

Elektrolif Çekim Yönteminde Gerilim Miktarının Poliakrilonitril Nanoliflerinin Morfolojisine Etkisi

Gonca ŞİMŞEK GÜNDÜZ*¹ ORCID 0000-0002-3355-0645

¹Pamukkale Üniversitesi, Denizli Teknik Bilimler MYO, Tekstil Teknolojisi Programı, Denizli

Geliş tarihi: 28.04.2023

Kabul tarihi: 23.06.2023

Atıf şekli/ How to cite: ŞİMŞEK GÜNDÜZ, G., (2023). Elektrolif Çekim Yönteminde Gerilim Miktarının Poliakrilonitril Nanoliflerinin Morfolojisine Etkisi. Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Dergisi, 38(2), 347-357.

Öz

Çalışmada elektro lif çekim yönteminde farklı gerilim miktarlarında üretilen poliakrilonitril (PAN) nanoliflerinin morfolojik özellikleri incelenmiştir. Bu amaçla 14 kV, 20 kV ve 26 kV değerlerinde gerilim uygulanarak üretim yapılmıştır. Nanoliflerin çapları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ölçülmüş, elde edilen çap değerlerinin istatistiki olarak karşılaştırılmasında SPSS programından yararlanılmıştır. 14 kV'ta üretilen nanoliflerin ortalama çapları 519-582 nm arasında değişirken bu değer 20kV'ta 511-566 nm ve 26 kV'ta 506-569 nm aralığında değişmiştir. Gerilim miktarı belli bir değere kadar artırıldığında hem daha ince lifler elde edilmiş hem daha kolay çap kontrolü sağlanabilmektedir. Gerilim miktarının daha da artırılması ile boncuk oluşumunun ve boncuk büyüklüğünün arttığı görülmüştür. Ayrıca uygulanan gerilimin lif dizilimi ve lifler arası boşluğu etkilediği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrolif çekimi, Voltaj, Nanolif çapı, Morfoloji, PAN

The Effect of Voltage Amount on The Morphology of Polyacrylonitrile Nanofiber in Electrospinning

Abstract

In the study, morphological properties of polyacrylonitrile (PAN) nanofibers produced at different voltage amounts in electrospinning method were investigated. For this purpose, production was carried out by applying voltage at 14 kV, 20 kV and 26 kV values. The diameters of the nanofibers were measured by scanning electron microscopy (SEM), and SPSS program was used to compare the diameter values obtained statistically. While the average diameters of nanofibers produced at 14 kV varied between 519-582 nm, this value varied between 511-566 nm at 20 kV and 506-569 nm at 26 kV. When the amount of voltage is increased up to a certain value, both finer fibers are obtained and easier diameter control can be achieved. It was observed that bead formation and bead size increased with further increase in the amount of voltage. Also, it was observed that applied voltage affects the fiber arrangement and the interfiber spacing.

Keywords: Electrospinning, Voltage, Nanofiber diameter, Morphology, PAN

*Sorumlu yazar (Corresponding Author): Gonca ŞİMŞEK GÜNDÜZ, gsimsek@pau.edu.tr

1. GİRİŞ

Nanoliflere olan ilgi son yıllarda giderek artmaktadır. Artan bu ilgi basit donanımlar ile imalat yapılabilmesi ve üretimleri için az enerji gerektirmesi [1], oldukça geniş yüzey alanına ve yüksek gözenekliliğe sahip olması [2] gibi özelliklerden kaynaklanmaktadır. Bu özellikleri sebebiyle nanolifler, koruyucu giysiler [3], tıbbi tekstiller [4-7], filtrasyon [8,9], ısı yalıtımı [10] ve ses yalıtımı [11] gibi uygulama alanlarına sahiptirler.

Nanoliflerin elde edilmesinde kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Farklı yöntemlere göre üstün özellikleri olan elektro lif çekim yöntemi ile, diğer yöntemlerde kullanılabilen tüm polimerlerden oldukça ince, kesintisiz nanolifler elde edilebilmektedir [12,13]. Nanolif üretimi için etkili yöntem elektrolif çekimidir [14]. Elektro lif çekim yöntemi en basit haliyle, yüksek voltaj güç kaynağı, toplayıcı ve bir çözelti besleme ünitesi ile iğneden oluşmaktadır [15]. Bu işlemde polimer sıvısına, sıvı içindeki yükler indüklenerek şekilde yüksek gerilim uygulanır. Bu yükler kritik bir miktara ulaştığında düze ucundaki damla Taylor konisi oluşturularak jet formunda çıkmaktadır. Oluşan jet daha düşük potansiyele sahip alana doğru yol almaktadır [16]. Toplayıcı üzerinde nanolifler birikmektedir.

Elektro lif çekim yöntemi oldukça kolay uygulanabilen bir yöntem olsa da nanoliflerin oluşumunu ve morfolojisini etkileyen hassas ve çok sayıda parametre vardır [17]. Bunlar çözelti parametreleri (iletkenlik, yüzey gerilimi, viskozite vb.), proses parametreleri (uygulanan voltaj, iğne ucu ve toplayıcı arasındaki mesafe, polimer akış hızı, iğne çapı vb.), çevresel parametrelerdir (sıcaklık, nem vb.) [18,19]. Elektro lif çekim yönteminin en büyük dezavantajı üretilen nanoliflerin morfolojisini etkileyen parametrelerin sayısının çok olmasıdır [20]. Gerilim miktarı nanolif morfolojisini etkileyen parametrelerden biridir. Voltajın lif morfolojisi üzerine etkileri çeşitli çalışmalarda incelenmiştir.

Ray ve Lalman (2011), Padmanabhan ve arkadaşları (2011), Saligheh ve arkadaşları (2015) çalışmalarında uygulanan voltajın çap üzerinde

önemli derecede etkisi olduğunu belirtmektedirler [21-23]. Kozanoğlu (2006), uygulanan voltajın genellikle lif çapında azalmaya yol açtığını ve voltajın artması ile liflerin düzensiz bir hal aldığını belirtmektedir [1]. Özkoç (2010) uygulanan voltajın artırılması ile lif çapında azalma olduğunu, fakat lif morfolojisinin bozulduğunu dolayısıyla boncuk oluşumunun arttığını söylemektedir [24]. Ramakrishna ve arkadaşları (2005) artan voltaj değeri ile lif üzerinde boncuklanma miktarının artmasını jetin artan kararsızlığına bağlamaktadırlar [16]. Süslü (2009), voltaj artışı ile lif çaplarında azalma olduğunu belirtmektedir [25]. Gemci ve arkadaşları (2011), uygulanan voltajın artması ile lif çapının azaldığını fakat minimum ve maksimum lif çapları arasındaki farkın arttığını belirtmişlerdir [26]. Yeoh (2009) daha yüksek voltaj değerinin daha düşük lif çapına neden olduğunu belirtmiştir [27]. Denghan ve arkadaşları (2016) benzer şekilde belirli bir eğirme mesafesinde lif çapıyla voltaj arasında negatif ilişki olduğunu söylemişlerdir [28]. Artan voltaj polimer jeti içinde Coulomb kuvvetlerinin daha fazla olmasına ve daha güçlü elektrik alan oluşmasına neden olmaktadır. Buna bağlı olarak polimer çözeltinin daha fazla uzamasını sağlamaktadır. Böylece daha ince lifler elde edilebilmektedir. Ayrıca daha hızlı buharlaşma etkisiyle daha kuru lifler elde edilebilmektedir [16]. Artan voltajın lif çapını artırdığını gösteren çalışmalar da vardır. Du ve arkadaşları (2008) artan voltaj ile lif çapının arttığını belirtmişlerdir [29]. Benzer şekilde Wu ve arkadaşları (2013), çalışmalarında voltaj arttıkça iplik kalınlığının arttığını belirtmişlerdir [30]. Miri ve arkadaşları (2016) polimerlerin dışında zein liflerini asetik asitle çözerek yaptıkları çalışmada artan voltaj ile ortalama lif çapının arttığını belirtmişlerdir [31]. Voltajın artırılması liflerin kristalizasyonunu da etkilemektedir. Elektrostatik alan, polimer moleküllerinin daha düzenli olmasını sağlamaktadır, ancak belirli bir voltaj değerinin üzerinde kristalin yapı azalmaktadır. Voltaj artırıldığında polimer jeti hızlanacağından uçuş süresi kısalmaktadır. Bu durumda polimer moleküllerinin paralelleşerek düzgün yapı oluşturma süresi de azalacak ve kristalizasyon derecesi düşecektir. Dolayısıyla voltaj çok düşük ya da çok yüksek olmamalı ve belirli bir kritik değerde ayarlanmalıdır [16, 32].

Bununla birlikte artan voltajın etkisinin belirsiz olduğunu gösteren çalışmalar vardır. İkiz (2009), voltaj değerinin nanolif çapı üzerindeki etkisinin belirsiz olduğunu belirtmektedir. Bazı durumlarda lif çapında artış gözlenirken, bazı durumlarda azalmalar gözlemlendiğini fakat voltaj değerinin artmasının, lif çapı değişkenliğini kesin olarak arttırdığını söylemektedir. Çalışmada voltaj yükseldiğinde daha fazla boncuklanma olduğu görülmüş ve bu durum gerilim artışının polimer akışını düzensiz hale getirmesine bağlanmıştır [33]. Benzer şekilde Beypazar (2013), uygulanan voltajın lif çapı üzerindeki etkisinin belirsiz olduğunu söylemektedir [34]. Özkoç (2010), voltajın artması ile lif çapının azaldığını fakat bu azalışın lineer olmadığını, bazı noktalarda tekrar artış gözlemlendiğini belirtmektedir [24]. Üstün (2011), uygulanan voltaj değerinin etkilerinin belirsiz olduğunu, bazı durumlarda voltajın artması ile lif çapının azaldığını bazı durumlarda da arttığını söylemektedir. Çalışmada artan voltaj ile lif çapındaki varyasyonun arttığı belirtilmektedir [35]. Zhang ve arkadaşları (2005), çalışmalarında belli bir gerilim değeri üzerindeki yüksek voltajlarda geniş bir çap dağılımının oluştuğunu söylemektedirler [36].

Voltaj miktarının lif morfolojisi üzerinde önemli etkilerinin olduğu çalışmalar dışında etkisinin olmadığını gösteren çalışmalar vardır. Karayeğen (2016), artan voltajın ortalama lif çapları üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığını söylemektedir [37]. Gu ve arkadaşları (2005) çalışmalarında uygulanan voltajın liflerin çapı ve lif çapı standart sapması üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedirler [38]. Hakkak ve Rafizadeh (2013) uygulanan voltajın nano lif çapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını belirtmektedirler [39]. Benzer şekilde Khanlou ve arkadaşları (2015), Senthil ve Anandhan (2015), Khalili ve arkadaşları (2016), Svinterikos ve Zuburtikudis (2017) çalışmalarında voltajın lif morfolojisi üzerinde anlamlı etkisinin olmadığını söylemektedirler [40-43].

Bu çalışmada poliakrilonitril polimeri kullanılarak, lif morfolojisi voltaj parametresinde değişiklik yapılarak incelenmiştir. Nanolif morfolojisi ile voltaj miktarı arasındaki ilişkilerin incelendiği

çalışmalara bakıldığında birbirleriyle çelişkili sonuçlar çıktığı görülmektedir. Çalışma konuyla ilgili çelişkileri ortadan kaldırma iddiası taşımamakla beraber farklı olarak bu duruma bir açıklama getirme çabasıdır. Böylece çalışma, konuyla ilgili çalışmalara ilave sonuçlar sağlama açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

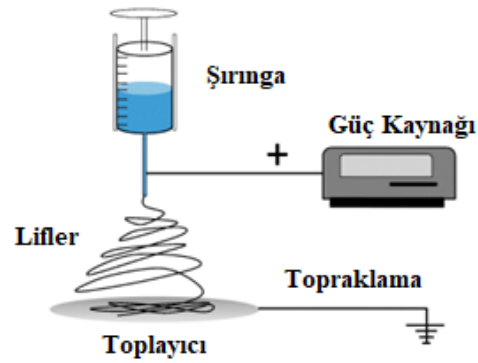
2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Çalışmada PAN polimeri, dimetilformamid (DMF) solventinde oda sıcaklığında çözülerek polimer çözeltisi hazırlanmıştır. Kullanılan PAN polimerinin molekül ağırlığı 150,000 g/mol'dür. %12'lik hazırlanan çözeltinin viskozitesi 891 cp, iletkenlik değeri 116 $\mu\text{S/cm}$ ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan diğer malzemeler şunlardır; polimer solüsyonunu sisteme beslemek için plastik şırınga (10 ml'lik), polimer solüsyonunun şırıngadan iğneye iletilmesini sağlamak için silikon hortum (1,5 / 4 ml), polimer çözeltisinin hazırlanmasında ve saklanmasında kullanılmak üzere cam beher (50 ml, 250 ml, 400 ml), pipet (10 ml, 25 ml), cam şişe (250 ml, 500 ml), iğne ucu.

2.2. Metot

Çalışmada, Süleyman Demirel Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında bulunan şırınga beslemeli elektro lif çekim düzeneği kullanılmıştır. Şekil 1'de deneylerde kullanılan elektro lif üretim düzeneği görülmektedir.



Şekil 1. Şırınga beslemeli elektro lif üretim düzeneği [44]

Bu düzenek yüksek voltaj güç kaynağı, metal toplayıcı (topraklanmış) ve polimer besleme pompası olmak üzere başlıca üç ana parçadan oluşmaktadır. Mevcut güç kaynağı ile kademeli olarak voltaj ayarlanabilmektedir. Güç kaynağının pozitif olan ucu şırınga ile negatif olan ucu metal toplayıcı ile bağlıdır. İğne ucundaki polimer çözelti damlası ile metal toplayıcı arasında elektrostatik alan oluşturulmuş, uygulanan voltaj, polimer çözelti damlasının iğneden püskürtülmesini sağlamıştır. Elektriksel kuvvetler sebebiyle polimer çözelti damlası uzayarak çok ince bir lif haline gelmiş, çözücü buharlaşınca, yüzeye birikmiş, oldukça uzun, rasgele dağılmış lif ağı elde edilmiştir. Lif ağının kolay bir şekilde yüzeyden ayrılabilmesi ve morfolojik olarak incelenmesi amacıyla toplayıcı üzerine siyah renkli kâğıt konulmuştur. 10 dakika boyunca nanolifler kâğıt üzerinde toplanmışlardır. Tüm deneyler, normal atmosfer basıncı altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney parametreleri Çizelge 1’de verilmektedir.

Çizelge 1. Deney parametreleri

İşlem Parametreleri	Değerler
Elektrotlar Arası Mesafe	20 cm
Akış Hızı	1 ml/saat
Metal Toplayıcı Malzemesi	Bakır
Metal Toplayıcı Kalınlığı	10 mm
Metal Toplayıcı Şekli	Daire (10 cm çaplı)
İğne Çapı	22G (0,7 mm)
Voltaj Miktarı	14 kV, 20 kV, 26 kV

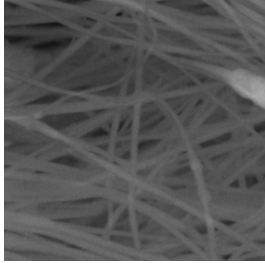

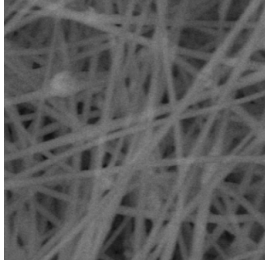

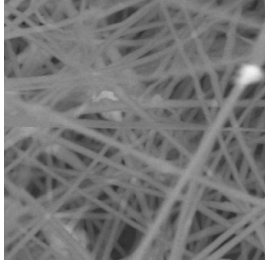

Çalışmada tek iğneli elektro lif çekim yöntemiyle nanolif üretiminde, uygulanan voltaj miktarının nano ağ yapının morfolojisine etkisi incelenmiştir. Voltaj miktarının etkisini incelemek için Çizelge 1’de verilen deney parametreleri ile çalışılmıştır. Voltaj miktarı haricinde tüm parametreler sabit tutularak, 3 farklı gerilim değeri uygulanmıştır. Önce voltaj değeri ayarlanıp, sonra güç kaynağı çalıştırılmıştır. Kâğıt yüzeyinde biriken nanoliflerin

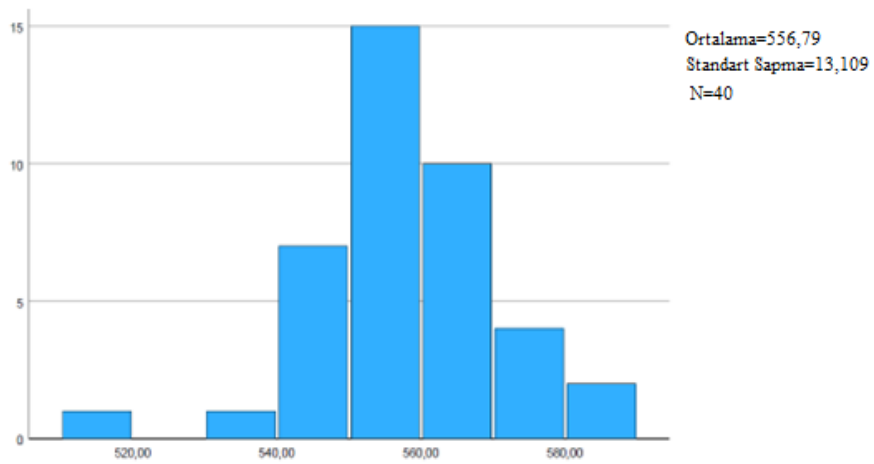
orta kısımlarından bir miktar alınarak numuneler oluşturulmuştur. Üretilen nano liflerin çaplarını belirlemek için Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği laboratuvarında (Eskişehir) bulunan taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Her numune için rastgele 10, her bir farklı voltaj değeri için 40 çap ölçümü yapılarak ortalama lif çapı hesaplanmıştır. Elde edilen nanoliflerin inceliklerinin istatistiki olarak karşılaştırılmasında SPSS programı kullanılmıştır.

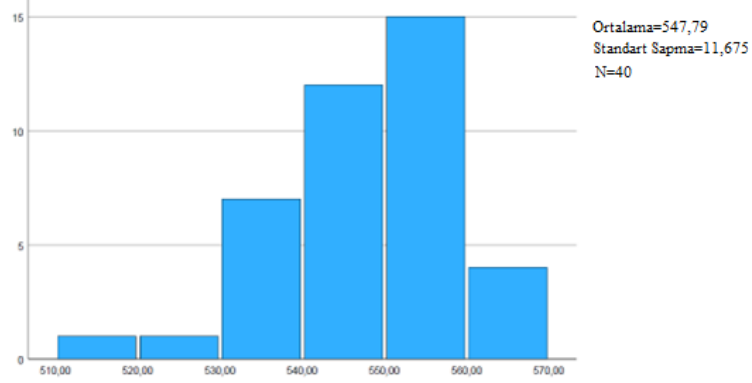
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Uygulanan gerilim hem polimer çözeltisine elektrik alandan etkilenebilmesi için gerekli olan yükü hem de iğne ucu ile toplayıcı arasında elektrik alanının oluşmasını sağlamaktadır. Denemelere 5 kV ve 10 kV’lık gerilim değerleri ile başlanmıştır. Ancak bu gerilim değerlerinin Çizelge 1’de verilen parametreler ile kesintisiz lif oluşumu için uygun olmadığı görülmüştür. Sisteme 5 kV ‘lık gerilim verildiğinde lif oluşumu gözlenmemiştir. Bu durumda iğne ucundan polimer çözeltisi sadece damlamaktadır. Oluşan çözelti damlasına etki eden çekim kuvveti, yüzey geriliminden düşük kalmıştır. Gerilim 10 kV değerine yükseltildiğinde lif oluşumu gözlenmekte ancak yoğun bir damlama oluşmaktadır. 14 kV değerine çıkıldığında lif üretimi kesintisiz bir biçimde başlamıştır. Güç kaynağı 14 kV, 20 kV ve 26 kV gerilim değerlerinde çalıştırılmıştır. 14 kV gerilim değerinde üretim yapılırken elde edilen lifler 20 kV ve 26 kV gerilim değerlerinde üretim yapılan liflere göre daha geniş alana yayılmışlardır (Çizelge 2). Çizelge 2’den görüldüğü üzere gerilim arttıkça kâğıt yüzeyinde lifler daha fazla bir araya toplanmışlardır. SEM ölçümlerinin sonucu gerilim artışı ile lif çaplarında azalma olduğu belirlenmiştir. 14 kV’ta üretilen nanoliflerin ortalama çapları 519-582 nm arasında değişirken bu değer 20kV’ta 511-566 nm ve 26 kV’ta 506-569 nm aralığında değişmektedir (Şekil 2-4).

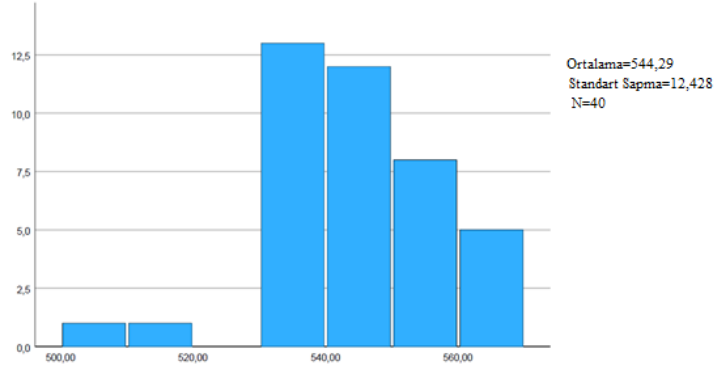
Çizelge 2. Farklı gerilim değerlerinde elde edilen nanoliflerin SEM görüntüleri ve kâğıt yüzeyindeki görüntüleri

Gerilim değeri	SEM görüntüleri (7,50 kx)	Kâğıt yüzeyindeki görünüm
14 kV		
20 kV		
26 kV		

**Şekil 2.** 14 kV gerilim değerinde elde edilen nanoliflerin çap dağılımı



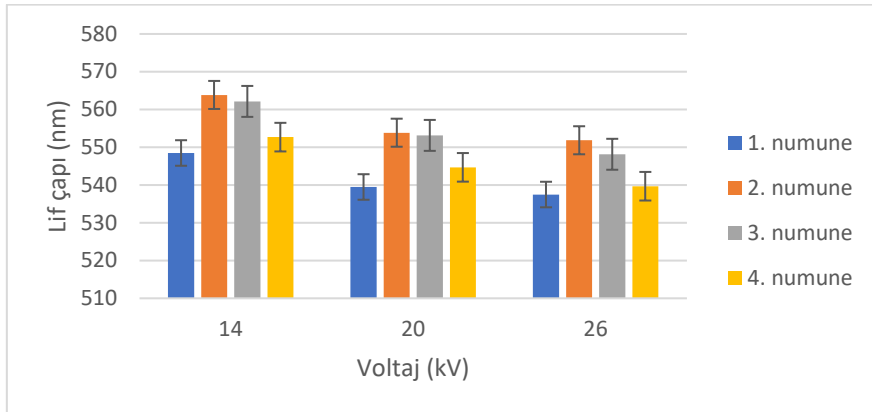
Şekil 3. 20 kV gerilim değerinde elde edilen nanoliflerin çap dağılımı



Şekil 4. 26 kV gerilim değerinde elde edilen nanoliflerin çap dağılımı

Farklı gerilim değerlerinde elde edilen nano liflerin ortalama çap değerleri arasındaki ilişki Microsoft Excel programı ile oluşturulan grafikte

görülmektedir (Şekil 5). Şekil 5'te görüldüğü gibi uygulanan gerilim arttıkça lif çapı azalmaktadır.



Şekil 5. Farklı gerilim değerlerinde elde edilen nano liflerin ortalama çap değerleri

Lif çapı verilerindeki değişimin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığını görebilmek için parametrik testler yapılmıştır. Bu testlerin uygulanabilmesi için verilerin normal dağılıma uyması ve varyansların homojen olması şartlarının sağlanması gerekmektedir. Normal dağılıma uygun

tespiti için Shapiro-Wilk testi ve varyansların homojenliği testleri yapılmıştır. Çizelge 3'te görüldüğü üzere çap verileri normal dağılıma sahiptir ($p>0,05$). Aynı çizelgeden varyansların homojen olduğu görülmektedir ($p>0,05$).

Çizelge 3. Normallik ve varyansların homojenliği testi sonuçları

Çap	Voltaj (kV)	Shapiro-Wilk İstatistiği	df	p	
	14	,976	40	,551	
	20	,948	40	,064	
	26	,953	40	,096	
Varyansların Homojenliği testi					
Çap	Levene İstatistiği		df1	df2	p
			2	117	,819

Farklı gerilim değerleri için gruplar arasındaki lif çapı farklarının istatistiksel olarak anlamlılığının tespitinde tek yönlü varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Çizelge 4'te görüldüğü üzere analiz sonucunda gerilim faktörünün seviyeleri arasındaki farklar istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Voltaj miktarını gösteren 3 seviyenin (14 kV, 20 kV, 26 kV), lif inceliğini gösteren çap ortalamaları bakımından, hangilerinin farklı olduğu Tukey testi ile bulunmuştur (Çizelge 4). Buna göre 14 kV ve 20 kV gerilimleri arasında çap açısından anlamlı fark vardır ($p<0,05$). 20 kV ve 26 kV arasında çap açısından anlamlı fark yoktur ($p>0,05$). Buna göre gerilim değerinin 14 kV'tan

20 kV'a artırılmasıyla lif çapının azaldığı istatistiksel olarak söylenebilmektedir. Uygulanan voltaj değerinin artırılması ile lif çapının orantılı bir şekilde azalmadığı görülmektedir. 14 kV'tan 20 kV'a çıkıldığında daha ince liflerin elde edildiği söylenebilir. Ancak 20 kV'tan 26 kV'a çıkıldığında daha ince liflerin elde edildiği söylenememektedir. Şekil 5'te görüldüğü üzere voltajın 20 kV'tan 26 kV'a çıkarılmasıyla elde edilen liflerin ortalama çaplarında azalma meydana gelmektedir. Ancak yapılan Tukey testi sonucu, p değerlerinin 0,05'ten büyük olması nedeniyle, artan voltajın lif çapları üzerinde etkisinin olmadığı görülmektedir.

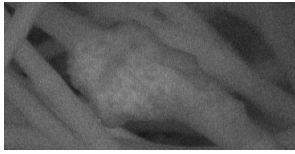
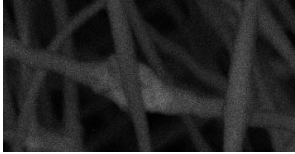
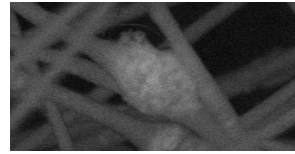
Çizelge 4. Varyans analizi ve Tukey testi sonuçları

Varyans analizi					
	Kareler toplamı	df	Kare ortalaması	F	p
Gruplar arasında	3326,66	2	1663,33	10,78	,001
Gruplar içinde	18041,64	117	154,20		
Toplam	21368,31	119			
Tukey testi					
(I) Gerilim	(J) Gerilim	Ortalama fark (I-J)	p		
14 kV	20 kV	9,00000*	,004		
	26 kV	12,50000*	<,001		
20 kV	14 kV	-9,00000*	,004		
	26 kV	3,50000	,420		
26 kV	14 kV	-12,50000*	<,001		
	20 kV	-3,50000	,420		

Çalışmada gerilim değeri arttıkça boncuk oluşumunun arttığı gözlenmiştir. Bu durum artan voltaj ile artan jet kararsızlığına bağlanabilmektedir. Ayrıca boncuk büyüklüğü voltaj miktarına bağlı olarak değişmektedir (Çizelge 5). Uygulanan voltajın miktarı iğne ucundaki damlacığın şeklini ve boncuk morfolojisini değiştirebilir. En-boy oranı voltaj miktarı arttıkça önce artar, sonra azalır. Voltaj miktarı arttıkça iğne ile toplayıcı arasında daha yüksek elektostatik itme kuvveti oluşabilmekte ve bu da jette daha yüksek çekme gerilimi sağlayarak boncuk boyutunu küçültmektedir [45]. Deitzel ve arkadaşları voltajın artmasıyla boncuk kusur yoğunluğunun arttığını bildirmişlerdir [32]. Çizelge 5'te görüldüğü gibi gerilimin 14 kV'tan 20 kV'ta çıkarılmasıyla boncuk boyutunun küçüldüğü, 20

kV'tan 26 kV'ta çıkarılmasıyla büyüdüğü görülmüştür. Elektro lif çekim yönteminde lif oluşumunun gerçekleşebilmesi için minimum miktarda voltaj gerekmektedir. Voltaj miktarı belirli bir seviyeye kadar artırıldığında boncuksuz ve ince lifler elde edilmektedir. Ancak voltaj miktarı artırılmaya devam edildiğinde boncuk oluşumu ve boncukların büyüklüğü artmaktadır. Ayrıca gerilim değerinin 14 kV'tan 20 kV'a artırılmasıyla çap varyansının düştüğü, 20 kV'tan 26 kV'ta artırılmasıyla varyansın yükseldiği görülmüştür. Gerilim değerinin belli bir değere kadar artırılması ile hem daha ince lifler elde edilmekte hem de çap kontrolü sağlanabilmektedir. Ancak belli bir gerilim değerinden sonra çap kontrolünün zorlaştığı söylenebilmektedir.

Çizelge 5. Farklı gerilim değerlerinde boncuk oluşumu

Gerilim değeri	14 kV	20 kV	26 kV
SEM görüntüleri			

4. SONUÇLAR

Farklı gerilim miktarlarında yapılan çalışma ile bu parametrenin poliakrilonitril liflerinin inceliği ve dizilimi üzerindeki etkisi anlaşılmasına çalışılmıştır.

Çalışmada uygulanan gerilim arttıkça lif çapının azaldığı görülmüştür. Elektro lif çekim yönteminde uygulanan gerilim miktarı arttığında hem polimer çözeltisi üzerinde yük miktarı artmakta hem de bu yüklerin oluşturduğu itici kuvvet artmaktadır. Bunun sonucunda polimer jeti daha fazla uzamakta ve daha ince lifler elde edilmektedir. Gerilim değerinin 14 kV'tan 20 kV'ta artırılmasıyla oluşan lif çapı azalmasının bu duruma bağlı olduğu düşünülmektedir. Gerilim değerinin 20 kV'tan 26 kV'ta artırılmasıyla lif çapı azalmış ancak bu azalış istatistiki olarak anlamlı bulunmamıştır. Dolayısıyla gerilimin biraz daha artırılmasıyla lif çapında artış yaşanabileceği düşünülmektedir. Çünkü lif çapı

jetin havada kaldığı süreden de etkilenmektedir. Gerilim arttırıldığında jet hızlanacak, havada daha kısa süre kalacak ve daha kısa süre gerilecektir. Bu durumda lif çapı artacaktır.

Farklı gerilim değerlerinde elde edilen nanolif ağlarının kâğıt yüzeyindeki görünüşleri karşılaştırıldığında voltaj miktarının lif dizilimi ve lifler arası boşluk gibi morfolojik özellikleri etkilediği görülmüştür.

Gerilim değeri arttırıldıkça boncuk oluşumunun arttığı gözlenmiştir. Bu durumun jet kararsızlığına bağlı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca boncuk boyutu voltaj miktarına bağlı olarak değişmiştir. Gerilimin 14 kV'tan 20 kV'ta çıkarılmasıyla boncuk boyutunun küçüldüğü, gerilim 26 kV'ta çıktığında boncuk boyutunun büyüdüğü görülmüştür. Voltaj miktarı arttıkça daha yüksek itme kuvveti oluşacaktır. Bu durumda polimer

jetinde daha yüksek çekme gerilimi oluşacak ve boncuk boyutu küçülecektir. Voltajın belli bir değerin üzerinde uygulanmasının ise boncuk kusurlarını artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca gerilim değerinin belli bir voltaj miktarından sonra varyansı yükselttiği görülmüştür. Gerilim değerinin belli bir değere kadar artırılması ile hem daha ince lifler elde edilmekte hem de daha kolay çap kontrolü sağlanabilmektedir. Ancak belli bir gerilim değerinden sonra çap kontrolünün zorlaştığı söylenebilmektedir.

Çözelti parametreleri (iletkenlik, yüzey gerilimi, viskozite vb.) nanoliflerin oluşumunu ve morfolojisini etkilediği için sonraki çalışmalarda farklı konsantrasyonlarda çözelti hazırlanarak ve farklı polimerler kullanılarak araştırma sonuçları genişletilebilir.

5. KAYNAKLAR

1. Kozanoğlu, G., S., 2006. Elektrospinning Yöntemiyle Nanolif Üretim Teknolojisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 148.
2. Salem, D. R., 2001. In Structure Formation in Polymeric Fibers: Chapter:6, Electrospinning and Formation of Nanofibers, Hanser Gardner Publications, Carl Hanser Verlag, 580.
3. Lee, S., Obendorf, S. K., 2006. Developing Protective Textile Materials as Barriers to Liquid Penetration Using Meltelectrospinning. Journal of Applied Polymer Science, 102(4), 3430-3437.
4. Rutledge, G.C., Fridrikh, S.V., 2007. Formation of Fibers by Electrospinning. Advanced Drug Delivery Reviews, 59(14), 1384-1391.
5. Bhullar, S. K., Rana, D., Lekesiz, H., Bedeloglu, A. C., Ko, J., Cho, Y., Ramalingam, M., 2017. Design and Fabrication of Auxetic PCL Nanofiber Membranes for Biomedical Applications. Materials Science And Engineering C, 81, 334-340.
6. Kim, S. E., Heo, D. N., Lee, J. B., Kim, J. R., Park, S. H., Jeon, S. H., Kwon, K. II., 2009. Electrospun Gelatin/Polyurethane Blended Nanofibers for Wound Healing. Biomedical Materials, 4(4), 044106.
7. Kim, K., Luuc, Y. K., Chang, C., Fang, D., Hsiao, B. S., Chua, B., Hadjiargyrou, M., 2004. Incorporation and Controlled Release of A Hydrophilic Antibiotic using Poly (Lactide-Co-Glycolide) Based Electrospun Nanofibrous Scaffolds. Journal of Controlled Release, 98, 47-56.
8. 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), 43025.
9. Wang, X., Fang, D., Yoon, K., Hsiao, B. S., Chu, B., 2006. High Performance Ultrafiltration Composite Membranes Based on Poly (Vinyl Alcohol) Hydrogel Coating on Crosslinked Nanofibrous Poly (Vinyl Alcohol) Scaffold. Journal of Membrane Science, 278, 261-268.
10. Gibson, P.W., Lee, C., Ko, F., Reneker, D., 2007. Application of Nanofiber Technology to Nonwoven Thermal Insulation. Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2(2), 32-40.
11. Mohrova, J. and Kalinova, K., 2012. Different Structures of PVA Nanofibrous Membrane for Sound Absorption Application. Journal of Nanomaterials, 2, 1-4.
12. Üstündağ, G.C., Karaca, E., 2009. Poli(Vinil Alkol)/Sodyum Alginat Karışımlarından Elektro Çekim Yöntemi ile Elde Edilen Nanolifli Yüzeylerin İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 14(1), 159-172.
13. Üstündağ, G.C., 2009. Elektrospinning Yöntemi ile Biyomedikal Kullanıma Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi ve Uygulaması. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 181.
14. Gül, A., Tiyek, İ., 2022. Membran Teknolojileri ve Membran Teknolojilerinin Elektrospinning Yöntemi ile Nano Lif Üretimi Üzerine Literatür Taraması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(3), 183-211.
15. Formhals, A., 1934. Process and Apparatus for Preparing Artificial Threads, US Patent, No.1, 975, 504.
16. Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.-E., Lim, T.-C., Ma, Z., 2005. An Introduction to Electrospinning and Nanofibers, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 396.

17. Şenocak, S., 2021. Nanoliflerden Eğrilmiş İpliklerin Örne Performansı ve Kumaş Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 85.
18. Emül, E., 2016. Elektrospin Tekniği ile nHAp/Jelatin/Antikanserijen İçeren Nanofibril Üretimi, Karakterizasyonu ve Hücre Uyumunun Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Nanoteknoloji ve Nanotıp Anabilim Dalı, 85.
19. Kirecci, A., Özkoç, Ü., İçoğlu, H.İ., 2012. Determination of Optimal Production Parameters for Polyacrylonitrile Nanofibers. *Journal of Applied Polymer Science*, 124(6), 4961-4968.
20. Yalçın, M., 2020. Elektroğirme Yöntemi ve Nanofiber Üretimi, Türkiye’de Mühendislik ve Fen Bilimlerinde Akademik Araştırmalar, İksad Yayınevi, Ankara, 132.
21. Ray, S., Lalman, J.A., 2011. Using the Box–Benkhen Design (BBD) to Minimize the Diameter of Electrospun Titanium Dioxide Nanofibers. *Chemical Engineering Journal*, 169, 116-125.
22. Padmanabhan, T., Kamaraj, V., Magwood Jr., L., Starly, B., 2011. Experimental Investigation on the Operating Variables of A Near-Field Electrospinning Process Via Response Surface Methodology. *Journal of Manufacturing Processes*, 13, 104-112.
23. Saligheh, O., Khajavi, R., Yazdanshenas, M.E., Rashidi, A., 2015. Fabrication and Optimization of Poly(Vinyl Alcohol)/Zirconium Acetate Electrospun Nanofibers using Taguchi Experimental Design. *Journal of Macromolecular Science Part B*, 54(11), 1391-1403.
24. Özkoç, Ü., 2010. Experimental Investigation of Optimal Spinning Parameters for Nanofibers. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 132.
25. Süslü, A., 2009. Elektro-Eğirme Yöntemi ile Nanofiber ve Nanotüp Üretimi. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 83.
26. Gemci, R., Yener, F., Solak, H., 2011. Uygulanan Voltaj Değeri ile Pvb Nanolif Çapı Arasındaki İlişki. *KSU Mühendislik Dergisi*, 14(1), 31-34.
27. Yeoh, S.J., 2009. Electrospun Cellulose Ultra-Fine Fibers From Kraft Pulp. Master’s Thesis, University of British Columbia, The Faculty Of Graduate Studies, Materials Engineering, Vancouver, 125.
28. Dehghan, S.F., Golbabbei, F., Maddah, B., Latifi, M., Pezeshk, H., Hasanzadeh, M., Akbar-Khanzadeh, F., 2016. Optimization of Electrospinning Parameters for Polyacrylonitrile-Mgo Nanofibers Applied in Air Filtration, *Journal of The Air & Waste Management Association*, 66(9), 912-921.
29. Du, J., Shintay, S., Zhang, X., 2008. Diameter Control of Electrospun Polyacrylonitrile/Iron Acetylaceton Ultrafine Nanofibers. *Journal of Polymer Science, Part B Polymer Physics*, 46(15), 1611-1618.
30. Wu, Z.Y., Monro, A.K., Milne, R.I. Wang, H. Yi, T.S., Liu, J. ve Li D., 2013. Molecularphylogeny of the Nettle Family (Urticaceae) Inferred Frommultiple Loci of Three Genomes and Extensive Generic Sampling. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 69(3), 814-827.
31. Miri, M.A., Movaffagh, J., Najafi, M.B.H., Najafi, M.N., Ghorani, B., Koocheki, A., 2016. Optimization of Electrospinning Process of Zein Using Central Composite Design. *Fibers and Polymers*, 17(5), 769-777.
32. Deitzel, J.M., Kleinmeyer, J., Harris, D., Beck Tan, N.C., 2001. The Effect of Processing Variables on the Morphology of Electrospun Nanofibers and Textiles. *Polymer*, 42, 261-272.
33. İkiz, Y., 2009. Elektro Çekim Yöntemi İşlem Parametrelerinin PVA Nanolif Morfolojisine Etkileri. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15(3), 363-369.
34. Beypazar, Ö., 2013. Nanolif Üretiminde Çap Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 86.
35. Üstün, A., 2011. Hava Filtrasyonu için Nanolif Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, 69.
36. Zhang, C., Yuan, X., Wu, L., Han, Y., Sheng, J., 2005. Study on Morphology of Electrospun

- Poly(Vinyl Alcohol) Mats. *European Polymer Journal*, 41, 423-432.
37. Karayeğen, G., 2016. Elektrik Eğirme Yöntemini Kullanarak Nanofiberlerin Elektrik Alan ile Yönlendirme Olasılığının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Başkent Üniversitesi Biyomedikal Mühendisliği Anabilim Dalı, 72.
38. Gu, S.Y., Ren, J., Vancso, G.J., 2005. Process Optimization and Empirical Modeling for Electrospun Polyacrylonitrile (PAN) Nanofiber Precursor of Carbon Nanofibers. *European Polymer Journal*, 41, 2559-2568.
39. Hakkak, F., Rafizadeh, M., 2013. Optimization of Electrospun Polyacrylonitrile/Poly (Vinylidene Fluoride) Nanofiber Diameter Using the Response Surface Method. *Journal of Macromolecular Science, Part B: Physics*, 52, 1250-1264.
40. Khanlou, H.M., Ang, B.C., Talebian, S., Afifi, A.M., Andriyana, A., 2015. Electrospinning of Polymethyl Methacrylate Nanofibers: Optimization of Processing Parameters Using the Taguchi Design of Experiments. *Textile Research Journal*, 85(4), 356-368.
41. 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.
42. Khalili, S., Khorasani, S.N., Saadatkish, N., Khoshakhlagh, K., 2016. Characterization of Gelatin/Cellulose Acetate Nanofibrous Scaffolds: Prediction and Optimization by Response Surface Methodology and Artificial Neural Networks. *Polymer Science, Series A*, 58(3), 399-408.
43. Svinterikos, E., Zuburtikudis, I., 2017. Tailor-Made Electrospun Nanofibers of Bio Waste Lignin/Recycled Poly (Ethylene Terephthalate). *The Journal of Polymers and the Environment*, 25, 465-478.
44. Koenig, K., Beukenberg, K., Langensiepen, F., Seide, G., 2019. A New Prototype Melt-Electrospinning Device for the Production of Biobased Thermoplastic Sub-Microfibers and Nanofibers. *Biomaterials Research* 23, 10.
45. Lee, K.H., Kim, H.Y., Bang, H.J., Jung, Y.H. ve Lee, S.G., 2003. The Change of Bead Morphology Formed on Electrospun Polystyrene Fibers. *Polymer*, 44, 4029-4034.

