wang X., Zhang K., Zhu P., Zheng G., (2016), “Electrospinning jet behaviors under the constraints of a sheath gas”, *Aip Advances*, 6 (11), 115022-115035.
 - [31] da Silva Parize D. D., Foschini M. M., de Oliveira J. E., Klamczynski A. P., Glenn G. M., Marconcini J. M., Mattoso L. H. C., (2016), “Solution blow spinning: parameters optimization and effects on the properties of nanofibers from poly (lactic acid)/dimethyl carbonate solutions”, *Journal of Materials Science*, 51 (9), 4627-4638.
 - [32] Polat Y., Pampal E. S., Stojanovska E., Simsek R., Hassanin A., Kilic A., Demir A., Yilmaz S., (2016), “Solution blowing of thermoplastic polyurethane nanofibers: A facile method to produce flexible porous materials”, *Journal of Applied Polymer Science*, 133 (9), 1-9.
 - [33] Daristotle J. L., Behrens A. M., Sandler A. D., Kofinas P., (2016), “A review of the fundamental principles and applications of solution blow spinning”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8 (51), 34951-34963.
 - [34] Chang K. H., Lin, H. L., (2009), “Electrospin of polysulfone in N, N'-dimethyl acetamide solutions”, *Journal of Polymer Research*, 16 (6), 611-622.
 - [35] Albetran H., Dong Y., Low I. M., (2015), “Characterization and optimization of electrospun TiO₂/PVP nanofibers using Taguchi design of experiment method”, *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3 (3), 292-300.
 - [36] Gundogdu N. S., Akgul Y., Kilic, A. (2018), “Optimization of centrifugally spun thermoplastic polyurethane nanofibers for air filtration applications”, *Aerosol Science and Technology*, 52 (5), 515-523.
 - [37] Tcharkhtchi A., Abbasnezhad N., Seydani M. Z., Zirak N., Farzaneh S., Shirinbayan M., (2021), “An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration”, *Bioactive Materials*, 6 (1), 106-122.
 - [38] Zhao X., Wang S., Yin X., Yu J., Ding B., (2016), “Slip-effect functional air filter for efficient purification of PM_{2.5}”, *Scientific Reports*, 6 (1), 1-11.

- [39] Choi H. J., Kumita M., Seto T., Inui Y., Bao L., Fujimoto T., Otani Y., (2017), "Effect of slip flow on pressure drop of nanofiber filters", *Journal of Aerosol Science*, 114, 244-249.
- [40] Bian Y., Zhang L., Chen C. (2018), "Experimental and modeling study of pressure drop across electrospun nanofiber air filters", *Building and Environment*, 142, 244-251.
- [41] Khanlou H. M., Sadollah A., Ang B. C., Kim J. H., Talebian S., Ghadimi A. (2014), "Prediction and optimization of electrospinning parameters for polymethyl methacrylate nanofiber fabrication using response surface methodology and artificial neural networks", *Neural Computing and Applications*, 25 (3), 767-777.
- [42] Hamzaçebı C., Kutay F., (2003), "Taguchi metodu: bir uygulama", *Teknoloji*, 6, 7-17.
- [43] Mohammadi M., Mohammadi N., Mehdipour-Ataei S., (2020), "On the preparation of thin nanofibers of polysulfone polyelectrolyte for improving conductivity of proton-exchange membranes by electrospinning: Taguchi design, response surface methodology, and genetic algorithm", *International Journal of Hydrogen Energy*, 45 (58), 34110-34124.
- [44] Mitra A., (2011)., "The taguchi method", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 3 (5), 472-480.
- [45] Wu C. M., Hsu C. H., Su C. I., Liu C. L., Lee J. Y., (2018), "Optimizing parameters for continuous electrospinning of polyacrylonitrile nanofibrous yarn using the Taguchi method", *Journal of Industrial Textiles*, 48 (3), 559-579.
- [46] Zhang C., Yao L., Yang Z., Kong E. S. W., Zhu X., Zhang Y., (2019), "Graphene oxide-modified polyacrylonitrile nanofibrous membranes for efficient air filtration", *ACS Applied Nano Materials*, 2 (6), 3916-3924.
- [47] Al Rai A., Stojanovska E., Fidan G., Yetgin E., Polat Y., Kilic A., Demir A., Yilmaz, S., (2020), "Structure and performance of electroblown PVDF-based nanofibrous electret filters", *Polymer Engineering & Science*, 60 (6), 1186-1193.
- [48] Balgis R., Murata H., Goi Y., Ogi T., Okuyama K., Bao L., (2017), "Synthesis of dual-size cellulose–polyvinylpyrrolidone nanofiber composites via one-step electrospinning method for high-performance air filter", *Langmuir*, 33 (24), 6127-6134.
- [49] Zhang S., Shim W. S., Kim J., (2009), "Design of ultra-fine nonwovens via electrospinning of Nylon 6: Spinning parameters and filtration efficiency", *Materials & Design*, 30 (9), 3659-3666.
- [50] Purwar R., Sai Goutham K., Srivastava C. M., (2016), "Electrospun Sericin/PVA/Clay nanofibrous mats for antimicrobial air filtration mask", *Fibers and Polymers*, 17 (8), 1206-1216.
- [51] Liu C., Hsu P. C., Lee H. W., Ye M., Zheng G., Liu N., Li W., Cui, Y., (2015), "Transparent air filter for high-efficiency PM2.5 capture", *Nature Communications*, 6 (1), 1-9.

- [52] Liu H., Huang J., Mao J., Chen Z., Chen G., Lai Y., (2019), "Transparent antibacterial nanofiber air filters with highly efficient moisture resistance for sustainable particulate matter capture", *Iscience*, 19, 214-223.
- [53] Strain I. N., Wu Q., Pourrahimi A. M., Hedenqvist M. S., Olsson R. T., Andersson R. L., (2015), "Electrospinning of recycled PET to generate tough mesomorphic fibre membranes for smoke filtration", *Journal of Materials Chemistry A*, 3 (4), 1632-1640.
- [54] Rajak A., Hapidin D. A., Iskandar F., Munir M. M., Khairurrijal K., (2020), "Electrospun nanofiber from various source of expanded polystyrene (EPS) waste and their characterization as potential air filter media", *Waste Management*, 103, 76-86.
- [55] Rezaei Soulegani S., Sherafat Z., Rasouli M., (2021), "Morphology, physical, and mechanical properties of potentially applicable coelectrospun polysulfone/chitosan-polyvinyl alcohol fibrous membranes in water purification", *Journal of Applied Polymer Science*, 138 (9), 1-12.
- [56] Cojocaru C., Dorneanu P. P., Airinei A., Olaru N., Samoila P., Rotaru A., (2017), "Design and evaluation of electrospun polysulfone fibers and polysulfone/NiFe₂O₄ nanostructured composite as sorbents for oil spill cleanup", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 70, 267-281.
- [57] Lee S., Kim B., Kim S. H., Kim E., Jang J. H., (2017), "Superhydrophobic, reversibly elastic, moldable, and electrospun (SupREME) fibers with multimodal functions: from oil absorbents to local drug delivery adjuvants", *Advanced Functional Materials*, 27 (37), 1-12.
- [58] Ji Y., Li S., Li G., Xu J., Zuo D., Zhang H., (2019), "Preparation and electrochemical properties of SPEEK/PSF based membrane for supercapacitors", *Materials Research Express*, 6 (10), 1-10.
- [59] Mohammadi F., Mohammadi F., Yavari Z., (2021), "Characterization of the cylindrical electrospun nanofibrous polysulfone membrane for hemodialysis with modelling approach", *Medical & Biological Engineering & Computing*, 59 (7), 1629-1641.
- [60] Gong X., Dai Y., Yan X., Wu X., Wang Q., Zhen D., Li T., Chen W., He, G., (2018), "Electrospun imidazolium functionalized multiwalled carbon nanotube/polysulfone inorganic-organic nanofibers for reinforced anion exchange membranes", *International Journal of Hydrogen Energy*, 43 (46), 21547-21559.
- [61] Wang S., Lin Y., Yang J., Shi L., Yang G., Zhuang X., Li Z., (2021), "UiO-66-NH₂ functionalized cellulose nanofibers embedded in sulfonated polysulfone as proton exchange membrane", *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (36), 19106-19115.
- [62] Chen X., Xu Y., Liang M., Ke Q., Fang Y., Xu H., Jin X., Huang C., (2018), "Honeycomb-like polysulphone/polyurethane nanofiber filter for the removal of organic/inorganic species from air streams", *Journal of Hazardous Materials*, 347, 325-333.
- [63] Wang H., Apostolidis P., Zhu J., Liu X., Skarpas A., Erkens S., (2021), "The

role of thermodynamics and kinetics in rubber–bitumen systems: a theoretical overview”, *International Journal of Pavement Engineering*, 22 (14), 1785-1800.

- [64] Uzal N., Ates N., Saki S., Bulbul Y. E., Chen Y., (2017), “Enhanced hydrophilicity and mechanical robustness of polysulfone nanofiber membranes by addition of polyethyleneimine and Al₂O₃ nanoparticles”, *Separation and Purification Technology*, 187, 118-126.
- [65] Tijing L. D., Woo Y. C., Shim W. G., He T., Choi J. S., Kim S. H., Shon H. K. (2016), “Superhydrophobic nanofiber membrane containing carbon nanotubes for high-performance direct contact membrane distillation”, *Journal of Membrane Science*, 502, 158-170.
- [66] Senthil T., Anandhan S., (2015), “Electrospinning of non-woven poly (styrene-co-acrylonitrile) nanofibrous webs for corrosive chemical filtration: Process evaluation and optimization by Taguchi and multiple regression analyses”, *Journal of Electrostatics*, 73, 43-55.
- [67] Maccaferri E., Cocchi D., Mazzocchetti L., Benelli T., Brugo T. M., Giorgini L., Zucchelli A., (2021), “How Nanofibers Carry the Load: Toward a Universal and Reliable Approach for Tensile Testing of Polymeric Nanofibrous Membranes”, *Macromolecular Materials and Engineering*, 306 (7), 1-15.
- [68] Domínguez J. E., Kasiri A., González-Benito J., (2021), “Wettability behavior of solution blow spun polysulfone by controlling morphology”, *Journal of Applied Polymer Science*, 138 (15), 1-15.
- [69] Beigmoradi R., Samimi A., Mohebbi-Kalhari D., (2021), “Controllability of the hydrophilic or hydrophobic behavior of the modified polysulfone electrospun nanofiber mats”, *Polymer Testing*, 93, 1-12.
- [70] Polat Y., Calisir M., Gungor M., Sagirli M. N., Atakan R., Akgul Y., Demir, A., Kilic, A., (2021), “Solution blown nanofibrous air filters modified with glass microparticles”, *Journal of Industrial Textiles*, 51 (5), 821-834.
- [71] Yuan X., Zhang Y., Dong C., Sheng J. (2004), “Morphology of ultrafine polysulfone fibers prepared by electrospinning”, *Polymer International*, 53 (11), 1704-1710.
- [72] Xue M., Zhang X., Ma L., Gu Z., Lin Y., Bao C., Tian, X., (2013), “Structure and thermal behavior of EPDM/POSS composite fibers prepared by electrospinning”, *Journal of Applied Polymer Science*, 128 (4), 2395-2401.
- [73] Yao Y., Zhu P., Ye H., Niu A., Gao X., Wu D., (2006), “Polysulfone nanofibers prepared by electrospinning and gas/jet-electrospinning”, *Frontiers of Chemistry in China*, 1 (3), 334-339.
- [74] Liu Y., Jia C., Zhang H., Wang H., Li P., Jia L., Wang F., Zhu P., Wang H., Yu L., Wang F., Wang L., Zhang X., Sun Y., Li B., (2021), “Free-Standing Ultrafine Nanofiber Papers with High PM0.3 Mechanical Filtration Efficiency by Scalable Blow and Electro-Blow Spinning”, *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (29), 34773-34781.

ÖZGEÇMİŞ

Züleyha SARAÇ 2014 yılında Muammer Dereli Anadolu Öğretmen lisesinden mezun oldu ve İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünü kazandı. 2019 yılında lisans eğitimini tamamladı ve İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği bölümünde yüksek lisansa başladı. 2020 yılında Gebze Teknik Üniversitesi'ne yatay geçiş yaptı. Aynı yıldan itibaren Gebze Teknik Üniversitesi, Kimya Mühendisliği, Proses ve Reaktör Tasarımı anabilim dalında araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.



EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Saraç Z., Taşdelen-Yücedağ Ç., (2021), “Elektro Üfleme Yöntemi ile Polisülfon Nanoliflerin Üretimi ve Optimizasyonu”, 5. Lisansüstü Araştırmalar Sempozyumu, Gebze Teknik Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, 150, 10-12 Haziran.

