



Elektrolif Çekimiyle Üretilen Nanoliflerin İnceliğini Etkileyen Parametrelerin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu

Gonca Şimşek Gündüz^{1*}

^{1*} Pamukkale Üniversitesi, Denizli Teknik Bilimler MYO, Tekstil Teknolojisi Programı, Denizli, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-3355-0645), gsimsek@pau.edu.tr

(İlk Geliş Tarihi 19 Haziran 2023 ve Kabul Tarihi 14 Temmuz 2023)

(DOI: 10.31590/ejosat.1316508)

ATIF/REFERENCE: Şimşek Gündüz, G. (2023). Elektrolif Çekimiyle Üretilen Nanoliflerin İnceliğini Etkileyen Parametrelerin Taguchi Yöntemi ile Optimizasyonu. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (51), 238-244.

Öz

Çalışmada, elektrolif çekim yöntemi ile elde edilen nanoliflerin çap değerleri Taguchi tasarımına göre optimize edilmiştir. Deney parametreleri iğne çapı, akış hızı, elektrotlar arası mesafe, voltaj miktarı ve konsantrasyon olarak belirlenmiştir. L27 ortogonal matrisi kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Belirlenen deneyler yapılarak Minitab programı yardımıyla ortalama ve sinyal/gürültü (S/N) oranları hesaplanmıştır. Faktörlerin ve seviyelerinin etkilerini görebilmek için grafiksel gösterim kullanılmıştır. Nanolif inceliğine en çok etki eden faktör iğne çapı en az etki eden faktör çözelti akış hızı olarak tespit edilmiştir. En ince lif değerini veren kombinasyon 22 G iğne çapı, 0,5 ml/saat akış hızı, 28 cm mesafe, 26 kV gerilim ve % 9 konsantrasyon olarak belirlenmiştir. Ayrıca nanolif çapı üzerinde etkili olan parametreleri istatistiksel olarak belirleyebilmek için varyans analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda belirlenen parametrelerin nanolif çapı üzerinde etkisi olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Elektrolif Çekimi, Nanolif, Lif Çapı, Taguchi Yöntemi, Optimizasyon.

Optimization of the Parameters Affecting the Fineness of Nanofibers Produced by Electrospinning with Taguchi Method

Abstract

In the study, diameter values of nanofibers obtained by electrospinning method were optimized according to Taguchi design. Experimental parameters were determined as needle diameter, flow rate, distance between electrodes, voltage amount and concentration. Experimental design was made using the L27 orthogonal matrix. Mean and signal/noise (S/N) ratios were calculated with the help of Minitab program by performing the determined experiments. Graphical representation is used to see the effects of factors and their levels. The factor affecting the nanofiber fineness the most was determined as the needle diameter and the least affecting factor was the solution flow rate. The combination giving the thinnest fiber value was determined as 22 G needle diameter, 0.5 ml/hour flow rate, 28 cm distance, 26 kV voltage and 9% concentration. In addition, variance analysis was performed to statistically determine the parameters that affect the nanofiber diameter. It was observed that the parameters determined as a result of the analysis had an effect on the nanofiber diameter.

Keywords: Electrospinning, Nanofiber, Fiber Diameter, Taguchi Method, Optimization.

* Sorumlu Yazar: gsimsek@pau.edu.tr

1. Giriş

İlk olarak Genichi Taguchi tarafından tavsiye edilen yöntem, endüstriyel ürün kalitesinin iyileştirilmesinde kanıtlanan başarısı sebebiyle yaygın bir biçimde uygulanmaktadır (Taguchi, 1989). Taguchi'nin deney tasarım yöntemi, farklı parametrelerin, farklı seviyeleri arasından optimum kombinasyonu belirlemek için oldukça faydalıdır (Gökce and Taşgetiren, 2009). Elektro lif çekim yöntemi nanolif üretiminde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Farklı yöntemlere göre üstün özellikleri olan elektro lif çekim yöntemi ile, diğer yöntemlerde kullanılabilen tüm polimerlerden oldukça ince, kesintisiz nanolifler elde edilebilmektedir (Üstündağ ve Karaca, 2009; Üstündağ, 2009). Elektro lif çekim yönteminin en olumsuz yönü nanoliflerin morfolojisini etkileyen parametrelerin çok olmasıdır (Yalçın, 2020). Bu parametreler: çözelti ile ilgili olanlar (polimer yapısı, moleküler ağırlığı, vizkozitesi, iletkenliği, konsantrasyonu, pH'ı, yüzey gerilimi, sıcaklığı), proses ile ilgili olanlar (iğne ve toplayıcı arasındaki mesafe, iğne çapı, çözelti akış hızı, gerilim, toplayıcı plaka cinsi ve kalınlığı, toplayıcı tipi) ve çevre ile ilgili olanlar (sıcaklık, nem, basınç, atmosfer tipi) şeklinde sınıflandırılabilir (Üstün, 2011; Kirecci et al., 2012; Can and Ersoy 2014; Emül, 2016; Çakmen 2019).

Konuyla ilgili ulusal ve uluslararası literatür incelendiğinde, elektrolif çekim yöntemi ile farklı polimerlerden nanoliflerin elde edildiği çeşitli çalışmaların olduğu, bu çalışmalarda elektrolif çekimi parametrelerinin nanolif çapı ve morfolojisi üzerindeki etkilerinin incelendiği görülmektedir. Khanlou vd. (2015), Taguchi yönteminin, elde edilen lif çaplarını ve morfolojisini etkili bir şekilde uyarlamak amacıyla elektrolif çekiminin kritik parametrelerini istatistiksel olarak optimize etmek için etkili bir yaklaşım olduğunu göstermektedirler. Senthil ve Anandhan (2015), poly(stiren-ko-akrilonitril) polimerini kullandıkları çalışmada liflerin morfolojisi ve çapı üzerinde etkili olan parametrelerin etkilerini ortogonal deney tasarımıyla araştırmışlardır. Çalışma Taguchi yönteminin kullanılmasıyla elektrolif çekim parametrelerinin optimal seviyelerinin sinyal/gürültü (S/N) oranı ve ortogonal dizi analizi kullanılarak elde edilebileceğini göstermiştir. Çözelti konsantrasyonunun liflerin ortalama çapı üzerinde en önemli etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Gerilim ve akış hızının liflerinin morfolojisi ve çapı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Albetran, Dong ve Low (2015), çalışmalarında, Taguchi deney tasarımı yöntemini kullanarak nanolif çapı üzerinde en etkili parametrenin konsantrasyon olduğunu bulmuşlardır. Konsantrasyon, akış hızı, iğne ucu- toplayıcı arasındaki mesafe ve uygulanan gerilim gibi faktörlerin değerlendirildiği çalışmada en küçük çapları elde etmek için en uygun kombinasyon belirlenmiştir. Saligheh, Khajavi, Yazdanshenas ve Rashidi (2015), poli(vinil alkol)/Zirkonyum asetat liflerini ürettikleri çalışmada taguchi yöntemi kullanılarak çözelti konsantrasyonu, iğne ucu-toplayıcı arası mesafe ve gerilim gibi bazı işlem değişkenlerini kullanarak optimizasyon yapmışlardır. Bütün faktörlerin lif çapı üzerinde önemli etkileri olduğu görülmüştür. Celep ve Dinçer (2017), elektrolif çekimi ile nanolif ürettikleri çalışmalarında Taguchi yöntemini kullanarak işlem faktörlerinin poliakrilonitril (PAN) nanoliflerinin çapları üzerindeki etkisini incelemişlerdir. İşlem faktörlerini uygulanan gerilim, polimer çözeltisinin besleme hızı, iğne ile toplayıcı arasındaki mesafe ve çözeltisi konsantrasyonu olarak belirlemişlerdir. Nanoliflerin çaplarından hesaplanan sinyal-gürültü (S/N) oranı kullanılarak, optimum üretim koşullarını belirledikleri çalışmada nanolif çapını belirleyen en etkili parametrenin çözeltisi konsantrasyonu olduğu belirlenmiştir. Wu vd. (2018) poliakrilonitril nanolifli ipliğin sürekli elektrolif çekimi için farklı kalite özelliklerine göre en uygun parametreleri tasarlamak amacıyla Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Çalışmada bu yöntemin optimum parametreleri ve farklı faktörlerin kalite özellikleri üzerindeki etkilerini değerlendirmek için benzersiz bir istatistiksel yöntem olduğu belirtilmektedir. Mohammadi, Mohammadi ve Mehdipour-Atae (2020), elektrolif çekimi ile nanolif ürettikleri çalışmalarında Taguchi yöntemini kullanarak liflerin morfolojisi ve çapı üzerinde parametrelerin etkisini incelemek için uygun sayıda deney tasarlamışlardır. Çözeltisi konsantrasyonu, gerilim, besleme hızı ve iğne ile toplayıcı arasındaki mesafe tasarım parametreleri olarak ele alınmıştır. En etkili parametre çözelti konsantrasyonu çıkmıştır. Meyva-Zeybek ve Kaynak (2020), elektrolif çekim yöntemi ile PLA (polilaktid) ve PLA/POSS (Polihebral Oligomerik Silseskisoksan) nanoliflerini ürettikleri çalışmada Taguchi tekniğini kullanarak optimum parametreleri belirlemişlerdir. PLA için en önemli dört optimum süreç parametresini belirlemek için 81 deney yerine, sadece dokuz deney yapılmasını sağlayan Taguchi yöntemi kullanılarak zaman, iş gücü ve malzeme tüketimi önemli ölçüde azaltılmıştır. Sorkhabi vd. (2022), elektrolif çekim yöntemi ile poli (akrilik asit) (PAAc), poliakrilamid (PAAm) ve poli (vinil alkol) (PVOH) nanoliflerini üretmişlerdir. Taguchi yöntemi kullanılan çalışmada iğne toplayıcı mesafesi, çözelti konsantrasyonu, uygulanan gerilim, çözelti akış hızı ve polimer tipi gibi parametrelerin nanoliflerin çapı ve morfolojisi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Yapılan analizler, polimer tipinin en önemli faktör olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmada, elektrolif çekim yöntemi ile elde edilen PAN nanoliflerin çap değerinin Taguchi yöntemine göre optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu yöntem, genellikle üretim süreçlerinde optimum parametrelerin belirlenmesi, deney parametrelerinin elde edilen deney sonuçları üzerindeki etki düzeylerinin tespit edilmesi ve süreç varyasyonlarının azaltılması amacıyla kullanılan bir istatistiksel deney tasarımı tekniğidir (Erdem, Belevi ve Koçhan, 2010). Taguchi yönteminin parametre tasarımı sırasında uygulanması yani üretim öncesinde uygulanması büyük bir avantaj sağlamaktadır. (Caniyılmaz ve Kutay, 2003). Taguchi yöntemi, geleneksel deney tasarımının göz ardı ettiği kontrol edilemeyen faktörlerin neden olduğu değişkenlerin kontrol altına alınmasına izin veren bir yaklaşımdır. Taguchi, bu faktörlere karşı kontrol faktörlerinin seviyelerini belirleyerek performans ölçütü değerlerini sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürmeyi önermiştir. S/N oranı, istenilen sinyal miktarına karşılık gelen istenmeyen rastgele gürültü değerini temsil eder ve deney verilerinin kalite karakteristiklerini ifade eder (Nas ve Akıncioğlu, 2019). Tam faktöriyel deney tasarımlarında tüm kombinasyonlar denendiği için, zaman ve maliyet kaybı oluşmaktadır. Taguchi deney tasarımında, tüm kombinasyonlarının denenmesi yerine ortogonal dizinler kullanılarak sadece bir bölümü denenmektedir. Deney sonuçlarının Taguchi yöntemi ile değerlendirilmesinde çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, söz konusu tekniklerden biri olan "en küçük daha iyidir" lif çapı için tercih edilmiştir. "En küçük daha iyidir" tekniğine ilişkin eşitlik aşağıda yer almaktadır (Kalyon, 2019).

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

2. Materyal ve Metot

Çalışmada elektrolif çekim yöntemi ile poliakrilonitril (PAN) lifleri üretilmiştir. Bunun için PAN polimeri, dimetilformamid (DMF) solventinde % 9, % 12 ve % 15 konsantrasyonda olacak şekilde çözülmüştür. Kullanılan PAN polimerinin molekül ağırlığı 150.000 g/mol'dür. Elde edilen çözeltilerin viskozite ve iletkenlik değerleri ölçülmüştür. Bu değerler Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1. Çözeltilerin viskozite ve iletkenlik değerleri (Table 1. Viscosity and conductivity values of solutions)

Konsantrasyon (%)	Viskozite (cp)	İletkenlik ($\mu\text{S/cm}$)
9	648	117
12	891	116
15	1240	113

Çalışmada, tek iğneli elektro lif çekim düzeneği kullanılmıştır. Düzenek yüksek voltaj güç kaynağı, metal toplayıcı (topraklanmış) ve polimer besleme pompası olmak üzere üç ana parçadan oluşmaktadır. İğne ucundaki çözelti damlası ile metal toplayıcı arasında elektrostatik alan oluşturulmuş, uygulanan voltaj çözelti damlasının iğneden püskürtülmesini sağlamıştır. Elektriksel kuvvetler sebebiyle çözelti damlası uzayarak ince bir lif haline gelmiş ve toplayıcı üzerinde rasgele dağılmış lif ağı şeklinde elde edilmiştir. Her bir işlem parametresi için 5 dakika nanolif üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneyler, normal atmosfer basıncı altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Deney parametreleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2. Deney parametreleri (Table 2. Experiment parameters)

Deney Parametreleri	Değer
Elektrotlar arası mesafe	18 cm, 23 cm, 28 cm
Akış hızı	0,5 ml/saat, 1 ml/saat, 1,5 ml/saat
Metal toplayıcı malzemesi	Bakır
Metal toplayıcı kalınlığı	10 mm
Metal toplayıcı şekli	Daire (10 cm çaplı)
İğne çapı	20G, 21G, 22G
Voltaj miktarı	14 kV, 20 kV, 26kV
Konsantrasyon	% 9, % 12, % 15

Bu çalışmada Taguchi ortogonal dizayna göre elektro lif çekim yöntemiyle üretilen nanoliflerin incelik değerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Taguchi deney tasarımına göre deneyler, L27 ortogonal dizaynına göre 27 tane deneme ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen nano liflerin çaplarını belirlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Her bir farklı numune için 10 çap ölçümü yapılarak ortalama lif çapı hesaplanmıştır. Sonuçların değerlendirilmesinde Minitab programı yardımıyla varyans analizi yapılmış ve sinyal/gürültü oranı kullanılmıştır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Taguchi yöntemine göre, L27 ortogonal dizaynı kullanılarak belirlenen deney yapısı Tablo 3'de verilmektedir. Deneyler için ölçülen ortalama çap değeri ve denklem 1 (küçük değer iyi)' e göre hesaplanan S/N değerleri Tablo 4' de verilmektedir.

Tablo 3. L27 ortogonal dizaynı kullanılarak belirlenen deney yapısı (Table 3. Experimental structure determined using the L27 orthogonal design)

Deneme No	Faktörler ve Seviyeleri				
	İğne Çapı (G)	Akış Hızı (ml/saat)	Mesafe (cm)	Gerilim (kV)	Konsantrasyon (%)
1	20	0,5	18	14	9
2	20	0,5	18	14	12
3	20	0,5	18	14	15
4	20	1	23	20	9
5	20	1	23	20	12
6	20	1	23	20	15
7	20	1,5	28	26	9
8	20	1,5	28	26	12
9	20	1,5	28	26	15
10	21	0,5	23	26	9
11	21	0,5	23	26	12
12	21	0,5	23	26	15

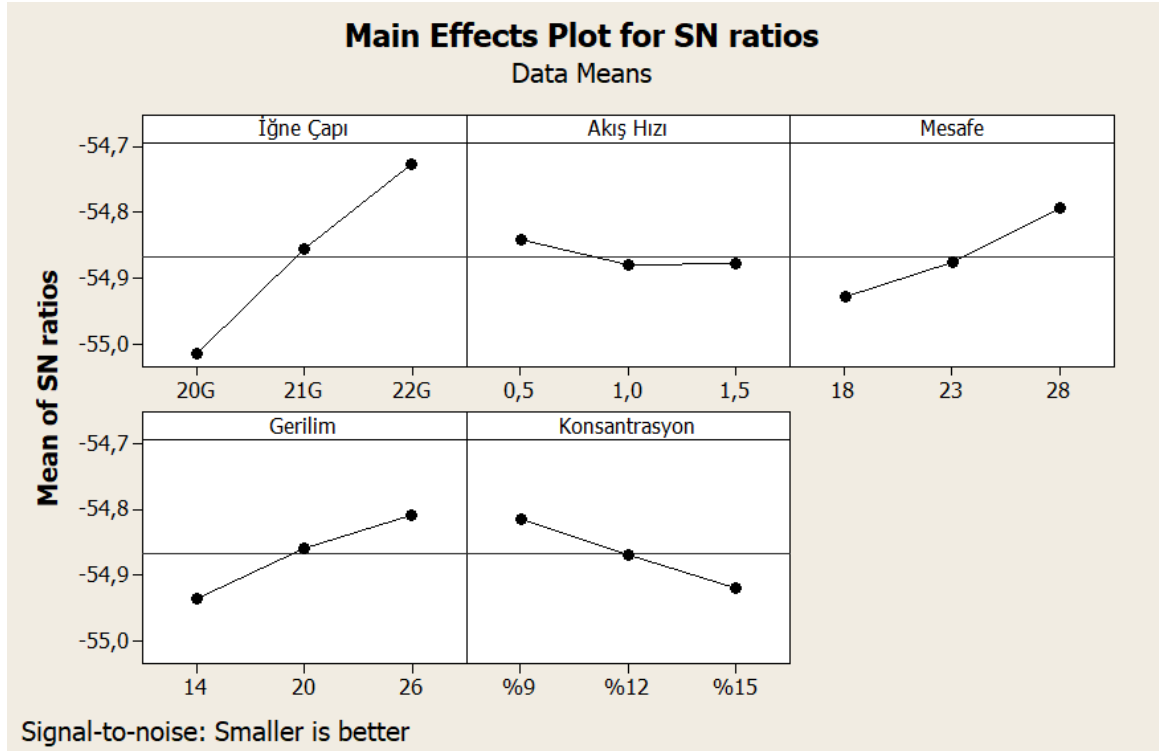
13	21	1	28	14	9
14	21	1	28	14	12
15	21	1	28	14	15
16	21	1,5	18	20	9
17	21	1,5	18	20	12
18	21	1,5	18	20	15
19	22	0,5	28	20	9
20	22	0,5	28	20	12
21	22	0,5	28	20	15
22	22	1	18	26	9
23	22	1	18	26	12
24	22	1	18	26	15
25	22	1,5	23	14	9
26	22	1,5	23	14	12
27	22	1,5	23	14	15

Tablo 4. Taguchi ortogonal tasarımına göre yapılan deneylerin sonuçları ve S/N değerleri (Table 4. Results and S/N values of experiments performed according to Taguchi orthogonal design)

Deneme No	Ortalama Nanolif Çapı (nm)	S/N Oranı (dB)
1	569	-55,1022
2	570	-55,1175
3	572	-55,1479
4	563	-55,0102
5	564	-55,0256
6	566	-55,0563
7	552	-54,8388
8	555	-54,8859
9	560	-54,9638
10	545	-54,7279
11	547	-54,7597
12	553	-54,8545
13	550	-54,8073
14	554	-54,8702
15	557	-54,9171
16	553	-54,8545
17	558	-54,9327
18	561	-54,9793
19	536	-54,5833
20	539	-54,6318
21	540	-54,6479
22	541	-54,6639
23	548	-54,7756
24	549	-54,7914
25	545	-54,7279
26	551	-54,8230
27	556	-54,9015

Sonraki adımda her faktörün her seviyedeki etkisinin incelenmesi gerekmektedir. Bu sebeple S/N oranlarının ortalaması her faktörün her bir seviyesi için tek tek hesaplanır. Faktörlerin en küçük değerlerinin sahip olduğu seviye o faktörün en iyi seviyesini, yani nanolif çapının en küçük olduğu deney sonucunu göstermektedir. Hesaplanan bu değerler tüm faktörler için Şekil 1’de grafik olarak verilmektedir. Şekil 1’de görüldüğü üzere, iğne çapının nanolif inceliği üzerinde daha büyük etkiye sahip olduğu ortaya çıkmıştır. En az etkiye sahip olan faktör ise çözelti akış hızıdır. S/N oranlarının en yüksek olduğu noktalar optimum tasarımı vermektedir. Bu tasarım 22 G iğne çapı, 0,5 ml/saat akış hızı, 28 cm mesafe, 26 kV gerilim, % 9 konsantrasyon olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Ramarkrishra ve arkadaşları çözeltinin çekim bölgesine iletilmesini sağlayan iğne, pipet gibi kılcal boruların iç çapının önemli bir etkiye sahip olduğunu, iğne çapının küçük olması ile daha ince liflerin oluşmasının sağlanabileceğini belirtmişlerdir (Ramarkrishra ve ark., 2005). Akış hızı jetin hızını ve malzeme transfer hızını etkilemektedir. Akış hızındaki azalış, aktarılan çözelti hacmine etki eden elektrostatik kuvveti artırmakta ve böylece lif çapını azaltmaktadır (Kozanoğlu, 2006; Huang ve ark., 2003; Li ve Xia, 2004). Mesafe arttığında jetlerin toplayıcıya doğru gittikleri süre artacağından daha ince nanoliflerin elde edildiği belirtilmektedir (Sabit, 2019). Artan voltaj polimer jeti içinde Coulomb kuvvetlerinin daha fazla olmasını ve daha güçlü elektrik alan oluşmasını

sağlamaktadır. Buna bağlı olarak polimer çözeltisi daha fazla uzamakta ve daha ince lifler elde edilebilmektedir (Ramarkrishra ve ark., 2005). Düşük konsantrasyonun daha düşük çaplı nano lif üretimi sağladığı belirtilmektedir (Dehghan ve ark., 2015).



Şekil 1. Faktör etkilerinin grafiksel gösterimi (Figure 1. Graphical representation of factor effects)

Sonuçların istatistiksel olarak güvenilirliğini analiz etmek ve faktörlerin nanolif çapını hangi ölçüde etkilediğini belirlemek için S/N oranlarından yararlanılarak 0,05 anlamlılık seviyesinde varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Tablo 5'te varyans analizi sonuçları verilmektedir. p değerinin 0,05'in altında olması değerlendirilen faktörün sonuç değer üzerinde anlamlı bir etkisinin olduğunu göstermektedir. Görüldüğü üzere iğne çapının, çözelti akış hızının, elektrotlar arası mesafenin, uygulanan gerilimin ve çözelti konsantrasyonunun nanolif inceliği üzerinde anlamlı bir etkisi vardır. Ayrıca modelin R^2 değeri 0,98'dir. Modelin açıklayıcılık gücü oldukça yüksektir.

Tablo 5. Taguchi ortogonal dizayn için ANOVA tablosu (Table 5. ANOVA table for Taguchi orthogonal design)

Faktör	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F	p
İğne çapı (G)	2	0,377595	0,188798	292,67	0,000
Akış hızı (ml/saat)	2	0,008553	0,004276	6,63	0,008
Mesafe (cm)	2	0,083857	0,041928	65,00	0,000
Gerilim (kV)	2	0,074876	0,037438	58,04	0,000
Konsantrasyon (%)	2	0,049556	0,024778	38,41	0,000
Artık	16	0,010321	0,000645		
Toplam	26	0,604758			

Modelin R^2 Değeri: 0,98

4. Sonuç

Çalışmada, elektrolif çekim yöntemi ile elde edilen nanoliflerin çap değerinin Taguchi yöntemine göre optimizasyonu amaçlanmıştır. L27 ortogonal tasarımı kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneylerden sonra ortalama ve S/N oranları hesaplanmıştır. Faktörlerin ve seviyelerinin etkilerini görebilmek amacıyla faktör etkileri grafiksel gösterimle verilmiştir. En küçük nanolif çap değerini veren optimum kombinasyon bulunmuştur. İstatistiksel olarak nanolif çapı üzerinde etkili olan faktörleri belirleyebilmek için varyans analizi yapılmıştır.

Nanolif inceliğine en çok etki eden faktör iğne çapı olarak tespit edilmiştir. Bunu sırasıyla elektrotlar arası mesafe, uygulanan gerilim, çözelti konsantrasyonu ve çözelti akış hızı takip etmektedir. En iyi performans değerini veren kombinasyon 22 G iğne çapı, 0,5 ml/saat akış hızı, 28 cm mesafe, 26 kV gerilim ve % 9 konsantrasyon olarak belirlenmiştir. Elektrolif çekim yönteminde iğne çapının küçülmesi, çözelti besleme hızının düşürülmesi, iğne ve toplayıcı arasındaki mesafenin artırılması, uygulanan gerilimin artırılması ve çözelti konsantrasyonunun düşürülmesi lif çapını azaltmaktadır. İğne çapının küçülmesi ile iğne ucunda oluşan damlacık küçülmekte ve yüzey gerilimi artmaktadır. Böylece aynı miktarda voltaj ile jetin başlayabilmesi için daha çok itme kuvveti gerekirken ve jetin ivmesi azalmaktadır. Bu durumda jetin toplayıcıya ulaşmadan önce havada ilerlediği ve gerildiği süre uzamakta ve daha ince lifler elde edilmektedir. Çözelti besleme hızının düşürülmesi ile birim zamanda iğne ucunda meydana gelen ve elektrostatik alana jet şeklinde giden damla sayısı azalmaktadır. Bu durumda çözelti elektrik alan tarafından yeterince çekilmekte ve daha ince lifler elde edilmektedir. İğne ve toplayıcı arasındaki mesafenin artırılması ile lifler toplayıcıya daha uzun bir yoldan gitmekte ve böylece liflere uygulanan kuvvetlerin etki süreleri artmaktadır. Sonuç olarak polimer jeti daha fazla uzamakta ve liflerin çapı azalarak daha ince lifler elde edilmektedir. Uygulanan gerilimin artırılması ile polimer çözeltisinin üzerindeki yük miktarı artmakla birlikte bu yüklerin oluşturduğu itici kuvvette artmaktadır. Böylece polimer jeti daha fazla uzamakta ve daha ince lifler elde edilmektedir. Çözelti konsantrasyonunun düşürülmesi ile azalan viskoelastik kuvvetler jetin kararsızlığını arttırarak gideceği yolu uzatmaktadır. Bu durumda jet elektrostatik alanda daha fazla kalmakta ve daha ince lifler elde edilmektedir. Bütün bunların ışığında Taguchi analizinin elektrolif çekim parametrelerini optimize etmek için uygun bir yöntem olduğu sonucuna varılabilir.

Daha sonraki çalışmalarda optimize edilen şartlarda farklı polimerlerle nanolif yüzeyler elde edilip, elde edilen yüzeylerin kullanım alanlarına göre çeşitli performans özellikleri değerlendirilebilir.

Kaynakça

- 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, 292-300, DOI: 10.1016/j.jascer.2015.05.001.
- Can, N., Ersoy, M., (2014). Nanolif Yapılı Polimerik Doku İskeleleri. *Tekstil ve Mühendis*, 21, 38-50.
- Canıyılmaz, E., Kutay, F., (2003). Taguchi Metodunda Varyans Analizine Alternatif Bir Yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18, 3, 51-63.
- Celep, G. K., Dincer, K., (2017). Optimization of Parameters for Electrospinning of Polyacrylonitrile Nanofibers by the Taguchi Method. *International Polymer Processing Journal of the Polymer Processing Society*, 508-514, DOI: 10.3139/217.3411.
- Çakmen, A., B., (2019). Allantoin İçeren Antibakteriyel Özellikte Poliüretan/Polikaprolakton Temelli Yara Örtü Malzemelerinin Elektrospinning Yöntemi ile Hazırlanması ve Uygulanması. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Malatya.
- Dehghan, S. F., Golbabei, F., Maddah, B., Yarahmadi, R., Zadeh, A. S., (2015). Experimental Investigations on Electrospun Mat Production: For Use in High-Performance Air Filters. *International Journal of Occupational Hygiene*, 7, 3, 110-118.
- 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, Ankara.
- Erdem, V., Belevi, M., Koçhan, C., (2010). Taguchi Metodu ile Plastik Enjeksiyon Parçalarda Çarpılmanın En Aza İndirilmesi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 12, 2, 17 – 29.
- Gökce, B., Taşgetiren, S., (2009). Kalite İçin Deney Tasarımı, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1) 71-83.
- Huang, M.Z., Zhang, Y.Z., Kotaki, M. and Ramakrishna, S., (2003). A Review On Polymer Nanofibers By Electrospinning And Their Applications In Nanocomposites. *Composites Science And Technology*, 63, 2223-2253.
- Kalyon, A., (2019). Elektro Erozyon ile İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü ve İş Parçası İşleme Hızının Alüminyum Alaşımı İçin Taguchi Tekniği ile Optimizasyonu. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 21, 62, 595-605.
- 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.
- 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.
- Kozanoğlu, G., (2006). *Elektrospinning Yöntemiyle Nanolif Üretim Teknolojisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.
- Li, D., Xia, Y., (2004). Electrospinning of Nanofibers: Reinventing the Wheel?. *Advanced Materials*, 16, 14, 1151-1170, <https://doi.org/10.1002/adma.200400719>.
- Meyva-Zeybek, Y., Kaynak, C., (2020). Electrospinning of PLA and PLA/POSS Nanofibers: Use of Taguchi Optimization for Process Parameters. *J Appl Polym Sci.*, 138:e49685, DOI: 10.1002/app.49685.
- Mohammadi, M., Mohammadi, N., Mehdi-pour-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, 34110 – 34124.
- Nas, E., Akıncıoğlu, S., (2019). Kriyojenik İşlem Görmüş Nikel Esaslı Süper Alaşımın Elektro-Erozyon İşleme Performansı Optimizasyonu. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7, 1, 115-126.
- 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.
- Sabit, B., (2019). *Elektro Lif Çekim (Electrospinning) Yöntemiyle Üretilen Nanolif İplik Özelliklerinin İyileştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.

- 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: Physics*, 54, 1391–1403, DOI: 10.1080/00222348.2015.1085783.
- 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.
- Sorkhabi, T.S., Samberan, M.F., Ostrowski, K.A., Zajdel, P., Stempkowska, A., Gawenda, T., (2022). Electrospinning of Poly (Acrylamide), Poly (Acrylic Acid) and Poly (Vinyl Alcohol) Nanofibers: Characterization and Optimization Study on the Effect of Different Parameters on Mean Diameter Using Taguchi Design of Experiment Method. *Materials*, 15, 5876, <https://doi.org/10.3390/ma15175876>.
- Taguchi, G., Elsayed, E.A., Hsiang, T., (1989). *Quality Engineering in Production Systems*. McGraw-Hill, New York.
- Üstün, A., (2011). *Hava Filtrasyonu için Nanolif Üretimi*. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.
- 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.
- Üstündağ, G.C., (2009). *Elektrospinning Yöntemi ile Biyomedikal Kullanıma Yönelik Nanolif Yüzey Üretimi ve Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- 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.
- Yalçın, M., (2020). *Elektroçirme Yöntemi ve Nanolif Üretimi*. Türkiye’de Mühendislik ve Fen Bilimlerinde Akademik Araştırmalar, İksad yayınevi, Ankara.