

Nanofiberler ile Filtrasyon

Fatma ALTINTAŞ¹, Meltem DELİMANLAR², Erkan KOLCU³, Buse Melek OLGAÇ⁴, Ahmet KOLUMAN⁵

Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Denizli.

¹e-posta: faltintas18@posta.pau.edu.tr, ORCID ID: 0000-0002-7871-1967

²e-posta: delimanlarmeltem@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4152-7805

³e-posta: ekolcu18@posta.pau.edu.tr, ORCID ID: 0000-0003-4912-7347

⁴e-posta: busemelek3302@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-3792-738X

⁵e-posta: akoluman@pau.edu.tr, ORCID ID: 0000-0001-5308-8884

www.dergipark.org.tr/rjbb

Alınış Tarihi: 01/05/2023

Kabul Tarihi: 16/10/2023

Anahtar Kelimeler: Nanofiber,
Elektroçirime, Biyomedikal
Uygulamalar, Teknoloji

Özet

Son birkaç yılda, filtrasyon, doku mühendisliği için iskele, teşhis, ilaç dağıtımı, koruyucu giysiler ve sensörler gibi birçok çeşitli uygulama alanlarında umut verici kaynak olan nanofiberlere olan talep büyük ölçüde artış göstermektedir. Nanofiberlerin bu eşsiz özellikleri ve yüksek uygulanabilirlikleri, yenilikçi enerji üretimi, biyomedikal, tıbbi tedavi ve çevre alanında bulunan sorunları çözebilmek için inovatif yöntem ve imkanlar sunmaktadır. Bu sorunların çözülebilmesi için araştırmacılar, nanofiberlerin üretilmesi için çeşitli elektroçirime ve elektroçirime haricindeki tekniklerin geliştirilmesine yönelmişlerdir. Elektroçirime ultra ince nanofiberler üretmek için kullanılacak çok yönlü ve uygulanabilir bir tekniktir. Elektroçirime ve elektroçirime harici nanofiber oluşturma tekniklerinde önemli ilerlemeler gözlemlenmiştir. Bu derlemede nanofiber üretim teknikleri ve üretilen nanofiberlerin kullanım alanları kapsamlı olarak belirtilmiştir.

Filtration with Nanofibers

www.dergipark.org.tr/rjbb

Received: 01/05/2023

Accepted: 16/10/2023

Keywords: Nanofibers,
Electrospinning, Biomedical
Application, Technology

Abstract

In the last few years, the demand for nanofibers, which are a promising resource in many diverse application areas such as filtration, scaffolding for tissue engineering, diagnostics, drug delivery, protective clothing and sensors, has been increasing dramatically. These unique properties and high applicability of nanofibers offer innovative methods and opportunities to solve problems in innovative energy production, biomedical, medical treatment and environmental fields. To solve these problems, researchers have turned to the development of various electrospinning and non-electrospinning techniques to produce nanofibers. Electrospinning is a versatile and applicable technique that can be used to produce ultrafine nanofibers. Significant advances have been observed in electrospinning and non-electrospinning nanofiber formation techniques. In this review, nanofiber production techniques and the usage areas of nanofibers produced are comprehensively described.

1. Giriş

Nanofiberler, çok çeşitli araştırma ve ticari çalışmalar için umut verici tek boyutlu (1B) nanomalzemeler olarak ortaya çıkmıştır. Bu nanofiberlerin yüksek gözenekli yapısı ve üstün mekanik özellikleri, geniş yüzey alanları, elektriksel ve kimyasal alanlardaki eşsiz özellikleri sayesinde birçok alanda önemli hale gelmiştir. Doku mühendisliği alanında iskele, teşhis, ilaç iletimi, yara örtüsü; atık ve hava arıtma sistemleri; piller, kapasitörler ve yakıt hücreleri işlemleri; enerji üretim ve depolama; inşaat ve yapı malzemeleri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu alanlarda kullanılacak olan nanofiberler

için çeşitli üretim teknikleri bulunmaktadır. Bu teknikler sayesinde seri üretim kabiliyeti, daha düşük maliyetli ve çevre dostu yapılar oluşturulmaktadır [1-2].

Bu makale nanofiberlerin üretim teknikleri ve kullanım alanlarını ele almış olup bu teknolojinin avantaj ve dezavantajları incelenmiştir.

2. Nanofiber Nedir?

Yaşadığımız yüzyılda oldukça önemli bir rol oynayan nanoteknoloji, 1 nanometre ile 100 nanometre arasında

kapsayan (bir saç telinin kalınlığı 80.000 nanometredir) bir bilim dalıdır [1]. Nanolifler, genellikle bir mikrondan daha düşük çap, yüksek yüzey alanı, gözenekli yapısı, diğer malzemelere göre daha iyi mekanik özelliklere sahip olması gibi üstün özellikleri nedeniyle çok çeşitli araştırmalar ve ticari uygulamalar için kullanılan heyecan verici nanomalzemelerdir [2]. Nanoliflere duyulan ilginin zamanla artmasıyla farklı üretim teknikleri geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Üretim teknikleri nanoliflerin hazırlanma tekniklerine göre yani liflerin oluşumu için elektrostatik kuvvetin kullanıldığı elektroğirme teknikleri ve mekanik kuvvetin kullanıldığı elektroğirme harici teknikler olmak üzere iki grupta incelenebilir [3].

2.1. Nanofiber Üretim Teknikleri

Nanolifler çeşitli fiziksel ve kimyasal modifikasyonlar yoluyla yeni özelliklere sahip ürünler oluşturmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Nanolif sentezi için farklı üretim teknikleri olsada basit ekipmanlı ve düşük maliyetli kurulum, seri üretim kabiliyeti, amaçlanan uygulama için gerekli nanolif çap oranının ayarlanabilmesi, bileşimlerini ve yönelimlerini kontrol etme esnekliği gibi avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılan yöntem elektroğirme yöntemidir [4]. Elektroğirme, yüksek voltaj ve hem doğal hem de sentetik polimerlerin polimer çözeltilerini kullanarak çapları 2nm ila birkaç mikrometre arasında değişen polimer lifler üretmenin mekanik ve elektriksel bir tekniğidir. Normal liflerden daha küçük gözenekler ve daha yüksek yüzey alanı ile istenen özelliklerde nanolifler üretmek mümkündür. Kullanılan elektroğirme tekniği, tasarımına ve kolektör şekline bağlı olarak farklı sınıflara ayrılmaktadır. Nanolif üretmek için kullanılan elektroğirme harici teknikler de vardır [5].

2.1.1. Elektroğirme Teknikleri

Elektroğirme, polimer çözeltilerin uygun bir çözücüde çözünmesi veya ısı ile eritilmesi ile çalışan bir tekniktir. Hazırlanan polimer çözeltisi ucunda küçük bir delik bulunan şırınga veya cam bir pipet içine yerleştirilir. Polimer çözelti mekanik pistonlar yardımıyla belirli bir voltaj uygulanarak itilir. İğnenin ucunda asılı duran polimer damlası yüzey gerilimine bağlı olarak belirli bir voltaj değerine kadar küresel bir biçimde bulunur. Uygulanan voltaj eşik değerine ulaştığı anda polimer damlası koni biçimini alır. Bu koniye Taylor konisi denir [6]. İğne ucuna belirli bir mesafede toplayıcı levha bulunur. Polimer damlası koni şekline geçtikten sonra voltajda görülen küçük bir artışla koni ucundan jet fışkırarak belirli bir uzaklıkta kararlı hareket ederek levha üzerinde toplanır. Enerji kaynağı ve kolektör bir uçlarından toprağa bağlıdır. Bu nedenle sistem kapalı devre görünümündedir. Sistemde kullanılan iki elektrottan biri polimer çözeltisine diğeri ise kolektöre bağlanır. Elektrotlar sayesinde polimer çözeltisine elektrik akımı verilerek elektriksel alan oluşturulmaktadır. Elde edilmesi istenen nanolif yapısına bağlı olarak kullanılan polimer çözeltisi, iğne ucu ve toplayıcı levha arasındaki mesafe, uygulanan voltaj, toplayıcı levhanın şekli farklılık gösterebilmektedir [7-8].

2.1.1.1. Tasarımına Göre Elektroğirme Yöntemleri

Emülsiyon elektroğirme

Bu teknikte, birbirine karışmayan çözeltiler kuvvetli bir şekilde karıştırılarak emülsiyon haline getirilir. Şırıngaya yerleştirilir ve yüksek voltaj uygulanır. Bu sayede elektroğirme uygulandığında birbirine karışmayan iki polimer çözeltiden tek lifli bir iskele üretilmiş olunur. Bu tür nanolifleri üretmek emülsiyon oluşturmak için hesaplanması gereken değişkenlerin fazla olması nedeniyle diğer nanofiberlerin üretimine oranla daha zordur [9-10].

Koaksiyal elektroğirme

Bu teknik çekirdek- kabuk nanolifleri yapmak için kullanılan bir yöntemdir. Bir polimer(kabuk) ve bir bileşik(çekirdek) çözeltisi veya farklı polimer çözeltiler içeren iki farklı şırınga kullanılmaktadır. Kompozit bir jet oluşturarak koaksiyal yapılar oluşturulması temeline dayanan bu yöntem sonucunda çekirdeğin kabuk malzeme tarafından sarıldığı bir nanolif oluşturulur. Kabuk, çekirdek malzemenin buharlaşmasını önlemek amacıyla bariyer görevi görmektedir [11].

Eriyik üfleme düzeneği

Nanolif üretmek için kullanılan tek adımlı bu yöntem, yüksek yüzey alanı ve yalıtım özelliğine sahip gözenekli küçük çaplı lif üretimi için yaygın olarak kullanılmaktadır. Öncelikle polimer eritilir ve şırıngaya yerleştirilir. Polimer jetlerin çapı yüksek hızlı sıcak hava kullanılarak düşürülür [12]. Nanolif çapları, eritilen polimerin viskozitesine, sıcaklığına, kullanılan havanın sıcaklığına ve hızına bağlıdır. Sonunda, rastgele dizilime sahip uzun ve ince nanolif kolektör üzerinde toplanır. Avantajlarının yanı sıra sıcak hava kullanılması nedeniyle termal bozunma olabileceğinden kullanılacak polimerler sınırlıdır [13].

Gaz destekli elektroğirme

Elektrik iletkenliği zayıf düşük sıcaklıktaki malzemeleri elektrospinleyebilmek için artırılmış itici güç kullanarak dar çaplı nanolifler üretimde kullanılan yöntemdir [14].

Makaralı elektroğirme

Bu yöntemin kurulumu diğer yöntemlere göre farklılık göstermektedir. Bir hazne, destek malzemesi, yüksek voltajlı bir güç kaynağı, silindir eğirme elektrodu ve topraklanmış bir kolektör bulunur. Silindir eğirme elektrodu bir kısmı içeride olacak şekilde içerisinde polimer çözeltisi bulunan hazneye yerleştirilir. Silindir eğirme elektrodunun yüzeyinde birçok Taylor konisi oluşur ve bu sayede topraklanmış kolektör üzerinde sürekli bir nanolif tabakası oluşur [15].

Manyetik alan destekli elektroğirme

Bu teknik sayesinde diğer yöntemlere göre daha düzenli ve daha az bölünen küçük çaplı nanolifler üretmek mümkündür. Kurulumunda 2 paralel sabit mıknatıs veya Helmholtz bobinleri ve kullanılan mıknatıslara uyumlu polimer çözeltileri içeren bir şırınga kullanılmalıdır. Bu yöntemde yüksek hız ve polimer zincirlerin düzgün hizalanması nedeniyle küçük fiber çapı elde edilebildiği gibi kullanılan polimer çözeltisinin konsantrasyonu değiştirilerek de istenen çapta ve morfolojide nanolifler üretmek mümkündür [16].

Kendinden demetlemeli elektroğirme

Bu teknik, bir şırınga pompası, iğne, dönen topraklı kollektör, yüksek voltaj jeneratörü ve topraklı bir iğne ucundan oluşan basit bir kurulumu sahiptir. Dönen toplayıcıya sarılmış topraklanmış iğne ucu sayesinde kendi kendine demetleme görülmektedir. Bu teknikte en önemli parametre şırıngaya konulan polimer çözeltisinin elektrik iletkenliğidir. Düzenli dizilime sahip nanolif üretmek için kolaylıkla kullanılabilir bir yöntemdir [17-18].

Solventsiz elektroğirme

Solventsiz elektroğirme, melt electrospinning, supercritical CO₂-assisted electrospinning (CO₂-AEs), anion-curing electrospinning (ACEs) ve UV-curing electrospinning (UV-CEs) gibi teknikler kullanarak adından da anlaşıldığı gibi çözücü kullanmadan ultra ince nanolifler üretilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu teknik sayesinde havaya çözücü salınımı önlenmekte ve polimerin tamamının yüksek verimlilikle kullanılması sağlanmaktadır. Melt elektroğirme tekniğinde polimerin eritilmesi için çözücü kullanılmaz. Elektrikli ısıtma, lazer eritme cihazları, ısı tabancaları ve ısıtma fırınları gibi farklı teknikler kullanılabilir [19].

UV-curing emülsiyon, oksijensiz bir ortam hazırlanarak polimerlerin UV radyasyon ve nitrojen altında elektroğirme ile ultra ince lifler üretmek için kullanılan bir tekniktir [20]. Supercritical CO₂-Assisted Electrospinning (CO₂-AEs) yönteminde sıvı çözücü yerine elektrostatik kuvvetler ve süperkritik CO₂ kullanılarak polimer lifler üretilmektedir. Süperkritik CO₂ aşamasında yüksek basınçlı haznenin kullanılması gerekir bu nedenle geleneksel elektroğirme yönteminden daha karmaşıktır [21]. Anion-Curing Electrospinning tekniğinde hızlı bir şekilde polimerize olan ve güçlü zincirler oluşturabilen (CA) monomeri ve vizkoziteyi arttıran poli(metil metakrilat) (PMMA) olmak üzere sadece iki bileşen kullanılmaktadır [14].

Yük enjeksiyon yöntemi

Bu yöntemde zayıf iletkenlik özelliği gösteren polimerlerin kullanılmasıyla nanolif üretimi gerçekleştirilir. Bu tekniğin kurulumu elektrotlar, yüksek voltaj kaynağı ve iletken olmayan polimer çözeltisi olmak üzere 3 parçadan oluşur. Elektrotlar da kendi arasında yayıcı elektrot, ikinci elektrot ve toplayıcı elektrot olmak üzere 3 parçadır. Yayıcı elektrodun uç noktası topraklanmış ikinci elektrod üzerinde ortalanmıştır. Elektrotlar arasındaki mesafenin kısa olması nedeniyle akışkan içinde elektrik alan oluşur. Diğer

yöntemlerden farklı olarak bu yöntemde Taylor konilerinin oluşumu gözlemlenmez. Yayılan jet elektrik yükü tarafından bölünür. Sıvı, ortada oluşturulan delikten yüksek basınç altında elektrotlar arasında geçirilir ve yüksek oranda elektron yüklenir. Delikten çıktıktan sonra yüklü damlacıklar toplayıcı elektrotta çekilir. Bu yöntemin oluşan lifin boyutlarının kontrol edilememesi ve yalnızca yalıtkan veya zayıf iletken malzemelerin kullanılabilmesi gibi dezavantajları vardır [22-23].

İki bileşenli elektroğirme

İki bileşenli elektroğirme, tek ve çok bileşenli nanolifler üretmek için kullanılan iki aşamalı bir tekniktir. Kullanılan polimerlerden en az biri nano boyutta olmalıdır ve farklı iki şırıngaya konularak elektrospunlanır [13]. İki polimer çözeltisinin ekstrüde edilmesi sonucunda iki bileşenli lifler oluşur. Farklı bileşenler ayrılarak ya da bileşenlerden biri çıkartılarak nanolifler üretilir. İki bileşenli lif kesitinin yaygın şekilleri side-by-side, islands-in-the-sea, sheath-core, segmented-pie, segmented-ribbon, and hollow segmented-pie dir. Kullanılan farklı polimerlerin reolojik özelliklerinin aynı olması gerekmektedir. Bu özelliklere sahip belirli polimerler kullanılabilir için malzeme seçeneği sınırlıdır [24].

Near-field electrospinning (NFEs- yakın alan elektroğirme)

Bu teknik standart elektroğirme yöntemiyle kurulumda kullanılan materyaller açısından birebir aynıdır. Tek farkı iğne ile kollektör arasındaki mesafenin standart elektroğirme kurulumuna oranla daha yakın olmasıdır. İğne ile kollektör arasındaki mesafe yaklaşık olarak 500 mm den 3 mm'ye kadar düşürülmüştür. Mesafenin kısaltılmasındaki amaç oluşan jetin eğri kararsızlığının önlenmesidir. Bu yöntem sayesinde nanoliflerin toplanması yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiş olur. Fakat kollektör ile iğne arasındaki mesafenin kısa olması çözücünün yetersiz buharlaşmasına bağlı olarak elektriksel bozulmaya neden olabilir. Bu sorunla karşılaşmamak için polimer çözeltisinin doğru oranda ayarlanması oldukça önemlidir. Bu teknikte standart elektroğirmeye göre daha düşük voltaj uygulanır. Uygulanan voltaj arttıkça nanolif çap boyu standart elektroğirme tekniğinin aksine artmaktadır [25-26].

2.1.1.2. Kollektör Şekline Bağlı Elektroğirme Yöntemleri

Kurulumu ve kullanılan materyaller nedeniyle farklı elektroğirme çeşitleri olduğu gibi kollektör şekillerinin, sayılarının tasarımlarının değişkenlik gösterdiği farklı elektroğirme yöntemleri de vardır.

Dönen tambur toplayıcı

Bu yöntemde oluşan jetler dönen tambur elektrotun kullanıldığı bir kollektörde toplanır. Kollektörün dönme hızı jet birikintilerinin hızıyla eş zamanlı olduğunda hızlanmış lifler elde edilir. Kollektörün hızı olması gerektiğinden fazla olursa jet kopması görülür ve nanofiber oluşamaz. Eğer

dönme hızı olması gerekenden az olursa düzgün hizalama görülemez ve lifler bir bölgede toplanır [27].

Bıçak kenarlı elektrotlu dönen tüp toplayıcı

Bu yöntemde yalıtkan olan döner kollektörün altına negatif yüklü bıçak elektrotlar yerleştirilir. Bu elektrotlar sayesinde jetlere farklı yönelim açıları kazandırılarak çok katmanlı ve özel mekanik özelliklere sahip lifler üretilebilir [28].

Paralel iletimli dönen mandrel toplayıcı

Bu yöntemde polimer çözeltisinin yer aldığı pozitif iğne ucu, yardımcı elektrot olarak negatif yüklü paralel iletken şeritler ve yalıtkan bir kollektör kullanılır. İğne ucu ile yardımcı elektrotlar arasında döner kollektör konulur. Yüklerinden kaynaklı iğne ucundan yardımcı elektrotlara doğru bir elektrik alan oluşur. Bunun sonucunda elektroda doğru fiber hızlanması görülür ve kollektörde nanolif toplanır. Tek başına döner kollektör kullanımıyla karşılaştırıldığında bu yöntemde hizalanmış lifler elde etmek için daha düşük dönüş hızına ihtiyaç duyulurken daha küçük çaplı kollektör de kullanılabilir [29].

Parallel conducting collector (Paralel iletken kollektör)

Bu düzenekte, iki topraklanmış metal elektrot (çubuk, plaka, tel vb.) toplayıcı görevi üstlenmiş, paralel ve aralarında boşluk olacak şekilde iğnenin altına yerleştirilmiştir. Bu iki elektrot arasında elektrik alan çizgileri oluşur ve jetler paralel elektrotlar arasındaki boşluk boyunca gerilir. Böylece paralel olarak hizalanmış nanolifler elde edilir. Bu yöntemde nanolifler elektrik alan çizgileri boyunca toplayıcı elektrota değmeden oluştuğu için kirlenme olasılığı yoktur bu nedenle doku mühendisliğinde rahatlıkla kullanılabilir [30].

Rotating wire drum collector (Döner tel tambur toplayıcı)

Bu yöntem, döner tambur toplayıcı ve paralel elektrot toplayıcı yöntemlerinin bir sistemde birleştirilmesiyle ortaya çıkmıştır. Silindir şeklindeki döner toplayıcı eşit uzunluklarda paralel topraklanmış tellerden oluşmaktadır. Paralel elektrot kollektörü yöntemine benzer şekilde elektrik alan oluşur ve silindirin dönmesiyle elektrotlar hizalanmış nanolifler üretmektedir [22].

2.1.2. Elektroğirme Haricindeki Teknikler

Farklı yapılarda nanolifler üretmek için kullanılan birçok elektroğirme tekniği olduğu gibi bu teknik olmadan da nanolif üretmek mümkündür. Elektroğirme haricindeki bu teknikler daha az çözücü gerektirirken üretim maliyetini düşürerek üretkenliği de arttırmaktadır.

2.1.2.1. Arayüzey Polimerizasyonu

Bu yöntem iki farklı molekül içerisinde çözünebilecek iki farklı monomer bulundurmaktadır. Oluşturulacak olan bu iki çözelti karıştırılır. Karışma işleminden sonra çözünen

monomerler ara yüzeyde polimerize olacaktır. Örnek olarak yapılan bir çalışmada 1 M HCl (20 ml) içerisinde 4 mmol amonyum persülfat ve 4 mmol anilin bulunduran 20 ml kloroform çözeltisileri karıştırılmıştır. Reaksiyon sonucunda ara yüzeyde polianilin oluşmuştur [31].

2.1.2.2. Çizim

Bu yöntem nanolif üretmek için kullanılmaktadır. Elektroğirme tekniğinden farklı olarak bu yöntem sayesinde tek nanolifler üretilmektedir. Alt tabaka üzerine milimetrik bir polimer çözeltisi damlatılır. Mikromanipülatör olarak bilinen cihaz yardımı ile mikropipet damlacığa daldırılmaktadır. Mikropipet sıvıdan hafif bir şekilde çekilir ve düşük bir hızla hareket ettirilir. Nanolif oluşturmak için yapılan bu işlem her damlacık üzerinde birkaç defa uygulanmaktadır. Ve sonuç olarak nanolifler yüzeyde çekilme ve mikropipet ucuna dokunarak birikecektir. Bu yöntem nanolifleri tek tek inceleme avantajı sunarken liflerin belirli bir süre boyunca çekilebilmesi dezavantajdır [32].

2.1.2.3. Şablon Sentezi

Bu yöntem polimerik, metalik, seramik ve yarı iletken lifler; kimyasal ve elektrokimyasal oksidatif polimerizasyon işlemleri kullanılarak üretilmektedir. Ve bu nanolifler çok sayıda silindirik gözenek içeren membran kullanılarak üretilmektedir. Şablon istenilen bir malzeme veya yapıyı elde etmek için kullanılması anlamına gelmektedir ve metal oksit membranı ifade eder. Bu teknik, su basıncı işlemi altında nano ölçek çapındaki gözeneklerden polimer çözeltinin geçebilmesi ve katılmış olan çözelti ile temas etmesi durumunda nanolif oluşturması işlemine dayanmaktadır. Bu yöntem ile uzun boyutlarda nanolif üretilmez [33].

2.1.2.4. Faz Ayırma

Bu yöntem fazların fiziksel uyumsuzluk nedeniyle ayrılmasına dayanmaktadır. İlk işlem homojen bir nanolif oluşturmaktır. Polimerin oda sıcaklığında veya yüksek sıcaklıktaki bir çözücü içerisinde çözünmesi ve ardından jelin elde edilmesi amaçlanmıştır. Sonrasında çözeltinin jelleşme sıcaklığında tutularak çözülden ayrışması ile nanolif üretimi gerçekleşmiştir. Bu yöntem minimum ekipman gerektiren bir işlemdir [34].

2.1.2.5. Kendinden Montaj

Bu yöntem hidrofobik kuvvetler, hidrojen bağı ve elektrostatik tepkimeler gibi kovalent olmayan kuvvetlerin etkisiyle belirli kalıplar halinde düzenlenmesidir. Elektrostatik itme kuvvetleri ince nanolif üretmek için kullanılmaktadır ve bu işlem geleneksel elektroğirme işlemine dayanır. Bu yöntemin diğerlerinden farkı iletken liflerde elektrostatik itme kuvvetinin kullanılmasıdır. Bu yöntemde oluşan nanolifin sadece uçları ayrılmaktadır. Daha sonra bu lifler yeni üretilen yüklü nanolife mekanik olarak bağlanır [35].

2.1.2.6. Dondurarak Kurutma (FD)

Bu yöntem, katı- sıvı faz ayrımı olarak da bilinmektedir. Çözeltinin düşük sıcaklıkta dondurulması, donmuş numunenin basıncının vakum yoluyla düşürülmesi ve donmuş numunenin buzunun çıkarılması (birincil kurutma), malzemedeki donmamış suyun desorpsiyon yoluyla çıkarılması (ikincil kurutma) aşamalarını takip eden üç adımda oluşan bir tekniktir. Bu teknik sayesinde elektroögirme ve diğer yöntemler gibi katkı maddeleri veya ön işlemler gerektirmeden, kitin gibi polimerler sayesinde istenen çaplarda lifler üretmek mümkündür. Bu özelliği FD tekniğini diğer yöntemlerden avantajlı hale getirmiştir. Dondurarak kurutma yönteminde diğer nanolif üretim tekniklerinde kullanılan organik çözücüler yerine su ve buz kristalleri kullanılmaktadır [36].

3. Filtrasyon Nedir?

Filtrasyon genel olarak ayırma işlemi olarak tanımlanabilmektedir. Bu işlemin amacı filtrelenen maddenin saflığını arttırmaktır. Hava, gaz veya su gibi ortamlarda çevre kirliliğine neden olan istenmeyen partikülleri filtrelemek için kullanılan bir yöntemdir [37]. Çeşitli filtrasyon mekanizmaları bulunmaktadır fakat hassas filtreleme yapabilmek için yani küçük partiküllerin ortamdan ayrılmasını sağlamak için, mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmoz yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en etkili olanlarından biri nanofiberlerin filtrasyonda kullanımıdır [38].

4. Nanofiberlerin Filtrasyonda Kullanımı

Nanolifler yüksek oranda küçük çaplı gözeneklilik, yüksek yüzey alanı, fonksiyonelleştirilebilmeleri, istenen çaplarda üretilebilmeleri gibi özellikleri sayesinde filtreleme için sıklıkla kullanılabilmektedir. Yapılan bazı çalışmalarda nanolif membranların ticari bir HEPA filtreye oranla daha yüksek filtreleme oranına sahip olduğu görülmüştür [38]. Elde edilmesi istenen filtre türü ve kullanım alanına göre nanoliflerde olması gereken gözenek büyüklüğü, hava geçirgenliği, mekanik ve elektriksel özellikler hesaba katılarak nanolif üretiminde kullanılacak hammaddelere karar verilir. Filtrelerin geçirgenliği ve partikül tutma kapasitesi nanoliflerin gözenek boyutuna bağlıdır. Gözenek çapı küçük nanolifler üreterek yüksek filtrasyon verimliliği sağlamak mümkündür.

4.1. Su Filtrasyonu

Günümüzde suyun tuzdan arındırılması, su ve atık su arıtımı, membran ayırma, yağ/su ayırma gibi farklı uygulamalarda nanoliflerden oluşan membranlar sıklıkla kullanılmaktadır. Nanolifler seçiciliği ve esnekliği sayesinde ayırma veya su arıtmada yüksek performans sunar. Elektroögirme yöntemiyle elde edilen nanolifler atık sularındaki istenmeyen partikülleri aynı anda ayırma ve bozma yeteneklerine sahip oldukları için su filtrasyonunda sıklıkla kullanılırlar. Nanolif tabanlı filtreler akış hızında düşüş olmaksızın 3- 10 mikrometre boyutundaki partikülleri rahatlıkla sudan ayırabilirler. Nanolifler aynı zamanda fizisorpsiyon, kemisorpsiyon ve elektrostatik çekim gibi yollarla sudaki

toksik iyon ve organik kirleticilerin uzaklaştırılması için de kullanılmaktadırlar [39-40].

Elektroögirme tekniği sayesinde istenen çaplarda üretilebilen nanolifler yüksek yüzey alanına sahip oldukları için çok sayıda adsorpsiyon bölgesi ve adsorpsiyon kapasitesine sahiptirler. Aynı zamanda hidrofilik gözenekleri sayesinde yüksek difüzyon hızı ve nanofiber yüzey ile moleküller arasındaki elektriksel çekim kuvveti sonucunda suyun hızlı ve yüksek verimli arıtılmasını sağlamıştır [41].

Nanolifler farklı yollarla kolayca fonksiyonelleştirilebilirler. Nanolif yüzeyine belirli bir yakalama maddesinin eklenmesi veya yüzey ıslanabilirlik özelliklerinin kazandırılmasıyla sudaki istenmeyen bir maddenin hedeflenerek uzaklaştırılması mümkündür.

4.2. Hava Filtrasyonu

Hava filtreleri, toz partikülleri, bakteri ve virüsler gibi hava kirliliğine neden olan istenmeyen partiküllerin filtrelenmesi için iç mekân hava temizliği, havalandırma ve klima sistemleri, temiz oda filtreleri, solunum cihazları, endüstriyel gaz temizliği, otomotiv motor emme filtreleri, hastanelerde havadaki ince toz ve bakterileri temizlemek için kullanılabilir. Polivinil alkol, polietilen tereftalat, PAN, silika ve alümina gibi farklı polimerler, hava filtrasyonu için nanofiber oluşumunda sıklıkla kullanılan hammaddelerden bazılarıdır. Elektroögirme tekniği kullanılarak elde edilen nanofiberlerin çaplarını farklı parametreler kullanarak kontrol etmek mümkün olduğu için bu yöntem kullanılarak istenen özelliklerde hava filtresi üretilebilir. Nanofiber membranların yüksek filtrasyon verimliliği ve düşük hava direncine sahip olması hava filtrasyonunda kullanılmasının en büyük nedenidir. Üretilen nanolifler farklı nonwoven yüzeylerle birleştirilerek veya fonksiyonelleştirilerek farklı alanlarda kullanılabılır. Buna örnek olarak diğer nonwoven yüzeylerle birleştirilen karbon nanolifler aerosol filtreleri ve yüz maskeleri üretmek için kullanılmaktadır [42-43].

5. Nanofiber Filtrelerin Biyomedikal Kullanım Alanları

5.1. Diyaliz Filtresi

Kronik böbrek hastalığı, böbreklerin vücutta zararlı etki oluşturabilecek fazla atıkları (üre, kreatin ve ürik asit) ve fazla sıvıyı çıkaramadığı durumlarda oluşabilecek rahatsızlıktır [44]. Dünya çapında yaklaşık 2,5 milyon insan böbrek yetmezliği nedeni ile diyaliz tedavisi gördüğü tahmin edilmektedir. Böbrek yetmezliği için en yaygın tedavi yöntemi hemodiyaliz ve periyot diyaliz işlemleridir [45].

Kanla temas eden membran, elektrospun polietilen-ko-vinil alkol polimerinden ve kandaki atık ürünleri/toksinleri emebilen mikro gözenekli yapılara sahip alu-minosilikatlar olan zeolitlerden yapılmıştır. Zeolitlerin içindeki silikonun alüminyuma oranı, adsorbe edilen toksinlerin sayısını kontrol etmek için kullanılabilir [44]. Dokunmamış nanofiberler; geniş yüzey-hacim, yüksek gözenek ve bağlanabilirlik, mikro ölçekli interstisyel boşluk ve az maliyet nedeniyle çok fazla tercih edilmektedir. Kan filtrasyonu biyolojik sıvılardan

toksin giderme, protein saflaştırma ve ayrıca su arıtma cihazlarında ağır metaller ve inorganik atıkların giderilmesi için kullanılacak ideal bir malzemedir [46].

Periyodik diyaliz filtresi, böbrek yetmezliği olan hastalarda kullanılan bir tür hemodiyaliz yöntemidir. Bu yöntemde, hastanın kanı bir arteriovenöz fistül, greft veya kateter yoluyla bir dış cihaza bağlanır. Periyodik diyaliz filtresi, kanı temizlemek ve atık maddeleri, fazla suyu ve elektrolitleri uzaklaştırmak için bir membran kullanır. Bu membran, ince bir materyal tabakasıdır ve filtreleme işlemini gerçekleştirmek için mikroskobik gözenekler veya kanallar içerir [47]. Filtrenin yapısı, filtreleme işleminin doğruluğu ve etkinliği için son derece önemlidir. Periyodik diyaliz filtresi, genellikle yüksek derecede özgülüğe sahip polisülfon, polietersülfon veya polikarbonat gibi yapay polimerlerden yapılmıştır. Bu polimerler, membranın dayanıklılığını arttırmak için sıklıkla cam elyaf veya karbon fiberlerle takviye edilir. Filtrenin yapısı, polimerlerin mikroyapısına ve gözenek büyüklüklerine bağlıdır. Filtreler, birkaç farklı şekilde yapılandırılabilir. Bazı filtreler, plaka ve çerçeve gibi sert parçalarla desteklenen bir membran yapısına sahiptir. Bu filtreler, membranın daha fazla desteklenmesini sağlayarak dayanıklılığı artırır ve filtreleme işleminin doğruluğunu artırır [48]. Diğer filtreler ise, sert bir çerçeve yerine membranın kendisinden oluşan bir torba yapısına sahiptir. Bu filtreler, daha esnek bir yapıya sahip olduğundan, kullanım sırasında daha az stres altında kalırlar ve daha az sıkışma ve tıkanma olasılığı vardır. Filtrelerin gözenek boyutları, filtrenin işlevine bağlı olarak değişebilir. Bazı filtreler, daha büyük moleküllerin geçmesine izin verirken, diğerleri daha küçük moleküllerin de uzaklaştırılmasını sağlamak için daha küçük gözeneklere sahiptir. Filtreler ayrıca, elektriksel yükler veya kimyasal özellikler gibi diğer faktörlerle de modifiye edilebilir. Bu modifikasyonlar, filtreleme işleminin belirli bileşenlerin seçici uzaklaştırılmasını veya öncelikli olarak alınmasını sağlamak için optimize edilmesine yardımcı olabilir. Sonuç olarak, periyodik diyaliz filtresinin yapısı, membranın polimer yapısına, membranın desteklenme şekline ve gözenek boyutuna bağlı olarak değişebilir. Filtreleme işleminin doğruluğu ve etkinliği için filtre yapısının doğru bir şekilde optimize edilmesi önemlidir [49].

5.2. Kalp-Akciğer Makine Filtresi

Kan filtresi, partikülleri ve gaz embolilerini engellemeye yarayan nanofiber içermektedir. Bu arteriyel hat filtresi bubble oksijenatör sisteminde kullanılmalıdır. Arteriyel filtreler naylon veya polyesterden yapılan, 25-40 µm por (elek deliği) büyüklüğü olan kalburlardır. Yüzey alanı 600–800 cm², flow miktarı 7 lt/dk., filtre içindeki basınç farkı 30 mmHg'dan azdır, 200 ml ön volüm (priming) gerektirir [50].

5.3. Mekanik Ventilator Filtresi

Mekanik ventilator filtresi, mekanik filtrelerin hava giriş ve çıkış bölümlerine yerleştirilir. Burada kullanılan filtreler enfeksiyonu önleme amacı ile kullanılmaktadır. Filtreler, patojenleri ve partikülleri tutarak solunum yoluna doğru ilerlemesini engelleyip olası havayolu enfeksiyonlarının yayılmasını önlemektedir. Mekanik ventilator filtresi ayrıca

cihazın iç kısımlarını da temizleyerek cihaz ömrünü uzatmaktadır [51]. Mekanik ventilator filtresi, iki ana başlığa ayrılmaktadır: hava girişi filtresi ve hava çıkışı filtresi. Hava girişi filtresi, ventilator cihazına giren havayı filtreleyerek olası patojen ve partiküllerin hastaya ulaşmasını engeller. Hava çıkışı filtresi ise, hasta tarafından solunan havayı bakteri, virüs, toz ve partiküllerin çevreye yayılmasını önlemektedir [52]. Bu filtreler geleneksel filtre malzemesi olan polipropilen, köpük, kâğıt, elyaf ve cam elyaftan yapılabilmektedir. Gelişen teknoloji ile nanofiber filtreler daha yüksek filtrasyon verimliliği, daha düşük hava direnci ve daha yüksek yüzey alanı nedeniyle daha çok tercih edilmektedir [53].

5.4. Aspirasyon (Aspiratör) Filtresi (Hidrofobik Bakteri Filtresi)

Hidrofobik filtre, cerrahi aspiratör cihazlarında ve diğer aspirasyon işlemi yapılan cihazlarda sıvının vakum pompasına kaçmasını ve vakum pompasının arızalanmasını engellemek amacıyla üretilmiş bir üründür. Hidrofobik filtre tüm aspiratör cihazlarına uyumludur. Hidrofobik filtre, aspirasyon cihazlarının kavanoz kapaklarının üst kısımlarına takılır. Kavanozların tamamen dolması ve boşaltılmasının unutulduğu zamanlarda kavanozda bulunan kan veya diğer sıvıların vakum pompasına gitmesini ve cihazın arızalara sebep vermemesini sağlayan bir üründür. Hidrofobik filtre sıvı ile temas eder etmez anında cihazın vakum geçişini keser ve böylelikle vakum pompasına sıvı geçişini engeller. Ayrıca bu sıvıların herhangi mikrop içermesi durumunda sıvıyı şişe içinde hapsederek ortamda bulunan personelinde sağlığını korumaktadır. Hidrofobik filtrenin sıvı ile temas ettiği ve vakumu durdurduğu anlarda cihaz hemen kapatılarak yeni bir hidrofobik filtre ile değiştirilmelidir [54].

5.5. Maske (Yüz) Filtresi

Yüz maskeleri dünya genelinde yaygın olarak kullanılan koruyucu ekipmanlardır fakat tek başına mükemmel bir koruma sağlamamaktadır. Yüz maskeleri, havadaki partikül, patojen ve solunum yolu ile bulaşabilecek virüslerin yayılmasını önlemede yardımcı filtreler içermektedir. Bu filtreler maskenin ön yüz çeperine yerleştirilir ve havadaki partiküllerin (toz, polen, virüs vb) yakalanmasını sağlar [55]. Filtreler üç çeşittir: Meltblown, Aktif Karbon ve Spunbond.

Meltblown filtreler, sentetik polimerlerin eritilip spreyleneceği ve yüksek hızlı hava akışıyla ince lifler oluşturulması yoluyla üretilir. Bu ince lifler, partiküllerin yakalanmasını sağlamak üzere bir araya getirilir. Meltblown filtreler, küçük partiküllerin yakalanması için oldukça etkili filtrelerdir. Yüz maskelerinde en iç katman olarak tercih edilmektedir [56]. Spunbond filtreler, benzer şekilde sentetik polimerlerin eritilip spreyleneceği yoluyla üretilir. Ancak meltblown filtrelerden farklı olarak daha kalın lifler ve daha geniş gözenekler oluşturulur. Bu nedenle, spunbond filtreler daha büyük partikülleri yakalamak için kullanılır. Yüz maskelerinde genellikle meltblown filtrelerin üzerine konularak ek koruma sağlamak için kullanılırlar. Aktif karbon filtreler, birçok farklı malzemenin yanı sıra hindistan cevizi kabuğundan elde edilen karbon malzemesi kullanılarak üretilir. Bu filtreler, özellikle kokuları ve gazları engellemek

için tasarlanmıştır. Aktif karbon filtreleri, yüz maskelerinde bazen meltblown filtrelerin üzerine konularak ek koruma sağlamak için kullanılırlar [57].

5.6. Şırınga Filtresi

Şırınga filtresi, şırınga kullanım sırasında ilaçta bulunan katı maddelerin hastanın damarına girmesini önlemek için kullanılmakta olan bir filtredir. Bu tür filtreler ilaçların daha kontrollü bir şekilde verilmesine yardımcı olur. Şırınga filtreleri naylon veya polikarbonat malzemelerden üretilen çok küçük boyuttaki mikroorganizmaları da filtreleyebilen yapıdadır [58]. Şırınga filtreleri, tıbbi alanda ve laboratuvar ortamında sıklıkla tercih edilmektedir. Bu filtreler sterilizasyon öncesinde çözeltide bulunan partikül, mikroorganizma ve diğer kirleticilerden arındırma gibi sterilizasyon işlemleri sırasında da kullanılabilir. Sonuç olarak şırınga filtreleri doğru filtre seçimi ile ilaçların daha güvenli ve etkili şekilde enjekte edilmesine yardımcı olmaktadır [59].

5.7. Anestezi Cihazı Su Tutucu Filtresi

Anestezi sırasında kullanılan su tutucu filtreler, solunum devresine bağlı olan solunum havasının nemlendirilmesi sırasında suyun ve diğer sıvıların solunum sistemine girmesini engellemek için tasarlanmıştır. Bu filtreler, solunum devresindeki nemlendiricinin hemen öncesine veya solunum cihazının hortum çıkışına yerleştirilir. Su tutucu filtreler, mekanik ventilasyon veya bazı solunum cihazlarının bulunduğu yoğun bakım ünitelerinde sıkça kullanılmaktadır. Bu cihazlar solunum havasının nemli olmasından dolayı genellikle bir nemlendiriciye ihtiyaç duyarlar. Ancak nemlendiricinin kullanımı, solunum devresine giren suyun yanı sıra diğer sıvıların solunum sistemine girmesine de neden olabilmektedir [60]. Su tutucu filtreler, solunum havasındaki sıvıları filtreleyerek solunum sistemine girmesini engellerler. Bu filtreler, genellikle bir plastik gövde içinde birkaç katmanlı bir filtre malzemesinden oluşur. Filtre malzemeleri genellikle hidrofobik bir yapıya sahiptir ve durum suyu iterek suyun solunum sistemine girmesini engellemektedir. Bu filtrelerin kullanımı, olası solunum sistemi enfeksiyonlarının önlenmesi açısından da önemlidir. Bu filtreler, hastaların solunum sistemine giren mikroorganizmaların sayısını azaltarak enfeksiyon riskini azaltır. Bu nedenle, anestezi sırasında su tutucu filtrelerin kullanımı çok önemlidir. Sonuç olarak, su tutucu filtreler, solunum sistemi ile ilgili birçok durumda kullanılabilen önemli bir araçtır. Bu filtreler, solunum sistemi enfeksiyonlarının önlenmesine ve diğer zararlı maddelerin solunum sistemine girmesini engellemeye yardımcı olabilir [61].

5.8. Cerrahi Duman Filtreleme Cihazı

Cerrahi duman filtreleme cihazları, cerrahi işlemler sırasında oluşan dumanı ve bu duman içinde bulunan kirleticileri temizleyen cihazlardır. Bu cihazlar, cerrahların, hemşirelerin ve hastaların solunum yolu sağlığını korumak için kullanılır. Cerrahi işlemler sırasında, cerrahlar ultrasonik cihazlar, elektrokoterler veya lazerler gibi birçok farklı türde cerrahi aletler kullanırlar. Bu aletler, işlem sırasında dokuların

kesilmesi, koterlenmesi veya parçalanması gibi işlemleri gerçekleştirir. Bu işlemler sırasında oluşan duman, kirleticileri ve mikroorganizmaları içerir [62]. Bu duman, cerrahların, hemşirelerin ve hastaların solunum yollarına girebilir ve solunum yolu problemlerine neden olabilir. Cerrahi duman filtreleme cihazları, bu dumanı temizleyerek solunum yolu sağlığını korur. Bu cihazlar, bir vakum sistemi kullanarak, işlem sırasında oluşan dumanı emer ve içindeki kirleticileri ve mikroorganizmaları bir filtre sistemi aracılığıyla yakalar [63]. Filtre sistemi, kirleticileri ve mikroorganizmaları tutar ve temizlenmiş hava, tekrar çalışma ortamına geri verilir. Cerrahi duman filtreleme cihazları, birçok farklı türde gelir ve her biri farklı bir filtreleme teknolojisi kullanır. Bazı cihazlar, elektrostatik filtreleme teknolojisini kullanırken, diğerleri HEPA filtreleri kullanır. Elektrostatik filtreleme teknolojisi, dumanın içindeki partikülleri, elektrostatik yükler aracılığıyla yakalar. HEPA filtreleri ise, dumanın içindeki partikülleri ve mikroorganizmaları yakalar ve filtreler. HEPA filtreleri, "yüksek verimli partikül hava" filtreleme teknolojisi olarak bilinir. Bu filtreler, işlem sırasında oluşan duman içindeki partikülleri, küf, bakteri, virüsler, toz ve diğer kirleticileri %99.97 oranında yakalar. HEPA filtreler genellikle iki aşamalı bir filtreleme sistemi kullanır. İlk aşamada filtre büyük partikülleri tutar ve ikinci aşamada, filtre daha küçük partikülleri ve mikroorganizmaları yakalar. Bu filtrelerin yapısı, çok ince cam elyafından yapılmıştır ve birçok katmanlı bir yapıya sahiptir [64]. Elektrostatik filtreleme teknolojisi ise, duman içindeki partikülleri elektrostatik yükler aracılığıyla yakalar. Bu filtreler, yüksek voltajlı elektrostatik plakalar arasından geçen hava akımına maruz kalır. Elektrostatik plakalarda oluşan elektrik yükleri, duman içindeki partikülleri elektrostatik olarak yükler ve bu yüklenmiş partiküller daha sonra filtrelendirir. Elektrostatik filtreler, daha küçük partiküllerin yakalanması için özellikle yararlıdır. Cerrahi duman filtreleme cihazlarının filtrelerinin yapısı, çeşitli faktörlere bağlıdır, ancak genellikle yüksek kaliteli malzemeler kullanılır. Filtrelerin malzeme kalitesi ve yapısı, cihazın verimliliğini ve uzun ömürlülüğünü etkiler [65].

6. Nanofiberlerin Diğer Kullanım Alanları

6.1. İlaç Dağıtımı

Nanofiberlerin özellikleri ilaç dağıtımı için kullanılabilir. Örneğin, elektroçirme yöntemiyle üretilen nanofiberler, yüksek gözeneklilik, ince çap ve büyük yüzey alanı ile öne çıkar. Bu özellikleri sayesinde, elektroçirme nanofiberler, ilaç moleküllerinin daha iyi emilmesini ve hedef dokuda daha etkili bir şekilde dağıtılmasını sağlar. Üretilen nanofiberlerin çeşitli ilaçların kullanımı elektroçirme ile sağlanmaktadır [66]. İlaç iletimi için nanofiber potansiyeli, protein ve asitler ve küçük organik ilaçlar gibi moleküller kullanılarak değerlendirilmiştir [67]. Küçük organik ilaçlar, protein ve asitler ve antikorlar hedeflenen bölgeye ulaşmak ve güvenilir sonuçlar elde etmek için nanofiberlerin maliyeti nedeniyle en çok tercih edilen sistemdir. Elde edilen nanofiberlerin özellikleri, ilaç dağıtımı için optimize edilebilir. Nanofiber üretiminde kullanılan polimerlerin seçimi, fiber çapı, yapı,

yüzey alanı ve gözeneklilik gibi faktörlerin tümü, ilaç dağıtımının etkinliğini belirleyebilmektedir. Sonuç olarak, nanofiberler, ilaç dağıtımı için önemli bir potansiyele sahiptir. Bu malzemeler, daha etkili ve güvenli ilaç dağıtım sistemlerinin geliştirilmesine yardımcı olabilir [69].

6.2. Doku Mühendisliği İçin İskele

Doku mühendisliğinde üretilen iskeleler belirli bir doku ve organın işlevinin geri kazanılması, değiştirmesi ve desteklemesine yarar sağlamaktadır [70]. Nanofiber iskeleler, doğal insan dokusunun şeklini taklit edebilen bir sistemdir. Üretilen nanofiberler, yüksek gözeneklilik, büyük yüzey alanı, ince çap ve düşük maliyet nedeniyle çok tercih edilmektedir [71]. Günümüzde çeşitli uygulamaları vardır; cilt, kırıkta, kemik, bağlar ve iskelet kası gibi dokular, yapay kan damarları, tıbbi implantlar vb. [72].

İskele üretiminde gözenek yapısı kontrol edilmelidir. Yüksek life sahip nanolif iskeleler, rastgele dağılmış nanoliflere göre mekanik özellikler ve hücre göçüne sebep olur. Özgün dokular olan kırıkta doku mühendisliği, tendon ve bağ doku mühendisliği, kardiyovasküler ve nöral doku mühendisliği alanında kullanımı yaygındır [73].

6.3. Yara Örtüsü

Nanofiberler, son yıllarda yara örtüsü olarak kullanılmaya başlanan yenilikçi bir malzemedir. Bu malzemeler, yaraların iyileşme sürecini hızlandırabilir ve enfeksiyon riskini azaltabilmektedir [74]. Yara örtüleri, yarayı dış ortamdan korumak, nemli bir ortam sağlamak ve iyileşmeyi kolaylaştırmak için kullanılmaktadır. Nanofiberler, nanometre ölçeğindeki ince liflerden oluşur. Bu lifler, polimerik malzemelerden veya doğal kaynaklı malzemelerden üretilir. Nanofiberlerin özellikleri, boyutlarına ve kullanılan malzemeye göre değişiklik göstermektedir [75]. Nanofiberlerin yara örtüsü olarak kullanımı, birkaç avantaj sağlar. İlk olarak, nanofiberler, yaraların iyileşme sürecini hızlandırabilir. Çünkü nanofiberler, yaraya yerleştirildiğinde, yaranın iyileşmesine yardımcı olan hücrelerin ve proteinlerin hareket etmesini kolaylaştıran bir yüzey oluşturur. Ayrıca, nanofiberler, yaradaki sıvıyı emebilir ve yara etrafındaki nem seviyesini optimize ederek nemli bir ortam sağlamaktadır. Bu, yaranın iyileşmesi için gereken koşulları sağlamaya yardımcı olur. Bir diğer avantaj ise cilt yenilenmesini teşvik eden ve kontaminasyonu önleyen antimikrobiyal ilaçlar, büyüme faktörleri, vitaminler ve bileşikler ile birleştirilebilir. Bu kullanımlar ile enfeksiyon riski azaltılarak yaranın korunmasını da sağlayabilmektedir [76].

6.4. Teşhis

Nanofiberlerin bir diğer kullanım alanları ise tespit ve tedavi alanlarıdır. Tümör belirteçlerini veya kanda dolaşan hücrelerin tespiti, kanserde erken tanı da nanofiberler kullanılmaktadır. Örnek olarak ZnO nanofiberler çok duvarlı karbon nanotüpler içeren kovalent antikarsinom antijen-125 antikoru ile konjuge edilerek tümör tespitinde kullanılmıştır [77]. Nanofiberler çeşitli biyosensörler ile de kullanılmaktadır. Örnek olarak mikroakışkan biyoçip, grafen

ve karbon katkılı TiO₂ ile konjuge edilerek meme kanseri teşhisinde kullanılmaktadır [78]. Ultrasonik cihazlar, kanser tespiti ve sıtma tespiti için biyosensörler, dolaşımdaki glikoz, kolesterol, üre ve bakteri tespiti, elektrokimyasal sensörler gibi birçok yerde kullanılmaktadır. Bu kullanımlar ile teşhisler daha kolay gerçekleştirilmektedir [79].

7. Sonuçlar

Nanofiberlere olan talebin artması ve çeşitli alanlarda kullanılabilmesi nedeniyle, son yıllarda birçok nanofiberin üretim teknolojisinin gelişmesine tanıklık edilmiş ve önemli ilerlemeler belirlenmiştir. Nanofiberler, ilaç dağıtımı, sağlık hizmetleri, enerji üretim ve depolama, inşaat ve yapı malzemeleri gibi birçok alanda kullanımı zamanla artmaktadır. Nanofiberlerin üretilmesinde uygun üretim teknikleri ile kimyasal, biyolojik, elektriksel, optik ve mekanik özellikleri elde edebilmek için tasarlanabilir. Bu derlemede, nanofiberlerin üretim şekilleri ve işlem basamakları, kullanılan cihaz ve uygulama alanları tanımlanmıştır. Küçük çapları, geniş yüzey alanları, biyoyumluluk ve kimyasal bütünlük, kontrollü mekanik özellikleri ve gözenekli ağ yapıları nedeniyle nanofiberler şu alanlarda kullanılabilir: ultrafiltrasyon membranlar; hava ve atık su arıtma işlemleri; piller, kapasitörler ve yakıt hücreleri işlemleri; ilaç dağıtımı, doku mühendisliği için iskeleler, yara örtüleri ve teşhis işlemleri. Nanofiberlerin yaygın tıbbi uygulamaları ile birçok hastalık teşhisi, oluşan yara iyileşmesi ve kaybedilen dokular için üretilen iskeleler büyük avantaj sağlamaktadır. Dezavantajlarına örnek verilecek olursa nanopartiküllerin vücut sıvılarında paralanması ve sızması tolere edilememekte ve geri kazanımı bulunmamaktadır. Son on yılda nanofiberlerin özellikleri ve uygulamaları üzerine yapılan birçok çalışma olmasına rağmen, nanoliflerin tekrarlanabilirliği, üretimi için kullanılmakta olan teknolojiler yavaş ortaya çıkmıştır. Bu durum nanofiberlerin yaygın uygulanabilirliğine gölge düşürmektedir.

Kaynaklar

- [1] Sheetz, T., Vidal, J., Pearson, T. D., & Lozano, K. (2005). Nanotechnology: Awareness and societal concerns. *Technology in Society*, 27(3), 329-345.
- [2] Barhoum, A., Rasouli, R., Yousefzadeh, M., Rahier, H., & Bechelany, M. (2018). Nanofiber technology: History and developments. In *Handbook of nanofibers* (pp. 1-42). Springer International Publishing AG.
- [3] Ramakrishna, S. (2005). An introduction to electrospinning and nanofibers. World scientific.
- [4] Teo, W. E., & Ramakrishna, S. (2006). A review on electrospinning design and nanofibre assemblies. *Nanotechnology*, 17(14), R89.
- [5] Alghoraibi, I., & Alomari, S. (2018). Different methods for nanofiber design and fabrication. *Handbook of nanofibers*, 1-46.
- [6] Mirjalili, M., & Zohoori, S. (2016). Review for application of electrospinning and electrospun nanofibers technology in textile industry. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 6, 207-213.
- [7] Pillay, V., Dott, C., Choonara, Y. E., Tyagi, C., Tomar, L., Kumar, P., ... & Ndesendo, V. M. (2013). A review of the

- effect of processing variables on the fabrication of electrospun nanofibers for drug delivery applications. *Journal of Nanomaterials*.
- [8] Li, D., & Xia, Y. (2004). Electrospinning of nanofibers: reinventing the wheel?. *Advanced materials*, 16(14), 1151-1170.
- [9] Smolen, J. A. (2010). Emulsion electrospinning for producing dome-shaped structures within l-tyrosine polyurethane scaffolds for gene delivery (Doctoral dissertation, University of Akron).
- [10] Zhang, C., Feng, F., & Zhang, H. (2018). Emulsion electrospinning: Fundamentals, food applications and prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 80, 175-186.
- [11] Qu, H., Wei, S., & Guo, Z. (2013). Coaxial electrospun nanostructures and their applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 1(38), 11513-11528.
- [12] Song, J., Li, Z., & Wu, H. (2020). Blowspinning: A new choice for nanofibers. *ACS applied materials & interfaces*, 12(30), 33447-33464.
- [13] Zhang, X., & Lu, Y. (2014). Centrifugal spinning: an alternative approach to fabricate nanofibers at high speed and low cost. *Polymer Reviews*, 54(4), 677-701.
- [14] Barhoum, A., Pal, K., Rahier, H., Uludag, H., Kim, I. S., & Bechelany, M. (2019). Nanofibers as new-generation materials: From spinning and nano-spinning fabrication techniques to emerging applications. *Applied Materials Today*, 17, 1-35.
- [15] Ahmed, F. E., Lalia, B. S., & Hashaikheh, R. (2015). A review on electrospinning for membrane fabrication: Challenges and applications. *Desalination*, 356, 15-30.
- [16] Liu, Y., Zhang, X., Xia, Y., & Yang, H. (2010). Magnetic-field-assisted electrospinning of aligned straight and wavy polymeric nanofibers. *Advanced Materials*, 22(22), 2454-2457.
- [17] Thitiwongsawet, P., Wisesanupong, B., & Pukkanasut, S. (2015). Electrospun gelatin fiber bundles by self-bundling electrospinning. *Advanced Materials Research*, 1105, 190-194.
- [18] Wang, X., Zhang, K., Zhu, M., Yu, H., Zhou, Z., Chen, Y., & Hsiao, B. S. (2008). Continuous polymer nanofiber yarns prepared by self-bundling electrospinning method. *Polymer*, 49(11), 2755-2761.
- [19] Lyons, J., & Ko, F. (2005). Melt electrospinning of polymers: a review. *Polymer News*, 30(6), 170-178.
- [20] Zhang, B., Yan, X., He, H. W., Yu, M., Ning, X., & Long, Y. Z. (2017). Solvent-free electrospinning: opportunities and challenges. *Polymer Chemistry*, 8(2), 333-352.
- [21] Lv, D., Zhu, M., Jiang, Z., Jiang, S., Zhang, Q., Xiong, R., & Huang, C. (2018). Green electrospun nanofibers and their application in air filtration. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(12), 1800336.
- [22] Migliaresi, C., Ruffo, G. A., Volpato, F. Z., & Zeni, D. (2012). Advanced electrospinning setups and special fibre and mesh morphologies. *Electrospinning for advanced biomedical applications and therapies*. Smithersrapra, United Kingdom, 23-68.
- [23] Minari, T., Miyadera, T., Tsukagoshi, K., Aoyagi, Y., & Ito, H. (2007). Charge injection process in organic field-effect transistors. *Applied Physics Letters*, 91(5).
- [24] Zaarour, B., Zhu, L., Huang, C., & Jin, X. (2020). A mini review on the generation of crimped ultrathin fibers via electrospinning: Materials, strategies, and applications. *Polymers for Advanced Technologies*, 31(7), 1449-1462.
- [25] Liu, H., Mukherjee, S., Liu, Y., & Ramakrishna, S. (2018). Recent studies on electrospinning preparation of patterned, core-shell, and aligned scaffolds. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(31), 46570.
- [26] Antonsen, M.G. (2014). Near-field electrospinning of embedded inorganic ZnO nanowires. Aalborg University, Institute of Physics and Nanotechnology, Denmark.
- [27] 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.
- [28] Yang, Z., Peng, H., Wang, W., & Liu, T. (2010). Crystallization behavior of poly (ϵ -caprolactone)/layered double hydroxide nanocomposites. *Journal of applied polymer science*, 116(5), 2658-2667.
- [29] De Prá, M. A. A., Ribeiro-do-Valle, R. M., Maraschin, M., & Veleirinho, B. (2017). Effect of collector design on the morphological properties of polycaprolactone electrospun fibers. *Materials Letters*, 193, 154-157.
- [30] Sautter, B. P. (2005). Continuous polymer nanofibers using electrospinning. NSF-REU Summer.
- [31] Abdolahi, A., Hamzah, E., Ibrahim, Z., & Hashim, S. (2012). Synthesis of uniform polyaniline nanofibers through interfacial polymerization. *Materials*, 5(8), 1487-1494.
- [32] Bajakova, J., Chaloupek, J., Lukáš, D., & Lacarin, M. (2011, September). Drawing—the production of individual nanofibers by experimental method. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Nanotechnology-Smart Materials (NANOCON'11)*. Bellingham, WA, USA: SPIE.
- [33] Kumar, P. (2012). Effect of collector on electrospinning to fabricate aligned nano fiber (Doctoral dissertation).
- [34] Zheng, X., Bian, T., Zhang, Y., Zhang, Y., & Li, Z. (2020). Construction of ion-imprinted nanofiber chitosan films using low-temperature thermal phase separation for selective and efficiency adsorption of Gd (III). *Cellulose*, 27, 455-467.
- [35] Beachley, V., & Wen, X. (2010). Polymer nanofibrous structures: Fabrication, biofunctionalization, and cell interactions. *Progress in polymer science*, 35(7), 868-892.
- [36] Stojanovska, E., Canbay, E., Pampal, E. S., Calisir, M. D., Agha, O., Polat, Y., ... & Kilic, A. (2016). A review on non-electro nanofibre spinning techniques. *RSC advances*, 6(87), 83783-83801.
- [37] Fang, J., Niu, H., Lin, T., & Wang, X. (2008). Applications of electrospun nanofibers. *Chinese science bulletin*, 53, 2265-2286.
- [38] Cao, J., Cheng, Z., Kang, L., Lin, M., & Han, L. (2020). Patterned nanofiber air filters with high optical transparency, robust mechanical strength, and effective PM 2.5 capture capability. *RSC advances*, 10(34), 20155-20161.
- [39] Toriello, M., Afsari, M., Shon, H. K., & Tijing, L. D. (2020). Progress on the fabrication and application of electrospun nanofiber composites. *Membranes*, 10(9), 204.
- [40] Veeramuthu, L., Venkatesan, M., Liang, F. C., Benas, J. S., Cho, C. J., Chen, C. W., ... & Kuo, C. C. (2020). Conjugated copolymers through electrospinning synthetic strategies and their versatile applications in sensing environmental toxicants, pH, temperature, and humidity. *Polymers*, 12(3), 587.

- [41] Wu, J., & Hong, Y. (2016). Enhancing cell infiltration of electrospun fibrous scaffolds in tissue regeneration. *Bioactive materials*, 1(1), 56-64.
- [42] Hutten, I. M. (2007). *Handbook of nonwoven filter media*. Elsevier.
- [43] Ji, J. H., Bae, G. N., Kang, S. H., & Hwang, J. (2003). Effect of particle loading on the collection performance of an electret cabin air filter for submicron aerosols. *Journal of aerosol science*, 34(11), 1493-1504.
- [44] Namekawa, K., Schreiber, M. T., Aoyagi, T., & Ebara, M. (2014). Fabrication of zeolite-polymer composite nanofibers for removal of uremic toxins from kidney failure patients. *Biomaterials Science*, 2(5), 674-679.
- [45] Glasscock, R. J., & Winearls, C. (2008). The global burden of chronic kidney disease: how valid are the estimates?. *Nephron Clinical Practice*, 110(1), c39-c47.
- [46] Chiu, W. Y., Chang, H. R., Lin, Z. Z., Halim, E., & Lian, J. D. (2007). Intradialytic dopamin therapy in maintenance hemodialysis patients with persistent hypotension. *Acta Nephrology*, 21, 22-29.
- [47] Dadsetan, M., Hefferan, T. E., Szatkowski, J. P., Mishra, P. K., Macura, S. I., Lu, L., & Yaszemski, M. J. (2008). Effect of hydrogel porosity on marrow stromal cell phenotypic expression. *Biomaterials*, 29(14), 2193-2202.
- [48] Bender, F. H., Bernardini, J., & Piraino, B. (2006). Prevention of infectious complications in peritoneal dialysis: best demonstrated practices. *Kidney International*, 70, S44-S54.
- [49] Carrion, A. F., & Martin, P. (2014). What are the management issues for hepatitis c in dialysis patients? *Seminars in Dialysis*, 27(5), 446-448.
- [50] Ateş, M., & Şensöz, O. D. Y. (2002). Mükemmel kalp-akciğer makinasına doğru. *Anadolu Kardiyoloji Dergisi*, 3, 253-258.
- [51] Bruijns, H.F., Hoeven, S.J., & Spronk, P.E. (2018). Mechanical ventilation in the ICU: understanding and improving ventilator-induced lung injury. *Netherlands Journal of Critical Care*, 26(3), 91-96.
- [52] Hsia, C.C., & Wong, Y.F. (2014). Respiratory protection provided by N95 filtering facepiece respirators against airborne dust and microorganisms in agricultural farms. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 11(5), 324-332.
- [53] Zohdi, M., Asghari, A., & Ebrahimzadeh, H. A review of nanofiber-based filters for air pollution control. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(3), 2466-2479.
- [54] McGrath, B. A., Brenner, M. J., Warrillow, S. J., Pandian, V., Arora, A., Cameron, T. S., ... & Feller-Kopman, D. J. (2020). Tracheostomy in the COVID-19 era: global and multidisciplinary guidance. *The Lancet Respiratory Medicine*, 8(7), 717-725.
- [55] American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. (2020). *ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols*.
- [56] Drabek, J., & Zatloukal, M. (2019). Meltblown technology for production of polymeric microfibers/nanofibers: A review. *Physics of Fluids*, 31(9).
- [57] Rahman, S. S. (2020). Fabric filtration and the importance of HVAC filter selection during the COVID-19 pandemic. *Building and Environment*, 179, 106880.
- [58] Shen, C. et al. (2019). Application of microfiltration and ultrafiltration in the food industry: a review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(6), 910-922.
- [59] Basak, A. et al. (2018). Syringe filters for effective sterilization and filtration. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 13(1), 89-104.
- [60] Branson, R. D., & Johannigman, J. A. (2010). In-line filtration during mechanical ventilation: pros and cons. *Respiratory care*, 55(9), 1202-1209.
- [61] Vézina, D.P., Trépanier, C.A., Lessard, M.R., Gourdeau, M., Tremblay, C. (2001). Anesthesia breathing circuits protected by the DAR Barrierbac S breathing filter have a low bacterial contamination rate. *Canadian Journal of Anesthesia*, 48(8), 748-54.
- [62] Alp, E., Bijl, D., Bleichrodt, R. P., Hansson, B., & Voss, A. (2006). Surgical smoke and infection control. *Journal of Hospital Infection*, 62(1), 1-5.
- [63] Ulmer, B. C. (2008). The hazards of surgical smoke. *AORN Journal*, 87(4), 721-738.
- [64] First, M. W. (1998). Hepa filters. *Journal of the American Biological Safety Association*, 3(1), 33-42.
- [65] Romay, F. J., Liu, B. Y. H., & Chae, S.-J. (1998). Experimental study of electrostatic capture mechanisms in commercial electret filters. *Aerosol Science and Technology*, 28(3), 224-234.
- [66] Lu, P., & Ding, B. (2008). Applications of electrospun fibers. *Recent patents on nanotechnology*, 2(3), 169-182.
- [67] Uludağ, H. (2014). Grand challenges in biomaterials. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2, 43.
- [68] Son, Y. J., Kim, W. J., & Yoo, H. S. (2014). Therapeutic applications of electrospun nanofibers for drug delivery systems. *Archives of pharmaceutical research*, 37, 69-78.
- [69] Yu, D. G., Li, J. J., Williams, G. R., & Zhao, M. (2018). Electrospun amorphous solid dispersions of poorly water-soluble drugs: A review. *Journal of controlled release*, 292, 91-110.
- [70] Fang, J., Niu, H., Lin, T., & Wang, X. (2008). Applications of electrospun nanofibers. *Chinese science bulletin*, 53, 2265-2286.
- [71] Place, E. S., George, J. H., Williams, C. K., & Stevens, M. M. (2009). Synthetic polymer scaffolds for tissue engineering. *Chemical society reviews*, 38(4), 1139-1151.
- [72] Sankar, S., Sharma, C. S., Rath, S. N., & Ramakrishna, S. (2017). Electrospun fibers for recruitment and differentiation of stem cells in regenerative medicine. *Biotechnology journal*, 12(12), 1700263.
- [73] Chaurey, V., Block, F., Su, Y. H., Chiang, P. C., Botchwey, E., Chou, C. F., & Swami, N. S. (2012). Nanofiber size-dependent sensitivity of fibroblast directionality to the methodology for scaffold alignment. *Acta biomaterialia*, 8(11), 3982-3990.
- [74] Chen, S., Liu, B., Carlson, M. A., Gombart, A. F., Reilly, D. A., & Xie, J. (2017). Recent advances in electrospun nanofibers for wound healing. *Nanomedicine*, 12(11), 1335-1352.
- [75] Zahedi, P., Rezaeian, I., Ranaei-Siadat, S. O., Jafari, S. H., & Supaphol, P. (2010). A review on wound dressings with an emphasis on electrospun nanofibrous polymeric bandages. *Polymers for Advanced Technologies*, 21(2), 77-95.
- [76] Kang, Y. O., Yoon, I. S., Lee, S. Y., Kim, D. D., Lee, S. J., Park, W. H., & Hudson, S. M. (2010). Chitosan-coated poly (vinyl alcohol) nanofibers for wound dressings. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The*

Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials, 92(2), 568-576.

[77] Paul, K. B., Singh, V., Vanjari, S. R. K., & Singh, S. G. (2017). One step biofunctionalized electrospun multiwalled carbon nanotubes embedded zinc oxide nanowire interface for highly sensitive detection of carcinoma antigen-125. *Biosensors and Bioelectronics*, 88, 144-152.

[78] Ali, M. A., Mondal, K., Jiao, Y., Oren, S., Xu, Z., Sharma, A., & Dong, L. (2016). Microfluidic immuno-biochip for detection of breast cancer biomarkers using hierarchical composite of porous graphene and titanium dioxide nanofibers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(32), 20570-20582.

[79] Prabhu, P. (2019). Nanofibers for medical diagnosis and therapy. *Handbook of Nanofibers*, 831–867.