

Farklı Tipteki Toplayıcı Plakaların Elektrostatik Çekim ile Elde Edilen Nanoliflerin Morfolojisi Üzerine Etkilerinin Araştırılması

Mülazım İPEK, M. Fatih CANBOLAT*

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Isparta

**mfc1903@yahoo.com*

(Geliş/Received: 18.11.2016; Kabul/Accepted: 30.01.2017)

Özet

Bu çalışmanın amacı, farklı geometri ve özelliklere sahip materyallerin toplayıcı plaka olarak elektrostatik nanolif çekim ünitesinde denenmesi ve nanoliflerin morfolojisi üzerindeki etkilerinin incelenmesidir. Elektrostatik nanolif lif çekim işlemi polikprolaktan (PCL) polimer çözeltisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nanoliflerin morfolojik analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile tespit edilmeye çalışılmıştır. Değişik geometrideki toplayıcılar ile yapılan denemeler içinde en üniform lif formu tel örgü süzek toplayıcı ile elde edilirken, en ince lif formuna karşılıklı elektrotlara sahip içi boş 10 cm çaplı metal halka toplayıcıda ulaşılmıştır. Ayrıca, farklı malzemelerin toplayıcı olarak özellikleri incelendiğinde, bakır levhaların daha üniform nanolif eldesine imkan verdikleri anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Elektrostatik lif çekimi; Nanolif; Toplayıcı plaka; PCL

Analyzing the Effect of Collector Type on Electrospun Nanofibers Morphology

Abstract

The purpose of this study is to use collectors with different material types and geometries in electrospun nanofiber production to analyze their effects on the morphologies of the produced nanofibrous structures. Poly(ϵ -caprolactone) (PCL) polymer was used in electrospinning process. The morphologies of the PCL nanofibers were analyzed by scanning electron microscope (SEM). In various geometries, the thinnest nanofibers were produced with the reciprocally arranged electrodes type collector which has 10 cm diameter and the most uniform nanofibers were produced with the perforated ladle collector. In terms of material type, the most uniform nanofibers were produced by copper collector.

Keywords: Electrospinning; Nanofiber; Collector; PCL

1. Giriş

Nanolifler, çapı 100 nanometrenin altında olan lifler olarak tanımlanmaktadır. Nanolifler çok küçük boyutlarda yapılar olmalarına rağmen, oldukça geniş bir spesifik yüzey alanı ve gözeneklilik oranı ile birbirine içten bağlantılı gözenek geometrisine sahip olup, çok geniş uygulama alanlarında kullanım imkanı bulmaktadırlar [1, 2]. Nanolifler çok çeşitli yöntemlerle üretilmektedir. Bu yöntemlerden en çok tercih edilenler; eriyikten üfleterek üretim yöntemi sonrası süperkritik CO₂ uygulaması, bikomponent lif üretimi sonrası

fibrilasyon ile ayrıştırma yöntemi ve elektrostatik lif çekim yöntemi ile üretimdir [3, 4].

Elektrostatik lif çekim yöntemi, nanolif teknolojisine artan ilgi ile beraber uygulamadaki kolaylık, ucuz kurulum maliyetleri gibi etmenler neticesinde nanolif üretiminde popüler bir hale gelmiştir [5]. Elektrostatik lif çekim yönteminde, polimerler, kompozitler ve seramikler gibi farklı özellikte malzemeler kullanılarak çok ince lifler elde edilebilmektedir. Elektrostatik lif çekim yöntemi diğer metotlarla kıyaslandığında basit, kurulumu ucuz, kolay, çok değişik polimerlerin çekilmesine elverişli, ticari üretime uygun bir

işlemdir [6, 7]. Elektrostatik lif çekim düzeneği 3 ana bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler; yüksek gerilim güç kaynağı, polimer çözeltisi veya eriyiğinin içinde bulunduğu düze (kapiler tüp, şırınga) ve topraklanmış toplayıcı yüzeydir [8]. Bu sistemde ilk olarak polimer uygun bir çözücüde çözülerek çözelti hazırlanır. Hazırlanan çözelti şırıngalara aktarılır ve besleme sisteminde yer alan dozaj pompasına yerleştirilir. Dozaj pompası istenilen besleme miktarına göre ayarlanır ve yüksek gerilim kaynağı açılır. Toplayıcı plaka ile besleme sistemi arasına uygulanan voltaj kritik değere ulaştığında, şırınganın ucunda bulunan çözelti damlacığı jet halinde ve elektriksel olarak yüklenir ve tam karşısında bulunan topraklanmış toplayıcı plaka üzerinde toplanır. Uygulanan elektriksel gerilim, yüzey gerilimini yenmeden önce “Taylor Koni” olarak adlandırılan yapı oluşur. Elektrik alan artırıldığında uygulanan gerilim yüzey gerilimini yener ve koni şeklini alan damlacık polimer jetlerine ayrılır. Oluşan jetler onbinlerce kez çekilmeye uğrayarak, kıvrılma hareketi ve çözücünün buharlaşmasıyla oldukça büyük oranda inceler ve toplayıcı üzerinden nano boyutta toplanır [5, 9]. İdeal bir elektrostatik lif çekim işleminde; üniform ve kontrol edilebilir lif çapları, lif formunda oluşacak hatasız ve boncuksuz yapılar ve monofilament biçiminde sürekli oluşan nanolifler elde edilebilmelidir [10].

Elektrostatik lif çekiminde lif yapısına ve özelliklerine etki eden birçok parametre mevcuttur. Bu parametreler içinde en önemlilerinden birisi de kullanılan toplayıcının tipidir. Toplayıcı plakanın üretildiği materyal ve geometrik şekli nanolif morfolojisini etkileyen iki önemli parametredir [11]. Desen mimarisini kontrol eden ana parametre toplayıcının yapısıdır [12]. Bununla birlikte farklı toplayıcı tiplerinin ortaya çıkan lif morfolojisine veya farklı elektrostatik eğrilebilirliğe neden olduğu bilinmektedir [13]. Nanoliflerin topraklanmış toplayıcı plakaya temas etmesiyle sahip oldukları elektriksel yükler sıfırlanmaktadır. Dışarıda kalan nanoliflerdeki elektriksel yüklerin boşalması daha yavaş gerçekleşmektedir. Tüm bunlar nanolif morfolojisini, özellikle de birim alandaki yoğunluklarını etkilemektedir. Bu nedenle toplayıcı plakanın üretildiği materyalin

sahip olduğu iletkenlik değerleri oldukça önem arz etmektedir [14]. Diğer bir parametre toplayıcı geometrisidir. Toplayıcı geometrileri nanoliflerin ne şekilde toplanacağını belirlemektedir [15].

Literatürde, düz plaka [16-20], dönen silindir [21-24], dönen disk [25-29], topraklanmış çift halka [30, 31], çift paralel plaka [32], taşıyıcı bant [33-36], vb. birçok farklı tipte toplayıcı sistemlerin kullanıldığı çalışmalar yer almaktadır. Metal toplayıcılar yanında su, metanol, kağıt gibi farklı maddeler de toplayıcı olarak kullanılmıştır. Toplayıcı olarak su haznesi kullanılan çalışmada lifler büzülme eğilimi gösterirken, metanol kullanılan çalışmada şişme eğilimi göstermişlerdir [37]. Kağıt gibi daha az iletkenliğe sahip materyallerin kullanıldığı durumlarda ise, liflerin üzerlerindeki elektriği tam olarak toplayıcıya aktaramamaları gözlenmiştir. Bu durumun bir sonucu olarak, liflerin birbirlerini elektriksel olarak ittikleri ve daha boşluklu yapıların eldesine imkan verdikleri anlaşılmıştır [38]. Öte yandan, kullanılan toplayıcı plakalarda görülen diğer bir farklılık ise toplayıcı plakaların hareketsiz (sabit) olduğu sistemlerle, hareketli olduğu ya da hareket ettirildiği sistemlerdir [28, 39, 40].

Bu tür farklı sistemlerin tercih edilme sebebi, paralel dizilimli, oryante olmuş liflerin eldesi, liflerde kristalinite ve mukavemet artışı sağlanması, hızlı üretim, daha geniş alanda liflerin toplanması, farklı nanolif yapıların eş zamanlı üretimi gibi nedenlerledir [40, 41].

Literatürde, farklı malzemeler esaslı toplayıcı plakalarla yapılan bir kısım çalışmalara da rastlamak mümkündür. Ne var ki, alüminyum, bakır, nikel-krom, paslanmaz çelik, v.b. gibi malzemeler esaslı toplayıcı plakalarla yapılan bu çalışmalarda, malzeme tipinin elde edilen nanolif morfolojisine etkisi üzerine bir yoruma rastlanmamıştır [42-46]. Farklı dizilime, gözenekliliğe ve üç boyutlu görünüme sahip nanoliflerin eldesi amacıyla mikro desenli toplayıcılardan da yararlanılmakta olup, doku mühendisliği, mikro devrelerin tasarımı ve enerji uygulamaları alanlarında çözüm odaklı çalışmalar yürütülmektedir [40, 47]. Bu çalışma sonucu, farklı geometri ve malzeme türlerinde toplayıcı plakaların elektrostatik nanolif çekimine etkisi, literatürde yapılan çalışmalara

hem katkı mahiyetinde hem de ilave bulgular eşliğinde, incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1. Materyal

Bu çalışmada biyo uyumluluğu ve biyolojik olarak parçalanma özelliği yüksek polikaprolaktan (PCL) polimeri kullanılmıştır. Kullanılan PCL'nin molekül ağırlığı 70.000-90.000 g/mol'dür. Çözücü olarak dimetilformamid (DMF) ve kloroform kullanılmış ve hem çözücüler hem de polimer Sigma Aldrich firmasından temin edilmiştir. Toplayıcı olarak değişik özellikte (materyal türü, geometri) toplayıcılar kullanılmıştır.

2.2. Elektrostatik lif çekim yöntemi ile nanolif eldesi

Elektrostatik lif çekim işleminin gerçekleştirilmesi için, %14'lük (w/v) PCL polimer çözeltisi hazırlanmıştır. PCL polimeri bazlı nanoliflerin üretimi için, öncelikle PCL, %30'luk Kloroform ve %70'lik Dimetilformamid çözücülerinden oluşan karışım içine, %14'lük oranda eklenerek oda sıcaklığında ve 24 saat boyunca manyetik karıştırıcı yardımıyla çözünmüştür. Çözeltiler 20 gr olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan çözelti 10 ml'lik şırınga içerisinde şırınga pompasına yerleştirilmek sureti ile elektrostatik lif çekim işlemine tabi tutulmuştur. 1ml/s besleme hızı, 9-12 kV arasında değişen gerilim ve 15-20 cm aralığında değişen mesafelerde elektrik alan uygulanarak üretilen nanolifler farklı geometri ve özellikteki toplayıcı yüzeyler üzerinde toplanmıştır. Üretim süreleri tüm toplayıcı aparatlar için 5 dk olarak sabit tutulmuştur.

Hazırlanan polimer çözeltilerinden elektrostatik lif çekim yöntemi ile nanolif üretmek için Süleyman Demirel Üniversitesi Tekstil Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan elektrostatik lif çekim düzeneği (Şekil 2.1) kullanılmıştır. Şırınga içerisindeki polimer çözeltisi güç kaynağından gelen pozitif yüklü metal elektrodlarla temas ettirilmiş ve güç kaynağından gelen nötr (topraklanmış) elektrot ise toplayıcı plakayla temas ettirilmişdir.

Yapılan deneyler için güç kaynağı olarak Gamma High Voltage Research ES30P-20W/DAM model güç kaynağı kullanılmıştır. Besleme sistemi dozaj pompası ve şırıngadan oluşmaktadır. Dozaj pompası olarak syringe pump firmasına ait kontrollü şırınga pompası kullanılmıştır.



Şekil 2.1. Elektrostatik nanolif çekim düzeneği

Çözeltiler farklı toplayıcı yüzeyler ve farklı besleme hızlarında elektrostatik çekim işlemi ile nanolif üretiminde kullanılmıştır. Toplayıcı plakalar, liflerin yüzeyden kolay toplanması için alüminyum folyo ile kaplanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, elektrostatik lif çekim yöntemiyle elde edilen nanoliflerin görüntü ve boyut analizleri, Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezinde bulunan SEM- ZEİS LS-10 cihazında yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

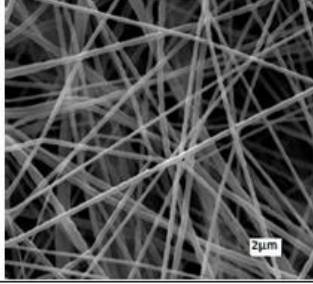
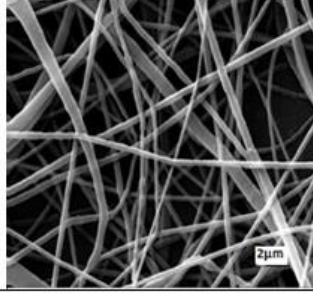
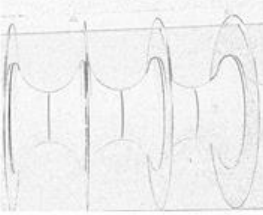
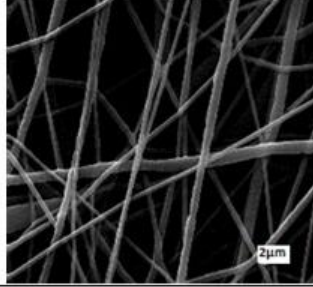
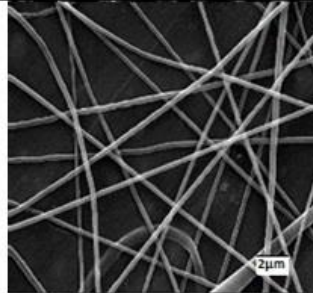
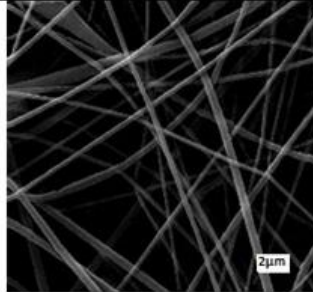
Farklı iletkenliğe sahip toplayıcılar; pirinç, bakır, alüminyum ve farklı şekillere sahip toplayıcılar; dairesel, boşluklu-boşluksuz, değişik boyutlu, yüzeyi pürüzlü-pürüzsüz gibi tedarik edilmiş ve denemeler yapılmıştır. Denemeler ile hem nano boyutta hem de makro boyutta değişik form ve dizilimlerde nanolif yığınları elde edilmiştir. Çalışma yapılan farklı özellik ve geometriye sahip toplayıcı plakalar, şekil 3.1 ve şekil 3.2'de gösterilmiştir. Hazırlanan polimer çözeltisinden elde edilen nanolifler, şekillerde gösterilen toplayıcı plakalar

Farklı Tipteki Toplayıcı Plakaların Elektrostatik Çekim ile Elde Edilen Nanoliflerin Morfolojisi Üzerine Etkilerinin Araştırılması

üzerinde toplanmıştır. Elde edilen nanoliflerin SEM görüntüleri alınarak farklı yapı ve özelliklere sahip toplayıcı plakaların lif morfolojisi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Image J programı kullanılarak liflerin ortalama çapı ve standart sapma değerleri bulunmuştur. Her bir toplayıcının SEM görüntülerinin farklı noktalarından 50'şer adet çap ölçümü yapılmış ve ortalama değerler ile standart sapmalar hesaplanmıştır. Elde edilen değerler analiz edilmiştir. Farklı geometrideki toplayıcılarla yapılan çalışma, geometrinin lif çapı ve dizilimi üzerinde etkisi olduğunu göstermiştir. Bu sonuçtan yola çıkılarak, ilerleyen zamanda yapılacak ayrı bir optimizasyon çalışmasının, geometri ile lif morfolojisi arasında rasyonel bir bağlantı kurulabilmesini mümkün kılacağı düşünülmektedir. Tüm denemeler içinde en üniform lif formu tel örgü süzek toplayıcı ile elde edilirken, en ince lif formuna karşılıklı elektrotlara sahip içi boş 10 cm çaplı içi boş metal halka toplayıcıda ulaşılmıştır. En üniform lif ve en ince lif eldesinin, bahsi geçen geometriye sahip toplayıcılarla gerçekleşmesi şu şekilde izah edilebilir. Birbirine belirli mesafede karşılıklı duran boşluklu uçlar arasında, polimer daha fazla çekime uğrayacağından daha üniform

ve incelmış lif yapılar eldesine imkan verecektir. Belirtilen mesafenin çok az ya da çok fazla olması durumu elde edilen lifin hem üniformluğunu hem de inceliğini değiştirecek bir parametredir [48]. Hemen tüm denemelerde elde edilen ince ve kalın nanolifler değişik uygulamalar için, özellikle izolasyon ve filtrasyon, kullanılabilecek nitelikte bir özellik sergilemiştir. Boşluklu metal disk toplayıcı (hareketsiz) ile elde edilen lif konfigürasyonu da üzerinde durulmaya değer bir dizilim ortaya koymuştur. Elde edilen yapı hem boşluklu oluşu hem de düzgün sıralı bir yapı görüntüsü vermesi itibarı ile üzerinde çalışılarak daha da iyileştirilebilir ve medikal kullanım amacıyla tercih edilebilir bir yapı izlenimi vermiştir. Medikal alanda son yıllarda üzerinde ciddi ilerlemeler kaydedilen doku mühendisliği konusu nanoliflerin de kullanımı bulunduğu bir alandır. Nanoliflerin hücre gelişimi ve farklılaşmasını hızlandırıp, kolaylaştırdığı uygulamalarda lif boyutunun küçük olması yanında lifler arası boşluğun büyük olması tercih edildiğinden elde edilen yapı bu ihtiyaca cevap verebilecek türdendir [49].

Toplayıcı tipi ve Nanolif Çapı	Toplayıcı Plaka	SEM Görüntüsü
Yağlı kağıt (Al levha üzerinde Uygulanmıştır) Lif Çapı: 93 ± 39 nm 12 kV, 18 cm		
Mikro delikli metal tel ızgara Lif Çapı: 93 ± 46 nm 12 kV, 18 cm		

Toplayıcı tipi ve Nanolif Çapı	Toplayıcı Plaka	SEM Görüntüsü
Tel örgü süzek Lif Çapı: 114 ± 31 nm 12 kV, 18 cm		
10 cm çapında içi boş metal halka Lif Çapı: 117 ± 43 nm 12 kV, 18 cm		
Boşluklu metal disk toplayıcı (hareketsiz) Lif Çapı: 84 ± 33 nm 12 kV, 18 cm		
Kıvrımlı 10 cm çaplı içi boş Metal Halka Lif Çapı: 113 ± 35 nm 9 kV, 18 cm		
Toplayıcı tipi ve Nanolif Çapı	Toplayıcı Plaka	SEM Görüntüsü
Karşılıklı Elektrotlara Sahip 10 cm çaplı içi boş Metal Halka Lif Çapı: 74 ± 37 nm 12 kV, 18 cm		

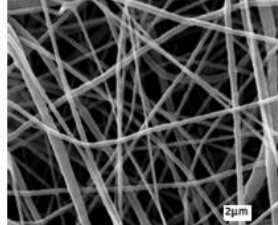
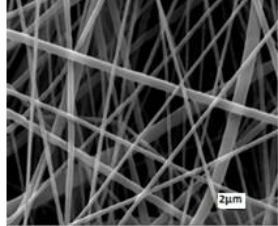
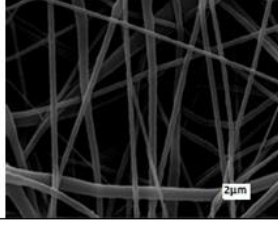
Farklı Tipteki Toplayıcı Plakaların Elektrostatik Çekim ile Elde Edilen Nanoliflerin Morfolojisi Üzerine Etkilerinin Araştırılması

Yüzeyi girintili çıkıntılı, Boşluklu Metal Kafes Örgü Lif Çapı: 119 ± 33 nm 9 kV, 18 cm		
10 cm x 13 cm Boyutunda İçi boş Metal Dörtgen Lif Çapı: 133 ± 33 nm 12 kV, 20 cm		
Elips şeklinde 12 cm x 6 cm boyutunda deliğe sahip metal levha Lif Çapı: 124 ± 28 nm 10 kV, 15 cm		
Toplayıcı tipi ve Nanolif Çapı	Toplayıcı Plaka	SEM Görüntüsü
Mikro delikli sentetik ip ızgara (Al levha üzerinde Uygulanmıştır) Lif Çapı: 133 ± 31 nm 12 kV, 15 cm		
Makro delikli plastik ızgara (Al levha üzerinde Uygulanmıştır) Lif Çapı: 104 ± 34 nm 10 kV, 18 cm		

Şekil 3.1. Farklı geometriye sahip toplayıcı plakalar ve SEM görüntüleri

Makro delikli plastik ızgara yapı, SEM görüntüsü olarak çok anlamlı bir görüntü vermemiş olmakla beraber makro boyutta, boşluklu yapıların şeklini alan nanolif yığınları desenli bir görünüm eldesini mümkün kıldığından denenecek numuneler arasında yer almasına karar verilmiştir. Alüminyum levha üzerinde kullanılan yağlı kağıt toplayıcı, elektrostatik lif çekimi sonrası nanolif yığınlarının alüminyum folyoya göre daha rahat şekilde ayrılabilmesini sağlamaktadır. Elde edilen SEM görüntüleri ile bu kullanımın nanolif morfolojisini olumsuz etkilemediğinin anlaşılması mümkün olmuştur. Deneme numuneleri içinde en beklenmedik ve kötü denilebilecek nanolif eldesi yüzeyi girintili çıkıntılı, boşluklu metal kafes örgü toplayıcı ile gerçekleştirilmiştir. Bu durum yüzey üzerindeki girinti çıkıntıların elektrik alanı olumsuz etkilemesi nedeniyle oluşmuş bir durum olduğu şeklinde düşünülmüştür.

Kullanılan mikro ve makro desene sahip toplayıcı plakalarla hem belli yönlerde yönlenmiş nanolifler, hem de değişik boşluk oranlarına sahip nanoliflerin eldesi mümkün olmuştur. Genelde metal çıkıntılı ve ortası boşluklu toplayıcılar kullanıldığında liflerin çıkıntı kısımlarda, sivri uçlarda toplanma eğilimi gösterdiği, eğer çıkıntı kısımlar arası yeterli mesafe mevcutsa karşılıklı kenarlar arası boşluklar üzerinde köprü yapılar, havada asılı nanolif yapıların olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda havada asılı nanoliflerin dörtgen şeklinde yapılarda karşılıklı kenarlar arasında oryante olduğu ve dairesel boşluklu yapılarda ise tüm yönlerde düzgün bir şekilde dizilim gösterme eğiliminde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, yapılan birçok çalışmada da belirtildiği gibi [39, 40, 50-53], karşılıklı kenar veya noktalar arasındaki elektrik alanı bağlı çekim kuvvetlerinin iletken polimer lif üzerinde yaptığı etki sonucu lifte oluşan ilave gerilme ve çekmeler sonucu ortaya çıkmıştır.

Toplayıcı tipi ve Nanolif Çapı	Toplayıcı Plaka	SEM Görüntüsü
Alüminyum plaka Lif Çapı: 119±35 nm 12 kV, 18 cm		
Bakır plaka Lif Çapı: 105±29 nm 12 kV, 18 cm		
Pirinç plaka Lif Çapı: 79±26 nm 12 kV, 18 cm		

Şekil 3.2. Farklı malzemelerden üretilmiş toplayıcı plakalar ve SEM görüntüleri

Farklı malzemelerden mamul toplayıcı plakalar ile yapılan denemeler ile malzemelerdeki elektrik iletkenlik farklılığının lif dizilimi ve çapı üzerindeki etkisi anlaşılmaya çalışılmış ve levha kalınlıkları alüminyum, bakır ve pirinç levhalar için sırasıyla 0.50 mm, 0.50 mm ve 0.75 mm olacak şekilde alınmıştır. Numuneler içinde en üniform nanolifler bakır toplayıcı plaka ile elde edilmiştir. Bu durum elektrik iletkenlik değeri iyi olan metal toplayıcılar ile daha düzgün nanolif yapıların elde edilebileceği sonucunu vermiştir. Elde edilen nanolifler, lif çapları açısından incelendiğinde, farklı iletkenlikte levhalardan birbirine yakın sonuçlar elde edildiği fakat en iyi sonucun yine, elde edilen değerler normalize edildiğinde, bakır levhadan alındığı gözlenmiştir. Normalizasyon sonucu, alüminyum levhadan daha ince lifler elde edileceği beklenirken, pirinç ve alüminyum levhalardan benzer incelikte nanolifler elde edilmiştir. Bu durum kullanılan alüminyum ve pirinç levhaların saflık oranlarının farklı olması ve pirinç alaşımındaki bakırın toplayıcı yüzeyde daha belirgin etki etmesi şeklinde yorumlanmıştır. Pirinç toplayıcı plaka ile elde edilen nanoliflerin, aynı zamanda, daha boşluklu bir yapı sergiledikleri de tespit edilmiştir. Toplayıcı plaka olarak kullanılacak malzeme türünün lif çapı, lif dizilimleri, lifler arası boşluk gibi lif morfolojisi üzerinde etkili olduğu araştırma ekibince değerlendirilmiştir.

4. Sonuçlar

Elektrostatik çekim nanolif düzeneğinde birçok farklı toplayıcıyı türleri ve çeşitleri kullanılabilir. Bu toplayıcılardan elde edilen nanoliflerin özellikleri birbirinden farklılık arz etmekte ve değişik kullanım alanlarına yönelik değişik toplayıcı kullanımları gerekebilmektedir. Bu çalışma ile, farklı geometride ve farklı malzeme türlerinde toplayıcıların, farklı nanolif morfolojilerini oluşturduğu gözlemlenmiştir. Daha düzgün ve ince nanoliflerin eldesi için iletkenliği yüksek, sivri uçlu ve ortası boşluklu toplayıcı yapıların kullanılabileceği rapor edilmiştir.

Teşekkür

Çalışmanın gerçekleşmesinde finansman desteği sağlayan TÜBİTAK'a (213M263 no'lu proje) ve 4232 –YL2-14 No'lu SDÜ Bilimsel Araştırma Projesi ile destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

1. Bonino, C., Krebsb, M., Jeong, S., Shearera, K., Alsberg, E., Khan, S., (2011), Electrospinning alginate based nanofibers: From blends to alginate only systems, Carbohydrate Polymers, **85**, 1, 111-119.
2. Gemci, R., Yener F., Solak, H., (2011), Uygulanan Voltaj Değeri ile Pvb Nanolif Çapı Arasındaki İlişki, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Dergisi, **14**, 1, 31-34.
3. Nayak, R., Padhye, R., Kyratzis, I. L., Truong, Y., Arnold, L., (2011), Recent advances in nanofibre fabrication techniques, Textile Research Journal, **82**, 2, 129-147
4. Lowery, J., Panseri, S., Cunha, C., Gelain, F., (2009), Electrospinning for tissue engineering applications, Electrospun Nanofiber Research, Recent Developments.
5. Canbolat, M. F., (2011), Functional Electrospun Nanofibers for Biocatalysis and Tissue Engineering, Doktora Tezi, North Carolina State University, College of Textiles, Raleigh.
6. Üstundag, G. C., Karaca, E., (2009), Poli(Vinil Alkol)/Sodyum Alginat Karışımlarından Elektro Çekim Yöntemi İle Elde Edilen Nanolifli Yüzeylerin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, **14**(1), 159-172
7. İkiz, Y., (2010), Elektro Çekim Yöntemi İşlem Parametrelerinin PVA Nanolif Morfolojisine Etkileri, Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, **15**(3) 363-369
8. Duzyer, S., (2009), Nanoliflerin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bursa.
9. Uslu, İ., (2009), Elektro-Eğirme Yöntemi Bor Katkılı Alüminyum Asetat Nanolif Malzemelerin Eldesi, Tüba Bilim Dergisi, **2**(3), 266-270.
10. Kozanoğlu, G. S., (2006), Electrospinning Yöntemiyle Nano Lif Üretim Teknolojisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
11. Pham, Q. P., Sharma, U., Mikos, A. G., (2006), Electrospinning of polymeric nanofibers for tissue

- engineering applications: a review, *Tissue engineering*, **12**, 1197-1211.
12. Neves, N. M., Campos, R., Pedro, A. J., Cunha, J., Macedo, F., Reis, R. L., (2007), Patterning of polymer nanofiber meshes by electrospinning for biomedical applications, *International Journal of Nanomedicine*, **2**(3), 433-448
13. Wang, X., Um, I. C., Fang, D., Okamoto, A., Hsiao, B. S., Chu, B., (2005), Formation of water-resistant hyaluronic acid nanofibers by blowing-assisted electro-spinning and non-toxic post treatments, *Polymer*, **46**, 4853-4867.
14. Stanger, J., Tucker, N., Wallace, A., Larsen, N., Staiger, M., Reeves, R., (2009), The Effect of Electrode Configuration and Substrate Material on the Mass Deposition Rate of Electrospinning, *Journal of Applied Polymer Science*, **112**(3), 1729-1737
15. Andraday, A. L., (2008), *Science and technology of polymer nanofibers*, John Wiley & Sons, Inc., USA.
16. Dalton, P. D., Klee, D., Möller, M., (2005), Electrospinning with dual collection rings, *Polymer*, **46**(3), 611-614.
17. Kenawy, E. R., Bowlin, G. L., Mansfield, K., Layman, J., Simpson, D. G., Sanders, E. H., Wnek, G. E., (2002), Release of tetracycline hydrochloride from electrospun poly (ethylene-co-vinylacetate), poly (lactic acid), and a blend, *Journal of controlled release*, **81**(1), 57-64.
18. Blakeney, B. A., Tambralli, A., Anderson, J. M., Andukuri, A., Lim, D. J., Dean, D. R., Jun, H. W., (2011), Cell infiltration and growth in a low density, uncompressed three-dimensional electrospun nanofibrous scaffold, *Biomaterials*, **32**(6), 1583-1590.
19. Rutledge, G. C., Fridrikh, S. V., (2007), Formation of fibers by electrospinning, *Advanced drug delivery reviews*, **59**(14), 1384-1391.
20. Kenawy, E. R., Layman, J. M., Watkins, J. R., Bowlin, G. L., Matthews, J. A., Simpson, D. G., Wnek, G. E., (2003), Electrospinning of poly (ethylene-co-vinyl alcohol) fibers, *Biomaterials*, **24**(6), 907-913.
21. Katta, P., Alessandro, M., Ramsier, R. D., Chase, G. G., (2004), Continuous electrospinning of aligned polymer nanofibers onto a wire drum collector, *Nano letters*, **4**(11), 2215-2218.
22. Yang, D., Lu, B., Zhao, Y., Jiang, X., (2007), Fabrication of aligned fibrous arrays by magnetic electrospinning, *Advanced materials*, **19**(21), 3702-3706.
23. Lee, K. H., Kim, H. Y., Khil, M. S., Ra, Y. M., Lee, D. R., (2003), Characterization of nano-structured poly (ϵ -caprolactone) nonwoven mats via electrospinning, *Polymer*, **44**(4), 1287-1294.
24. Sutasinpromprae, J., Jitjaicham, S., Nithitanakul, M., Meechaisue, C., Supaphol, P., (2006), Preparation and characterization of ultrafine electrospun polyacrylonitrile fibers and their subsequent pyrolysis to carbon fibers, *Polymer International*, **55**(8), 825-833.
25. Yee, W. A., Nguyen, A. C., Lee, P. S., Kotaki, M., Liu, Y., Tan, B. T., Mhaisalkar, S. G., Lu, X., (2008), Stress-induced structural changes in electrospun polyvinylidene difluoride nanofibers collected using a modified rotating disk, *Polymer*, **49**(19), 4196-4203.
26. Yee, W. A., Kotaki, M., Liu, Y., Lu, X., (2007), Morphology, polymorphism behavior and molecular orientation of electrospun poly (vinylidene fluoride) fibers, *Polymer*, **48**(2), 512-521.
27. Dror, Y., Salalha, W., Khalfin, R. L., Cohen, Y., Yarin, A. L., Zussman, E., (2003), Carbon nanotubes embedded in oriented polymer nanofibers by electrospinning, *Langmuir*, **19**(17), 7012-7020.
28. Baji, A., Mai, Y. W., Wong, S. C., Abtahi, M., Chen, P., (2010), Electrospinning of polymer nanofibers: effects on oriented morphology, structures and tensile properties, *Composites science and technology*, **70**(5), 703-718.
29. Huang, S., Yee, W. A., Tjiu, W. C., Liu, Y., Kotaki, M., Boey, Y. C. F., Ma, J., Liu, T., Lu, X., (2008), Electrospinning of polyvinylidene difluoride with carbon nanotubes: synergistic effects of extensional force and interfacial interaction on crystalline structures, *Langmuir*, **24**(23), 13621-13626.
30. Afifi, A. M., Nakano, S., Yamane, H., Kimura, Y., (2010), Electrospinning of Continuous Aligning Yarns with a 'Funnel' Target, *Macromolecular Materials and Engineering*, **295**(7), 660-665.
31. Yousefzadeh, M., Latifi, M., Teo, W. E., Amani-Tehran, M., Ramakrishna, S., (2011), Producing continuous twisted yarn from well-aligned nanofibers by water vortex, *Polymer Engineering & Science*, **51**(2), 323-329.
32. Schaefer, K., Thomas, H., Dalton, P., Moeller, M., (2007), Nano-fibres for filter materials. In *Multifunctional Barriers for Flexible Structure*, Springer Berlin Heidelberg.
33. Wang, S., Yang, Y., Zhang, Y., Fei, X., Zhou, C., Zhang, Y., Li, Y., Yang, Q., Song, Y., (2014), Fabrication of large-scale superhydrophobic composite films with enhanced tensile properties by multinozzle conveyor belt electrospinning,

- Journal of Applied Polymer Science, **131**(1), 39735-39744
34. Bjorge, D., Daels, N., De Vrieze, S., Dejjans, P., Van Camp, T., Audenaert, W., Hogie, J., Westbroek, P., De Clerck, K., Van Hulle, S. W. H., (2009), Performance assessment of electrospun nanofibers for filter applications, *Desalination*, **249**(3), 942-948.
 35. Sasipriya, K., Suriyaprabha, R., Prabhu, P., Rajendran, V., (2013), Synthesis and characterisation of polymeric nanofibers poly (vinyl alcohol) and poly (vinyl alcohol)/silica using indigenous electrospinning set up, *Materials Research*, **16**(4), 824-830.
 36. Lu, B., Wang, Y., Liu, Y., Duan, H., Zhou, J., Zhang, Z., Wang, Y., Li, X., Wang, W., Lan, W., Xie, E., (2010), Superhigh-Throughput Needleless Electrospinning Using a Rotary Cone as Spinneret, *Small*, **6**(15), 1612-1616.
 37. Kim, H. S., Kim, K., Jin, H. J., Chin, I. J., (2005), Morphological characterization of electrospun nano-fibrous membranes of biodegradable poly(L-lactide) and poly(lactide-co-glycolide), In *Macromolecular Symposia* **224**(1), 145-154, WILEY-VCH, Verlag.
 38. Liu, H. Q., Hsieh, Y. L., (2002), Ultrafine fibrous cellulose membranes from electrospinning of cellulose acetate, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, **40**(18), 2119-2129.
 39. Cipitria, A., Skelton, A., Dargaville, T. R., Dalton, P. D., Huttmacher, D. W., (2011), Design, fabrication and characterization of PCL electrospun scaffolds—a review, *Journal of Materials Chemistry*, **21**(26), 9419-9453.
 40. Persano, L., Camposeo, A., Tekmen, C., Pisignano, D., (2013), Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: a review, *Macromolecular Materials and Engineering*, **298**(5), 504-520.
 41. Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M., Ramakrishna, S., (2003), A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites, *Composites science and technology*, **63**, 15, 2223-2253.
 42. Yoshimoto, H., Shin, Y. M., Terai, H., Vacanti, J. P., (2003), A biodegradable nanofiber scaffold by electrospinning and its potential for bone tissue engineering, *Biomaterials*, **24**(12), 2077-2082.
 43. Shin, M., Yoshimoto, H., Vacanti, J. P., (2004), In vivo bone tissue engineering using mesenchymal stem cells on a novel electrospun nanofibrous scaffold, *Tissue Engineering*, **10**, 1-2, 33-41.
 44. Li, W.-J., Tuli, R., Okafor, C., Derfoul, A., Danielson, K. G., Hall, D. J., Tuan, R. S., (2005), A three-dimensional nanofibrous scaffold for cartilage tissue engineering using human mesenchymal stem cells, *Biomaterials*, **26**(6), 599-609.
 45. Li, W.-J., Mauck, R. L., Cooper, J. A., Yuan, X., Tuan, R. S., (2007), Engineering controllable anisotropy in electrospun biodegradable nanofibrous scaffolds for musculoskeletal tissue engineering, *Journal of Biomechanics*, **40**(8), 1686-1693.
 46. Nottelet, B., Pektok, E., Mandracchia, D., Tille, J. C., Walpoth, B., Gurny, R., Moeller, M., (2009), Factorial design optimization and in vivo feasibility of poly(3-caprolactone)-micro- and nanofiber-based small diameter vascular grafts, *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, **89**(4), 865-875.
 47. Vaquette, C., Cooper-White, J., J., (2011), Increasing Electrospun Pore Size with Tailored Collectors for Improved Cell Penetration, *Acta Biomaterialia*, **7**(6), 2544-2557
 48. Andradý, A. L., (2008), *Science and technology of polymer nanofibers*, John Wiley & Sons, New Jersey
 49. Heydarkhan-Hagvall, S., Schenke-Layland, K., Dhanasopon, A. P., Rofail, F., Smith, H., Wu, B. M., Shemin, R., Beygui, R. E., & MacLellan, W. R., (2008), Three-dimensional electrospun ECM-based hybrid scaffolds for cardiovascular tissue engineering, *Biomaterials*, **29**(19), 2907-2914.
 50. Li, D., Wang, Y., Xia, Y., (2003), Electrospinning of polymeric and ceramic nanofibers as uniaxially aligned arrays, *Nano letters*, **3**(8), 1167-1171.
 51. Kameoka, J., Czaplewski, D., Liu, H., Craighead, H. G., (2004), Polymeric nanowire architecture, *Journal of Materials Chemistry*, **14**(10), 1503-1505.
 52. Li, D., Ouyang, G., McCann, J. T., Xia, Y., (2005), Collecting electrospun nanofibers with patterned electrodes, *Nano letters*, **5**(5), 913-916.
 53. Zhang, D., Chang, J., (2007), Patterning of electrospun fibers using electroconductive templates. *Advanced Materials*, **19**(21), 3664-3667.