

PAPER DETAILS

TITLE: DOKUSUZ YÜZEYLERİN BIYOMEDİKAL ALANDA KULLANIMLARI VE
KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

AUTHORS: Fatma Altintas, Ahmet Koluman

PAGES: 277-297

ORIGINAL PDF URL: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/3914488>

Derleme Makalesi / Review Article

DOKUSUZ YÜZEYLERİN BİYOMEDİKAL ALANDA KULLANIMLARI VE KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Fatma ALTINTAŞ^{1*} 

Ahmet KOLUMAN¹ 

¹Pamukkale Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Denizli, Türkiye

Gönderilme Tarihi / Received: 08.05.2024

Kabul Tarihi / Accepted: 08.11.2024

ÖZ: Teknolojik gelişmeler ve artan ihtiyaçlar, malzeme bilimi alanında önemli yeniliklere yol açmıştır. Tekstil endüstrisinin önemli bir alt dalı olan dokusuz yüzey malzemeler, biyomedikal alanda son yıllarda büyük ilgi gören ve geniş bir uygulama yelpazesine sahip önemli materyallerdir. Dokusuz yüzeyler, geleneksel dokuma veya örme teknikleri yerine lifleri doğrudan bir araya getirme veya bağlama yöntemleri ile üretilen, esnek, hafif ve ekonomik malzemelerdir. Bu malzemeler, üretim sürecindeki düzensiz lif yerleşimi ve çeşitli bağlama yöntemleri sayesinde düşük maliyetli, hafif, esnek ve hızlı üretilebilir olma avantajına sahiptir. Yüksek dayanıklılık, düşük ağırlık ve yüksek hava geçirgenliği gibi özellikleriyle dokusuz yüzeyler, yara örtüsü, ilaç iletimi, hijyen ürünleri ve biyolojik sinyal takibi gibi alanlarda etkili çözümler sunmaktadır. Dokusuz yüzey malzemelerin geniş kullanım alanları, fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin doğru bir şekilde karakterize edilmesini gerektirmektedir. Bu karakterizasyon, malzemenin performansını, kalitesini ve uygulama potansiyelini belirleme açısından kritik bir rol oynamaktadır. Dokusuz yüzeylerin karakterizasyon yöntemleri, malzemenin yapısını, mukavemetini, geçirgenliğini, emme kapasitesini ve diğer önemli özelliklerini değerlendirme sürecini içermektedir. Bu makalede, dokusuz yüzey malzemelerin biyomedikal alanlarına odaklanılarak, bu malzemelerin karakterizasyon yöntemlerine dair kapsamlı bir inceleme sunulmaktadır. Dokusuz yüzeylerin özelliklerini belirleme amacıyla kullanılan çeşitli karakterizasyon yöntemleri, literatürdeki güncel araştırmalara dayanarak detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dokusuz yüzeyler, biyomedikal uygulamalar, karakterizasyon

APPLICATIONS AND CHARACTERIZATION METHODS OF NONWOVENS IN BIOMEDICAL FIELD

ABSTRACT: Technological advancements and increasing demands have led to significant innovations in the field of materials science. Nonwoven materials, a crucial subfield of the textile industry, have garnered substantial interest and have a broad range of applications in the biomedical field in recent years. Nonwoven fabrics are produced through methods that bind or interlace fibers directly, rather than using traditional weaving or knitting techniques. These materials are characterized by their flexibility, light weight, and cost-effectiveness. Due to their production process involving irregular fiber arrangement and various bonding techniques, nonwoven materials offer advantages such as low cost, lightweight, flexibility, and rapid production. Their properties, including high durability, low weight, and high air permeability, make nonwoven materials effective solutions for applications such as wound dressings, drug delivery, hygiene products, and biological signal monitoring. The broad application scope of nonwoven materials necessitates precise characterization of their physical, mechanical, and chemical properties. This characterization is crucial for determining the performance, quality, and application potential of the materials. Characterization methods for nonwoven materials involve evaluating the structure, strength, permeability, absorption capacity, and other essential attributes of the material. This paper provides a comprehensive review of the characterization methods for nonwoven materials, focusing on their applications in the biomedical field. Various characterization techniques employed to determine the properties of nonwoven materials are discussed in detail, based on current research literature.

Keywords: Nonwovens, biomedical applications, characterization

***Sorumlu Yazarlar/Corresponding Authors:** faltintas18@posta.pau.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.7216/teksmuh.1480467> www.tekstilmuhendis.org.tr

1. GİRİŞ

Teknolojik gelişmeler ve ihtiyaçlar, malzeme bilimi alanında çeşitli inovasyonlara yol açmaktadır. Dokusuz yüzeyler, biyomedikal alanında son yıllarda büyük ilgi gören ve geniş bir uygulama yelpazesine sahip olan önemli materyallerdir. Bu malzeme, özellikle benzersiz özellikleri ve geniş kullanım alanları nedeniyle araştırma ve endüstri alanında artarak ilgi görmektedir. Dokusuz yüzey malzemelerin çeşitli özellikleri, onları diğer geleneksel tekstil malzemelerinden ayıran benzersiz özelliklerdir. Öncelikle, dokusuz yüzeylerin üretim süreci, liflerin düzensiz bir şekilde yerleştirilmesi ve çeşitli bağlama yöntemleriyle bir araya getirilmesini içerir. Bu, malzemenin düşük maliyetli, hafif, esnek ve hızlı üretilebilir olmasını sağlar. Ayrıca dokusuz yüzeyler, yüksek dayanıklılık, düşük ağırlık ve yüksek hava geçirgenliği gibi özelliklere sahiptir. Bu özellikler, dokusuz yüzey malzemeleri yara örtüsü, ilaç iletimi, hijyen ürünleri, biyolojik sinyal takibi gibi alanlarda etkili çözümler sunmaktadır [1-2]. Örneğin, nanoliflerin yara örtüsü olarak kullanılması, iyileşme sürecini hızlandırabilir ve enfeksiyon riskini azaltabilir. Benzer şekilde, dokusuz yüzeylerin antimikrobiyal özellikleri, hijyen ürünlerinde mikrobiyal kontaminasyonun önlenmesine katkı sağlar. Dokusuz yüzeylerin biyomedikal uygulamalardaki önemini anlamak için, bu materyallerin yapısal karakterizasyonu da kritik öneme sahiptir. Nanoteknoloji ve ileri karakterizasyon yöntemleri, bu materyallerin fiziksel, kimyasal ve biyolojik özelliklerini detaylı olarak incelemeyi mümkün kılmaktadır. Özellikle yüzey morfolojisi, mekanik dayanıklılık, biyolojik uyumluluk gibi özelliklerin belirlenmesi, dokusuz yüzeylerin belirli uygulamalarda ne kadar etkili olabileceğini ve performanslarının nasıl optimize edilebileceğini anlamamıza yardımcı olmaktadır [1]. Bu makalede, dokusuz yüzeylerin biyomedikal alandaki kullanım potansiyelini ve gelişmiş karakterizasyon yöntemlerinin bu materyallerin tasarımı ve uygulaması üzerindeki kritik rolünü ele almaktadır.

2. DOKUSUZ YÜZEY ÜRETİM TEKNOLOJİLERİ

Tıbbi uygulamalara yönelik dokusuz yüzey malzemeler hem kullanıcı gereksinimleri hem de malzeme özellikleri açısından çok sayıda avantaj sunar. Üstün enfeksiyon kontrolü, sterilite ve verimlilik seviyeleri nedeniyle hastaların ve tıbbi personelin güvenliğini artırmaktadır. Kısa süreli üretim döngüleri ve düşük üretim maliyetleri, dokusuz yüzeylerin tıbbi uygulamalardaki tercih edilme nedenlerinden bazılarıdır. Geçtiğimiz birkaç yıl boyunca, spunlaid, spunbond, meltblown, termal bağ ve benzeri üretim yöntemleri medikal uygulamalara yönelik dokusuz yüzeylerin oluşturulması için önemli teknolojiler haline gelmiştir [1].

2.1 Airlaid Dokusuz Yüzeyler

Airlaid kumaşlar, diğer geleneksel dokusuz yüzeylere kıyasla daha yüksek emilim ve daha hızlı sıvı transferi (edinim ve dağıtım) sağladığı ifade edilmektedir [2]. Airlaid ürünlerin ana

pazarları, performansı artırmak ve daha ince ürünler üretmeye olanak sağlamak için kadın hijyen ürünleri, sağlık bakımı ve yetişkin bezleri gibi ürünleri için emici çekirdek malzeme olarak kullanılır. Bu kullanım amacı, ürün performansını artırmak ve daha ince tasarımların üretilmesine olanak tanımak adına stratejik bir tercih olarak benimsenmektedir [3].

Airlaid ürünleri, sadece bebek bezleriyle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda alıştırma bezleri üretiminde de yeni bir kategori oluşturmuştur. Airlaid'in alıştırma bezlerinde kullanılması, bu teknolojinin kullanım alanlarını genişletmiş ve farklı ürün kategorilerine yönelik bir gelişimi tetiklemiştir. Bu bağlamda, airlaid'in alıştırma bezleri içindeki başarılı uygulaması, küçük boyutlu bebek bezleri ve bu ötesindeki ürünlerin geliştirilmesi adına atılan bir sonraki adımı simgeler. Hijyen segmentinde airlaid malzemesi, gözenek boyutunun kontrol edilebilmesine olanak tanır. Daha küçük boyutlardaki gözenekler, daha iyi dağılım, üstün tekrar ıslanma özellikleri ve çekirdek katmanları için daha iyi uygunluk sağlar. Öte yandan, daha büyük gözenek boyutları hızlı ve yüksek emilim sunsa da daha az dağılım sağlar ve bu nedenle edinim katmanları için önerilir. Bu özellikler, airlaid malzemenin hijyen ürünleri üretiminde esnek ve özelleştirilebilir bir çözüm olarak öne çıkmasını sağlamaktadır [4].

2.2 Spunlaid Dokusuz Yüzeyler

Spunlaid dokusuz yüzeyler genellikle düşük ve hatta çok düşük temel ağırlıklarda bile iyi bir birimlilik ve mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle hijyen ürünleri için ilk tercih olarak değerlendirilmektedir. Spunlaid dokusuz yüzeyler genellikle günümüzde mekanik apre işlemine tabi tutulur. Ancak, bu işlemin dezavantajları arasında genellikle hacim ve yumuşaklık eksikliği, erimiş bağlama noktalarında filamentlerin bozulması ve bağlama noktalarında film tabakası ve geçirimsiz alan kaybı gibi bilinen sorunlar bulunmaktadır. Bazı durumlarda, spunlaid örgülerini ahşap hamur katmanları ile birleştirmek, güçlü ve emici ıslak mendiller oluşturmak için tercih edilebilir. İki ve üç katmanlı ürün yapısı, çevrim içi makine konfigürasyonlarını kapsar.

Bu durumda yüksek mekanik özelliklerin yanı sıra hacim ve yumuşaklık elde etmek için tercih edilen bağlama işlemidir [3,5].

2.3 Spunbond (SB) ve Meltblown (MB) Dokusuz Yüzeyler

SB (spunbond) ve MB (meltblown) teknolojileri, hijyen uygulamalarında kullanılmak üzere tasarlanmış ve geliştirilmiş malzemeler olarak, var oldukları günden bu yana sürekli olarak belirli bir uygulama ile ilişkilendirilmişlerdir. Bebek bakımı, kadın hijyeni ve tıp alanındaki sürekli gelişmeler ve pazarın istikrarlı büyümesi sayesinde, SB ve MB kumaşların pazar payı sürekli olarak artmaktadır. Hijyen, SB ve MB teknolojileri için şu anda ve gelecekte en önemli pazardır. Spunbond işlemi, polimerlerin doğrudan sonsuz filamentlere dönüştürüldüğü ve stokastik olarak bir araya getirilerek dokunmamış bir malzeme

oluşturulduğu bir dokunmamış üretim tekniğidir [6]. Meltblown işlemi, doğrudan polimer çözeltisinden ince elyaflı ve küçük gözenek boyutlu dokusuz yüzeyler üretilmesi sağlamaktadır. Tülbent, ilave bağlayıcılara, aprele veya elyafların termal olarak bağlanmasına gerek kalmadan tamamen belirli bir polimerden oluşur. Tülbentin son özelliklerini etkilemek için polimerle birlikte çeşitli katkı maddeleri kullanılabilir [6,7]. Meltblown işlem ile üretilen dokusuz yüzeyin ortalama elyaf çapı 1 ile 5 µm arasındadır. Bu işlem kullanılarak nano veya alt mikron elyaflar üretilmektedir. Bu dokusuz yüzeyler tıbbi, hijyen, filtrasyon ve diğer uygulama alanlarında tercih edilmektedir. MB'lerin oldukça önemli kullanım alanları arasında hijyen ve bebek bezi, yetişkin ve kadın hijyenine yönelik emici pedler gibi hijyen uygulamaları bulunmaktadır. Ayrıca, tek kullanımlık önlük ve perde pazarında ve sterilizasyon ambalajı segmentinde de kullanılmaktadır [7]. SB (spunbond) kumaşların bebek bezleri ve emici pedler için örtü stoğundaki kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bu artışın temel nedeni, SB kumaşların sahip olduğu yapısal özelliklerdir. Bu özellikler, kullanıcının cildini kuru ve rahat tutma amacına hizmet etmektedir. Bikomponent spunbond kumaşlar, iç örtü stoğu olarak kullanıldığında, dokunmaya yumuşak ve cilde uygun pürüzsüz bir yüzeye sahiptirler [8]. Bu kumaşlar, hızlı bir şekilde dönüştürülebilirlik özelliğine sahiptirler. SB kumaşlar geniş bir şekilde hijyen pedlerinde ve sınırlı bir ölçüde tamponlarda kullanılmaktadır. Hijyen ürünleri pazarındaki en çok satan ürün, bebek bezi endüstrisinde kullanılan beyaz, 13 g/m² dokusuz yüzeylerdir. SB teknolojisi, çapraz yönde dayanıklılık, ayarlanabilir nefes alabilirlik, sıvı penetrasyonuna karşı direnç, tiftiksiz yapı, sterilizasyon ve bakterilere karşı geçirimsizlik gibi özellikleri sunarak, maliyet etkin bir çözüm sunmaktadır. Ayrıca, pazarın standart gereksinimleriyle uyumlu olması ve dönüştürme kolaylığı sağlamasıyla dikkat çekmektedir [9].

SB dokusuz yüzeyler, tekstil özellikleri ve nispeten yüksek aşınma direnci nedeniyle özellikle tercih edilen yara pansumanları için ana uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır. Bu kumaşlar, yüksek enine gerilim özellikleri ile donatılabilirlik için vücut hareket özgürlüğüne izin verme avantajına sahiptirler [10]. Spunbond ve meltblown dokusuz yüzeyler karşılaştırıldığında, spunbond dokusuz yüzeyler meltblown dokusuz yüzeylere göre daha kalın ve büyük çaplı liflere sahiptir. Spunbond ve meltblown teknolojileriyle üretilen liflerin çap aralıkları arasında belirgin farklar bulunmaktadır. Spunbond lifleri genellikle daha büyük olup, çapları ortalama olarak 15-35 µm arasında değişir. Bu, daha dayanıklı ve yapısal olarak stabil bir malzeme üretmelerini sağlar. Buna karşın, meltblown lifler çok daha ince olup, çapları genellikle 1-5 µm aralığında bulunur. Meltblown liflerin bu ince yapısı, onları özellikle filtrasyon uygulamaları için ideal hale getirir, çünkü daha yoğun ve daha küçük gözenekli bir yapı sunarlar [8,9,10]. Bu özellikleri, spunbond dokusuz yüzeyler daha düzgün ve stabil bir ağ yapısına sahip olmalarını sağlar. Bu yapı, dokusuz yüzeylerin dayanıklılığını artırır ve işleme esnasında daha az deformasyona yol açar. Mukavemet açısından, spunbond

dokusuz yüzeyler genellikle meltblown dokusuz yüzeylere göre daha yüksek bir dirence sahiptir. Bu özellikleri, spunbond dokusuz yüzeylerin daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmalarını sağlar. Filtreleme verimliliği konusunda ise meltblown dokusuz yüzeyler, daha ince ve daha yoğun lifleri sayesinde daha yüksek bir filtreleme etkinliği sağlar. Bu özellikleri, meltblown dokusuz yüzeylerin hava filtreleme ve cerrahi maskeler gibi uygulamalarda ideal hale getirir. Bariyer özellikleri açısından bakıldığında, meltblown dokusuz yüzeyler spunbond dokusuz yüzeylere göre daha iyi bir sıvı ve aerosol bariyeri sağlar. Bu özellikleri, meltblown dokusuz yüzeylerin cerrahi giysiler ve koruyucu ekipmanlar gibi alanlarda tercih edilmesini sağlar. [9,10].

2.4 Termal Bağlı Dokusuz Yüzeyler

Bu süreç, sıcak ve basınçlı metal rulolardan oluşan bir kalender makarası kullanılarak lif örgüye ısı ve basınç uygulamayı içermektedir. Dokusuz yüzeyler, genellikle ısınmış kabartmalı metal rulo ile düz yüzeyli bir metal rulo içeren bu yöntemle üretilir. Isıl bağlı dokusuz yüzeyler ve sıcak hava ile bağlı dokusuz yüzeyler, bebek bezleri, hijyenik pedler, ped pantolonlar, meme pedleri, ıslak mendiller ve cerrahi giysilerin üst tabakaları, alt tabakaları ve emici dağıtım tabakaları (ADL) üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Isıl bağlı dokusuz yüzeyler, tek kullanımlık hijyenik ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılır. Bu dokusuz yüzeyler, polipropilen lif (PP), rayon ve bikomponent PE/PP liflerinden yapılmıştır [11]. Örneğin, PP örtü stoğu, kuru yerleştirilmiş veya SB örgülerini kullanan kalender nokta bağlı ürünlerde bulunabilir, bu durum özellikle öncekiler bikomponent liflerini içeriyorsa geçerlidir. Diğer tek kullanımlık ürünler arasında, 25–150 g/m² ağırlık aralığında ürünler yapmak için havadan geçirilmiş kısa liflerden üretilen ıslak mendiller yer almaktadır ve yaklaşık 100–250 g/m² ağırlığındaki havadan geçirilmiş kartlı silme ürünleri de bulunmaktadır [11]. Kalender bağlama, bu örgülere SB, MB ve bileşenlerin birleştirilmesinde kullanılır; cerrahi önlükler ve perdeler gibi bir dizi tıbbi ve hijyenik uygulama bu işlemler gerçekleştirilmektedir [12].

2.5 Kimyasal Bağlı Dokusuz Yüzeyler

Kimyasal bağlı dokusuz yüzeylerin üretilmesi, kimyasalların tülbent üzerine uygulanması, püskürtme, emdirmeye, yüzeye sürme veya baskı gibi yöntemlere dayanır. Bu işlemler, kimyasalın su aracılığıyla yüzeye uygulanmasını ve kurutma süreciyle suyun uzaklaştırılmasını içerir. Akrilat polimerleri, stiren-bütadien kopolimerleri ve vinilasetat etilen kopolimerleri gibi kimyasallar, bu tür uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bileşiklerdir. Emici pedlerin birçoğu kimyasal olarak bağlanmıştır. Bu ürünler genellikle hava ile serilmiş ağlara dayanmaktadır ve yüksek emilim oranı, yüksek kapasite ve belirli bir yumuşaklık düzeyi sağlama ihtiyacını karşılamaktadır. Baskı-bağlı kumaşlar, daha yumuşak bir dokuya ve bağlı olmayan alanlardaki serbest liflerin güçlü etkisi nedeniyle daha esnek bir yapıya sahiptir. Bu tür malzemeler, tekstil benzeri dokunun avantaj sağladığı uygulamalarda kullanılmaktadır. Örnekler, tek kullanımlık/

koruyucu giysiler, örtü stoğu ve silme bezleri gibi ürünlerdir. Bu gelişmiş malzemeler, emici ürünlerin performansını artırarak kullanıcılara daha fazla konfor ve güven sunmaktadır. Dolayısıyla, tekstil endüstrisindeki ilerlemeler, özellikle tekstil benzeri avantajları sağlayan ürünlerin üretiminde önemli bir rol oynamaktadır [3,12-14].

2.6 Kompozitler

Çekici kompozitler, airlaid/spunlace kombinasyonu ile elde edilebilir. Örneğin, pulpın airlaid yöntemiyle spunlacing sırasında örgüye enjekte edilmesi, kırılmış rayon kullanılarak elde edilen absorbanlarla karşılaştırılabilir bir kumaşın daha düşük maliyetle üretilmesine olanak tanır. Pulp ve lif için tipik bir karışım oranı 50/50'dir. Airlaid pulpın spunlace hattına entegre edildiği bir uygulama örneği bebek ıslak mendilidir. Airlaid ve spunlace'in bir araya getirilmesi, kullanılan ham madde başına enerji tüketimini azaltır, malzeme kaybını azaltır, optimize edilmiş filtre sistemleri kullanımıyla su tüketimini azaltır ve spunlace ürünleri ile ilgili güvenilirlik ile minimum bakım gereksinimleri belirleyici faktörlerdir [3].

En popüler kombinasyon yapılarından biri spunbond–meltblown–spunbond (SMS) veya spunbond–meltblown– meltblown–spunbond (SMMS), spunbond–spunbond–meltblown–meltblown–spunbond (SSMMS) olarak adlandırılır ve ağırlıkları genellikle 10 ila 25 g/m² arasında 1–5 g/m² MB mikrofiber içerir. Bu yapıların üretimi ve özellikleri, MB örgülerinin hazırlanmasında bikomponent PP/polyethylene (PE) malzemelerinin kullanımı ile özellikle artırılmıştır. SMS yapısı genellikle mekanik bir bariyer olarak adlandırılır, çünkü MB mikroporöz bir yapıya sahiptir ve aynı zamanda nefes alabilir. 10 ila 70 g/m² ağırlığındaki SMS ürünleri en yüksek düzeyde korumaya sahiptir ve yumuşaklık ile konforu önemli ölçüde artırılmıştır [3,15].

SB kumaş veya SB ile ultra hafif MB kumaş kombinasyonu, bebek bezleri ve hijyenik ürünler için örtü stoğuna uygundur. Ticari SB hatları, bebek bezi üst tabakası için PP/PE bikomponent malzeme sağlamaktadır ve bez kullanımı için 1.0–1.2 aralığında olan ince denye PP SB'nin trendinin devam ettiği belirtilmektedir.

SB katmanları hem makine hem de çapraz yönde yüksek çekme dayanıklılığı sağlarken, MB mikrofiberler ise görsel homojenliği ve sıvı bariyer özelliklerini büyük ölçüde geliştirmektedir. SB teknolojilerine airlaid dokusuz yüzey işlemlerinin eklenmesiyle daha gelişmiş ürünler elde edilebilmektedir: emici tabakanın üst tabaka ile entegrasyonu; bebek bezi çekirdeğinin emici tabaka ile entegrasyonu veya tek katmanlı ya da SB + iki bileşenli teknoloji oluşturulması bunlara örnektir. Şu anda SB, SS, SSS, SMS ve SMMS gibi PP ve diğer sentetik polimerlerin yapısını işleyebilen hızı 500 m/dk'yi aşan hatlar da bulunmaktadır ve filament denyeri 0.7–10 aralığındadır. SMS'ten SSMMS'e kadar her şey üretilir. Bebek bezleri gibi hijyen ürünleri ile koruyucu maskeler ve bariyer katman oluşturan tıbbi ürünler ve genel

kullanım ürünleri üretmek ve uygulamak için kullanılabilir [16,17].

2.7 Elektrosinning

Elektrosprey ve eğirme tekniklerinin bir arada kullanılması, çok yönlü bir teknik olan elektrosinning (elektro + eğirme) adı verilen bir yöntemde kullanılmaktadır. Bu teknikte, elektrotlardan biri gibi davranan bir kalıbın ucundan çıkan eriyik veya çözelti olabilen bir sıvı damlacığına yüksek bir elektrik alanı uygulanır. Bu, damlacık deformasyonuna ve nihayetinde koninin ucundan karşıt elektroda doğru hızlanan yüklü bir jetin püskürtülmesine ve sürekli liflerin oluşmasına yol açar. Elektrosinning'in bu alana giderek artan bir ilgi görmesi, her yıl artan yayın ve inceleme makalelerinden de anlaşılmaktadır [18,19].

Elektrosinning tekniğinin önemli avantajları, birkaç nanometre mertebesinde, geniş yüzey alanına sahip, çok ince liflerin üretilmesi, çeşitli amaçlarla işlevselleştirilebilir kolaylığı, üstün mekanik özellikler ve işlem kolaylığı gibi birçok uzmanın vurguladığı noktalar. Prosesin basitliği ile birleşen büyük ölçekli üretim imkanı, bu tekniği birçok farklı uygulama için son derece çekici kılmaktadır [18]. Elektrosinning tekniğinin kullanıldığı diğer önemli uygulama alanları arasında biyomedikal alan, filtreleme ve koruyucu malzeme, elektriksel ve optik uygulamalar, sensörler, nanolif takviyeli kompozitler vb. bulunmaktadır. Bu alanlarda yapılan araştırmalar, elektrosinning'in geniş bir uygulama yelpazesine sahip olduğunu ve sürekli olarak gelişen bir araştırma alanı olduğunu göstermektedir [20].

2.8 Santrifüj Eğirme Tekniği

Dokusuz yüzey üretim yöntemlerinden biri olan santrifüj eğirme tekniği, cam elyaf üretimi uygulamalarında yaklaşık yarım yüzyıldır kullanılmaktadır. Bu yöntemde, eritilmiş cam, metalden yapılmış ve üzerinde binden fazla delik bulunan bir rotora beslenir. Camın ergimiş halde kalabilmesi için rotor sıcaklığı 900–1100 °C arasında sabitlenir. Rotor, 2000 ila 3000 dev/dak arasında değişen hızlarda çalıştırılır. Rotorun yüksek devri ile oluşan merkezkaç kuvveti, erimiş camı rotorun iç yüzeyine iter ve bu deliklerden dışarı çıkarır. Cam akışını inceltmek amacıyla yüksek hızda hava, gaz veya buhar kullanılır. Bu işlem sonucunda çapı 1 mikrometre ve altı, uzunlukları birkaç santimetre olan lifler elde edilir. Lifler şekillenirken üzerlerine bir yapıştırıcı malzeme spreyleir. Daha sonra, lifler, rotorun altındaki yönlendirici davlumbaz içerisinden geçerek bir konveyör bant üzerinde toplanır. Uzayan jetler, toplayıcı yüzeyde bir araya gelerek kumaş formunda birleştirilmiş olur [21].

Santrifüj eğirme tekniği, medikal alanda çeşitli uygulamalara sahiptir. Bu teknikte üretilen nanolifler, özellikle doku mühendisliği, yara iyileşmesi, ilaç salınımı ve filtreleme uygulamalarında kullanılmaktadır. Santrifüj eğirme, ince liflerin yüksek hızlarda üretilmesini sağladığı için, bu lifler hem hafif hem

de yüksek yüzey alanına sahiptir, bu da onları biyolojik uygulamalar için ideal kılmaktadır. Santrifüj eğirme tekniğiyle üretilen nanolifler, hücrelerin büyümesini ve farklılaşmasını desteklemek için uygun bir ortam sağlar. Bu lifler, yapısal destek sağlayarak doku mühendisliği uygulamalarında kullanılır. Yüksek yüzey alanı ve ince lif yapısı, santrifüj eğirme ile üretilen malzemelerin, yara iyileşmesini hızlandırmak için kullanılan biyo-materyaller de etkili olmasını sağlar. Bu lifler, yaraların kapatılmasında ve enfeksiyon riskini azaltmada önemli rol oynar. Bu teknikle üretilen nanolifler, ilaçların kontrollü bir şekilde salınması için taşıyıcı materyal olarak kullanılabilir. Santrifüj eğirme tekniğiyle üretilen lifler, ilaçların etkili bir şekilde hedef dokuya ulaşmasını sağlamak için tasarlanabilir. Santrifüj eğirme ile üretilen nanolifler, havanın ve sıvıların filtrelenebilmesi için etkili birer medya olarak kullanılmaktadır. Özellikle sterilizasyon ve mikrop filtreleme uygulamalarında tercih edilir [22].

2.9 Çözelti Üfleme Eğirme Tekniği

Çözelti üfleme eğirme tekniği, nanolif ve dokusuz yüzeyler elde etmek için etkili bir yöntemdir. Bu teknik, polimer çözeltisinin yüksek hızda bir akışkan ile püskürtülmesi yoluyla liflerin oluşturulmasını içerir. Bu yöntemde ilk olarak, istenilen polimer çözeltisi belirli bir viskoziteye ulaşacak şekilde hazırlanır. Genellikle, çözeltinin içeriği ve konsantrasyonu, elde edilecek liflerin özelliklerini etkiler. Hazırlanan polimer çözeltisi, bir nozül aracılığıyla yüksek hızda hava veya gaz ile püskürtülür. Bu, çözeltinin ince damlacıklar veya jetler halinde çıkmasını sağlar. Püskürtülen çözeltinin akışkan ile etkileşimi, liflerin oluşumunu tetikler. Lifler, akışkanın etkisiyle uzanarak ve soğuyarak katılaşır. Bu aşamada, liflerin çapı ve yapısı, püskürtme koşullarına ve çözeltinin özelliklerine bağlı olarak değişir. Oluşan nanolifler, bir toplayıcı yüzeyde bir araya gelir. Bu yüzey, liflerin belirli bir düzenle toplanmasını ve istenilen dokusuz yüzeyin oluşumunu sağlar [23].

Çözelti üfleme eğirme tekniği, medikal alanlarda çeşitli uygulamalara sahiptir. Bu yöntemle üretilen nanolifler, yara pansumanları, doku mühendisliği ve ilaç salınım sistemleri gibi alanlarda kullanılmaktadır. Liflerin yüksek yüzey alanı, antibakteriyel özellikler taşıyabilen ilaçların etkin bir şekilde salınmasını sağlar. Üretilen nanolifler, antibakteriyel veya antiviral ajanlarla işlenerek enfeksiyon riskini azaltmak için kullanılabilir. Bu, özellikle cerrahi giysiler ve koruyucu ekipmanlarda önemlidir. Ayrıca, bu teknikle elde edilen dokusuz yüzeyler, yüksek yüzey alanları ve gözenekli yapıları sayesinde yara pansumanlarında etkili bir malzeme olarak kullanılır. Bu yapılar, nemi ve ilaçları tutma kapasitesini artırarak yaraların hızlı iyileşmesi için uygun bir ortam sunmaktadırlar [23].

3. DOKUSUZ YÜZEYLERİN BİYOMEDİKAL ALANINDAKİ UYGULAMALARI

Enfeksiyon kontrolü, bariyer malzemeler, yara bakım ürünleri ve tıbbi cihazlar gibi alanlarda elde edilen başarılarla birlikte, tıp

endüstrisi ve araştırma inanılmaz bir hızda gelişmektedir. Tıbbi tekstil alanındaki en son yenilikler, doku mühendisliği ve nano uygulamalar gibi modern tekniklerin önemini doğrulamakta ve bunların gelişmiş yara bakım yapıları üzerindeki büyük etkisini vurgulamaktadır [21].

Hastalık bulaşının hastalara ve sağlık personeline karşı önlenmesi, sağlık profesyonellerini sürekli olarak yeni patojenlerle ve çoklu ilaca dirençli organizmalarla, ayrıca sağlıkla ilgili enfeksiyonları azaltma baskısıyla karşı karşıya bıraktığından daha büyük bir öneme sahiptir. Cerrahi bölge enfeksiyonu veya nozokomiyal enfeksiyon geliştirme, yani hastanede veya bir sağlık tesisinde edinilen enfeksiyonlar, halk sağlığında önemli bir sorun oluşturur. Bu enfeksiyonlar, sanayileşmiş ülkelerdeki ölüm nedenleri arasında ilk 10'da yer almaktadır.

Dokusuz yüzey malzemeler (NMs), tıp alanında yaygın olarak kullanılmakta ve kullanıcı gereksinimleri ile malzeme özellikleri açısından sundukları sayısız avantajla öne çıkmaktadır. Çoklu ilaca dirençli bakteri ve virüs varyantlarıyla birlikte, dokusuz yüzey malzemeler, tıbbi veya cerrahi ortamlarda çapraz bulaşma ve enfeksiyon yayılmasına karşı mücadelede yardımcı olabilmektedir. Tek kullanımlık olarak kullanıldıkları ve kullanım sonrasında yakıldıkları için işleme ihtiyaç duyulmaz ve kontaminantların yayılması en aza indirilir. Kısa üretim döngüleri, yüksek emilim, üstün geçirgenlik, yüksek esneklik, çok yönlülük ve düşük üretim maliyetleri, NMs'nin tıbbi uygulamalarda popüler olmasının nedenlerinden bazılarıdır [3,12].

3.1 Kontrol Amaçlı Kullanım

3.1.1 Cerrahi önlükler ve maskeler

Tek kullanımlık dokusuz cerrahi önlükler, muhtemel kontaminasyon kaynağı olan hava yoluyla çevreye kirlenici partikül salınımını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Gerekli kriterleri karşılayan yeniden kullanılabilir cerrahi önlük ihtiyacı, temiz oda ortamları için benimsenen kumaş teknolojisinin uygulanmasıyla sonuçlanmıştır. Tek kullanımlık dokusuz tıbbi örtüler ve önlükler, sağlık profesyonelleri için giderek ilk tercih haline gelmektedir çünkü bunların yeniden kullanılabilir tıbbi örtülerden daha sağlıklı olduklarına inanılmaktadırlar. Bu örtüler, enfeksiyondan korunacaklarına dair güvene sahiptirler. Cerrahi önlükler, 30-45 g/m² ağırlık aralığındaki dokusuz yüzeyler ve polietilen filmlerden oluşmaktadır [24].

Cerrahi örtüler ve önlükler için genel gereksinimler arasında sıvı geçirmezlik ve bakteri bariyer özellikleri, estetik (uyumluluk, dokunsal yumuşaklık, konfor), dayanıklılık, lif bağlama özellikleri (tüylenme eğilimi ve aşınma direnci), alev direnci, statik güvenlik ve toksisite bulunmaktadır. Cerrahi örtüler için sertlik çok kritiktir çünkü bariyer performansı, hastaya veya ekipmana uyumluluğun etkilenmesiyle etkilenebilir. Önlükler için konfor ve sertlik, terleme ve hareketi etkileyebilir. Dayanıklılık gereksinimleri arasında çekme, yırtılma, patlama ve delinme

direnci bulunmaktadır. Tüyenme istenmez çünkü önlük veya örtüden gelen partiküller, yara iyileşme sürecini karmaşık hale getirebilmektedir [25,26].

Tek kullanımlık cerrahi maskenin kullanıcının %98'ini bakterilere karşı koruması beklenir ve su geçirmez olmalıdır, bu nedenle SMS yapıları kullanılır. Bu, her iki tarafında akrilik bağlı paralel yerleştirilmiş veya ıslak yerleştirilmiş dokusuz yüzey içeren son derece ince bir orta katmana sahiptir. Lifin kalınlığı 1 ila yaklaşık 10 µm arasında değişir ve bu orta katmanın alan ağırlığı, üretim yöntemine, yapısına, lifin kesit şekline ve yüküne bağlı olarak 10 ila 100 g/m² arasında değişir. PP, polistiren, polikarbonat ve diğer polimer lifleri, ekstra ince cam lifleri için uygun alternatiflerdir. Yüzey filtre tabakası, 4 ila 8 µm çapında cam, polyester, PP veya Polikarbonat mikro liflerden oluşur. Cerrahi yüz maskesi filtreleri için MB kumaşları kullanılabilir [25,26].

3.1.2 Yüz maskeleri ve solunum cihazları

Yüz maskeleri ve solunum cihazları, yanma, kaynak, lazer uygulamaları, freze, öğütme ve boya proseslerinden kaynaklanan nanopartiküllerin solunum sistemine zarar vermesini önlemek amacıyla kullanılır. NIOSH tarafından onaylanan N, R ve P tipi yüz maskeleri, farklı boyutlardaki partiküllerin en az %95 oranında filtrelenmesini sağlar [27]. Yapılan bir çalışmada, 4-30 nm boyutlarındaki nanopartiküllerin yüz maskeleri tarafından filtrasyonunu test etmek için geliştirdikleri bir cihaz kullanarak N95 (havada asılı partiküllerin en az %95'ini filtreler) ve P100 (yağı itici ve havada asılı partiküllerin en az %99,97'sini filtreler) maskelerinin farklı modellerini monodispers gümüş aerosollerinin kullanılmasıyla test etmişlerdir. Aynı boyuttaki NaCl ve gümüş monodispers aerosoller arasında incelenen filtreleme performansları arasında anlamlı farklar gözlenmiştir. Sonuç olarak, NIOSH tarafından onaylanan hava saflaştırıcı N95 ve P100 yüz maskelerinin nanopartiküllere karşı etkinliğini gösterdiği tespit edilmiştir [28]. Yapılan diğer bir çalışmada, yarım yüz maskeleri ve N95 solunum cihazlarının performanslarını deneysel olarak bir manken üzerinde farklı hızlarda püskürttükleri polidispers ve monodispers aerosoller üzerinde test etmişler ve geçen partikülleri optik partikül sayacı ile tespit etmişlerdir. N95 solunum cihazlarının sıradan yüz maskelerinden daha yüksek bir filtrasyon verimliliğine sahip olduğu belirlenmiştir. N95 solunum cihazlarının ve cerrahi maskelerin filtrasyon verimliliği, parçacık boyutundaki artışla azalmıştır. N95 maskelerinin filtrasyon verimliliği, yüzey hızı arttıkça azalır. Bu çalışmada, partikül boyutu, basınç düşüşü ve akış hızı arasındaki ilişkileri belirlemişlerdir [29].

3.1.3 Hijyen ürünleri ve tamponlar

Hijyen ürünleri arasında en çok kullanılan ürün, ıslak mendil olarak kabul edilmektedir. Kişisel bakım alanında, mendiller neredeyse her şey için kullanılabilir. Temel bir silme ürünü için en belirgin gereksinimlerden biri hızlı emilimdir. Islak mendil kategorisindeki büyümeyi teşvik eden üç temel dokumasız

teknoloji bulunmaktadır. Bunlar, airlaid, spunlace ve spunbond/meltblown lamineleme teknolojileridir. Mendiller, 30-70 g/m² ağırlık aralığında olan dokulu kâğıt veya PP ile viskoz/rayon karışımından yapılan spunlace dokusuz yüzeyler üretilir. Ayrıca, bu mendiller antiseptik bir apre ile ıslatılabilir [12].

Modern tamponlar genellikle selülozik emici malzemeler içerir; bunlar genellikle rayon, pamuk veya bu liflerin karışımıdır. Bu durum dünya genelinde uzun yıllardır devam etmektedir. Avrupa dışındaki bazı ülkelerde, tamponların içeriğine farklı emici malzemeler dahil edilmiş olmasına rağmen, bu malzemeler zamanla kullanımdan kalkmıştır. Bununla birlikte, selüloz esaslı tamponlar her zaman piyasada varlıklarını sürdürmüştür. Genellikle, emici çekirdek ince, pürüzsüz bir dokusuz yüzey veya delikli film tabakasıyla kaplanır. Bu, lif kaybını azaltmaya yardımcı olur ve tamponun kolayca takılmasını ve çıkarılmasını sağlar. Tamponu çıkarmak için kullanılan çekme ipi genellikle pamuk veya diğer liflerden yapılmıştır ve istenirse renklendirilebilir. Yumuşak bir örtü tabakası olarak hafif karışık bileşenli dokusuz yüzey malzemeler tercih edilebilmektedir [30].

3.2 Dağılım ve Emilim Amaçlı Kullanım

3.2.1 Doku mühendisliği

Doku mühendisliğinde üretilen iskeleler, belirli bir doku veya organın işlevinin geri kazanılmasına, değiştirilmesine ve desteklenmesine katkı sağlamaktadır [31]. Nanolif iskeleler, doğal insan dokusunun şeklini taklit edebilen bir sistem olarak öne çıkar. Üretilen nanolifler, yüksek gözeneklilik, geniş yüzey alanı, ince çap ve düşük maliyet gibi avantajlar nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir [32]. Günümüzde nanolif iskelelerin çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır, örneğin cilt, kırık, kemik, bağlar, iskelet kası gibi dokuların yanı sıra yapay kan damarları, tıbbi implantlar vb. [33]. İskele üretiminde gözenek yapısının kontrol edilmesi önemlidir. Yüksek lif içeren nanolif iskeleler, rastgele dağılmış nanoliflere göre farklı mekanik özelliklere sahip olabilir ve hücre göçünü etkileyebilir. Kırık doku mühendisliği, tendon ve bağ dokusu mühendisliği, kardiyovasküler ve nöral doku mühendisliği gibi özgün dokuların yeniden oluşturulmasında nanolif iskelelerin yaygın olarak kullanıldığı alanlar bulunmaktadır [34].

3.2.2 İlaç iletimi

Nanolifler, ilaç dağıtımı konusunda kullanılabilecek özelliklere sahiptir. Örneğin, elektroegirme yöntemiyle üretilen nanolifler, yüksek gözeneklilik, ince çap ve geniş yüzey alanı gibi avantajlara sahiptir. Bu özellikler, elektroegirme nanoliflerinin, ilaç moleküllerinin daha etkili bir şekilde emilmesini ve hedef dokuda etkili bir dağılım sağlamasını mümkün kılar. Çeşitli ilaçların kullanımına uygun nanolifler, elektroegirme yöntemiyle üretilir [35]. İlaç iletimi için nanoliflerin potansiyeli, proteinler, asitler ve küçük organik ilaçlar gibi moleküller

kullanılarak değerlendirilmiştir [36]. Küçük organik ilaçlar, proteinler, asitler ve antikorlar, nanoliflerin içine entegre edilerek hedef bölgeye daha etkili bir şekilde ulaşabilir ve güvenilir sonuçlar elde edebilir [37]. Bu yöntem, basit üretim ve düşük maliyet açısından tercih edilen sistemler arasındadır. Oluşturulan nanoliflerin özellikleri, ilaç dağıtımı için optimize edilebilir. Nanolif üretiminde kullanılan polimerlerin seçimi, lif çapı, yapı, yüzey alanı ve gözeneklilik gibi faktörler, ilaç dağıtımının etkinliğini belirlemede etkili rol oynar. Dolayısıyla, nanolifler, ilaç dağıtımı alanında önemli bir potansiyele sahip olabilir ve daha etkili, güvenli ilaç dağıtım sistemlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir [38].

3.2.3 Süreç kontrolleri (hemostatikler)

Topikal hemostatik ajanlar, çeşitli işlevler için, özellikle kanamayı durdurmak, aktif dokuları bağlamak ve hemostatik tıkaçlar oluşturmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Kanamalar, bandajlar, hidrojel, tozlar, sıvılar, jeller, lifler ve dokusuz yüzey gibi farklı formlardaki hemostatik ajanlar tarafından kontrol edilebilir [39]. Toz, hidrojel ve sıvı tipi hemostatlar düzensiz yüzeyleri kaplar; ancak bu hemostatik ajanlar, yalnızca nispeten küçük kanamayı kontrol edebilir ve kanama şiddetli olduğunda etkisiz kalabilir. Şiddetli kanamalarda ise lif veya dokusuz hemostatlar basınçla kolayca uygulanabilir ve kanama yara yerinden kolaylıkla çıkarılabilir. Ayrıca, dokusuz pansumanlar, gaz geçirgenlikleri ve yüksek gözenekli mikro yapıları nedeniyle hemostaz için umut verici ajanlar olarak kabul edilmektedir [40].

3.2.4 Antimikrobiyaller

Dokusuz yüzey endüstrisi, mikroorganizmaların varlığı ve neden oldukları olumsuz etkilerle karşı karşıyadır. Mikrobiyal kontaminasyon, dokusuz yüzey malzemelerin bozulması, deformasyonu ve kötü kokulara neden olan dramatik etkilerin hepsi ortaya çıkar. Dokusuz yüzey malzemeler, çoğunlukla tıbbi açıdan önemli mikroorganizmalar için ideal ortamlar sunmalarından dolayı bir tür "liman" görevi görmektedirler. Dokusuz yüzey malzemeleri mikrobiyal kontaminasyona karşı dirençli hale getirme yeteneği, birçok uygulama ve pazar segmentinde avantaj sağlar. Bu özellikle dokusuz yüzey malzemelerin tarihsel olarak kullanılan dokuların ötesinde bir miktar aseptik sofistike katkısı sağladığı tıbbi alanlarda daha da belirgindir [41].

Hastane enfeksiyonlarıyla mücadelede önleme, mikroorganizmaların varlığı ve olumsuz etkileri nedeniyle önemli bir konsept olduğundan, bu enfeksiyonları en aza indirmek için antimikrobiyal işlevselliğe sahip polimerik malzemelere artan bir ihtiyaç bulunmaktadır. Bu bağlamda, araştırmalar, kuaterner amonyum tuzları [42], gümüş [43], N-halaminler [44], gibi organik ve/veya inorganik antimikrobiyaller kullanılarak biyosidal malzemelerin geliştirilmesine odaklanmıştır. Antimikrobiyal peptitler [45] ve kitosanın [46] sentetik taklitleri de dahil olmak üzere geniş bir mikroorganizma yelpazesine karşı kararlılık, yeniden şarj

edilebilirlik ve hızlı inaktivasyon özellikleri nedeniyle, N-halaminler üstün antimikrobiyal polimerik malzemelerin geliştirilmesinde kritik bir öneme sahiptir. N-halaminler, bakterilerin inaktivasyonunu oksidatif halojenin hücre zarına doğrudan transferi yoluyla gerçekleştirdiğinden, basitçe halojen stabilizatörleri olarak tanımlanır [47].

Liflerin antimikrobiyal tedavisi geniş bir şekilde araştırılmıştır. Abdou ve arkadaşları, yüzey-başlatmalı atom transferi radikal polimerizasyonu yöntemiyle polipropilenin (PP) yüzeylerine kuaterner amonyum tuzları ekleyerek, dinamik bir çalkalama şişesi testi kullanarak *Escherichia coli*' de yaklaşık beş log azalma elde etmiştir [48]. Başka bir çalışmada, antifungal ve antibakteriyel işlevsellik sağlamak amacıyla PP dokusuz yüzeyleri kitosan kaplanmış [49]. Gümüş, erimiş PP ile birleştirilerek kullanılmış ve üretilen PP/Ag kompoziti, 24 saat içinde *E. coli* ve *Staphylococcus aureus*' ta üç log azalma sağlamıştır [50].

3.3 Konfor, Takip ve Tedavi Amaçlı Kullanım

3.3.1 Yara örtüleri

Son yıllarda kullanılmaya başlanan yenilikçi bir malzeme olan dokusuz yüzeyler, özellikle yara örtüsü olarak benimsenmiştir. Bu malzemeler, yaraların iyileşme sürecini hızlandırabilir ve enfeksiyon riskini azaltabilir. Yara örtüleri genellikle yaranın dış ortamdan korunması, nemli bir ortam sağlanması ve iyileşmeyi kolaylaştırma amacıyla kullanılır. Oluşturulan dokusuz yüzeyler, nanometre ölçeğinde ince liflerden oluşur ve polimerik malzemelerden veya doğal kaynaklı malzemelerden üretilebilir. Üretilen dokusuz yüzeylerin özellikleri, boyutlarına ve kullanılan malzemeye bağlı olarak çeşitlilik gösterir [51].

Dokusuz yüzeylerin yara örtüsü olarak kullanılması, birçok avantaj sunmaktadır. İlk olarak, nanolifler yaranın iyileşme sürecini hızlandırabilir. Bu, üretilen dokusuz yüzeylerin yaraya yerleştirildiğinde, yaranın iyileşmesine yardımcı olan hücrelerin ve proteinlerin daha etkili bir şekilde hareket etmesini sağlayarak gerçekleşir. Ayrıca, bu yapılar yaradaki sıvıyı emebilir ve yara etrafındaki nem seviyesini optimize ederek nemli bir ortam oluşturabilir. Bu durum, yaranın sağlıklı bir şekilde iyileşmesi için gerekli koşulları sağlamaya yardımcı olur. Diğer bir avantaj, cilt yenilenmesini teşvik eden ve kontaminasyonu önleyen antimikrobiyal ilaçlar, büyüme faktörleri, vitaminler ve bileşiklerin nanoliflerle birleştirilebilmesidir. Bu tür kullanımlar, enfeksiyon riskini azaltarak yaranın korunmasına katkı sağlayabilir. Kang ve arkadaşlarının yaptığı bir çalışmada yara pansumanları oluşturmak amacı ile kitosan kaplı PVA yara örtüsü oluşturmuşlardır. Elektrospinning ile üretilen yapı fareda açık yara iyileşmesi üzerindeki etkisi incelendi. Sonuçlar değerlendirildiğinde, hızlı yara iyileşme süreci göstermiştir [52]. Yang ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada (2021), yara örtülerinde kullanılan hiyalüronik asit ve kitosan bazlı nanoliflerinden oluşturulan yara örtüsünün, açık yaralarda iyileşme üzerindeki

etkilerini araştırmıştır. Bu çalışma, hiyalüronik asidin cilt yenilenmesini teşvik ettiğini ve iyileşme sürecini hızlandırdığını ortaya koymuştur [53]. Dheen ve arkadaşları (2020), çinko oksit nanopartiküller içeren polimer bazlı yara örtülerinin yaralar üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu örtülerin, anti-inflamatuvar ve antibakteriyel özellikleri sayesinde yaraların iyileşme sürecini hızlandırdığı bulunmuştur. Özellikle, çinko oksit nanoparçacıkların cilt yenilenmesini teşvik ettiği belirtilmiştir [54]. Islam ve arkadaşları (2023) ise, titanyum dioksit nanoparçacıklarının kullanıldığı polimerik bir yara örtüsü geliştirilmiştir. Bu örtü, antibakteriyel özellikler taşıdığı gibi UV koruması da sağlamakta ve böylece yaranın dış etkenlerden korunmasına yardımcı olmaktadır. Çalışmada, bu tür örtülerin yaraların iyileşme sürecini olumlu yönde etkilediği bulunmuştur [55]. Rybka ve arkadaşlarının (2022) yaptığı çalışmada ise, gümüş nanoparçacıklar ile zenginleştirilmiş polimerik bir yara örtüsü geliştirilmiştir. Gümüşün antibakteriyel özellikleri sayesinde, yaraların enfeksiyon riskini önemli ölçüde azalttığı ve iyileşme sürecini hızlandırdığı gözlemlenmiştir. Araştırma, bu tür örtülerin yaraların bakteri enfeksiyonlarından korunmasında etkili olduğunu göstermektedir [56].

3.3.2 Kaplamalar ve tıbbi tekstiller

Tıbbi tekstillerin, vücut sıvıları gibi bulaşıcı vektörleri içeren maddelere karşı koruyucu olması ve aynı zamanda viral iticiliğe sahip olması önemlidir. Ancak, uzun vadeli mekanik dayanıklılık ve viral iticiliğin sağlanması zordur. Örnek olarak yapılan bir çalışmada, dokusuz polipropilen tekstiller üzerinde süperhemofobik ve virüs direncine sahip, basit, dayanıklı ve ölçeklenebilir bir kaplama gösterilmektedir. Bu işlem, polipropilen mikroliflere termal olarak sinterlenmiş politetrafloroetilen (PTFE) nanopartiküller içeren sağlam, düşük yüzey enerjili, çok katmanlı ve uzun ölçekli pürüzlü bir yüzey oluşturur. İşlenen tekstiller, fetal sığır serumu için $158,3 \pm 2,6^\circ$ ’lık bir statik temas açısı ve $4,7 \pm 1,7^\circ$ ’lık bir histerezis sergiler ve serum protein yapışmasını $\%89,7 \pm 7,3$ (0,99 log) oranında azaltır. İşlenmiş tekstiller, Cassie-Baxter ıslanma durumunu koruyarak sıvı temas eden yüzey alanını tahminen 350 kat ($2,54 \log$) azaltır. Ayrıca, işlenmiş tekstiller benzeri görülmemiş bir mekanik dayanıklılık sergiler ve sıvı, protein ve virüs geçirmezliklerini yoğun aşınma ve yıkama sonrasında korur. Çok katmanlı, uzun ölçekli pürüzlülük, mekanik dayanıklılığı kendi kendine benzerlik yoluyla sağlar ve numuneler, yaklaşık 255 kPa’lık bir geçiş basıncıyla yüksek basınç stabilitesine sahiptir. Bu özellikler, tıbbi önlük, önlük veya diğer hijyen tekstil uygulamaları için dayanıklı, itici kaplamaların potansiyelini vurgulamaktadır [57].

3.3.3 Biyolojik sinyal takibi

Dokusuz yüzey malzemeler, biyolojik sinyal takibi alanında önemli bir rol oynamaktadır. Bu malzemeler, hafif, esnek ve nefes alabilir özelliklere sahip olduklarından, vücutla temas ettiklerinde rahat bir uyum sağlar. Biyolojik sinyal takibi, genellikle medikal uygulamalarda, fitness izleme cihazlarında veya araştırma amaçlı

kullanılır. Dokusuz yüzey malzemeler, elektrotların entegrasyonu için uygun bir yüzey sağlar. Elektriksel sinyalleri algılamak için bu malzemeler genellikle giyilebilir elektrokardiyografi (EKG) cihazlarında ve elektromiyografi (EMG) uygulamalarında kullanılır. Bu sayede kalp atışları, kas aktivitesi ve diğer biyoelektrik sinyallerin izlenmesi mümkün olur. Ayrıca, dokusuz yüzey malzemeler biyo-sensörlerin entegrasyonu için de uygundur. Bu sensörler, vücut sıvılarından ölçümler yaparak glukoz seviyelerini izleme, pH düzeylerini takip etme veya diğer biyokimyasal parametreleri ölçme gibi görevleri yerine getirebilir. Bu özellikleriyle dokusuz yüzey malzemeler, kullanım kolaylığı, konfor ve güvenilirlik sağlayarak biyolojik sinyal takibi alanında önemli bir materyal haline gelmiştir [58].

4. DOKUSUZ YÜZEYLERİN KARAKTERİZASYON YÖNTEMLERİ

Dokusuz yüzey kumaşların performansının değerlendirilmesinde, gözenek özellikleri, kumaşların sıvı geçirgenliği, filtrasyonu ve mekanik özellikleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Dokusuz yüzey üretim tekniklerinden olan elektrospinning işlemi, tekstil endüstrisinde yaygın olarak kullanılan mikrometre altı boyutta ince, rastgele yönlendirilmiş liflerle kaplı bir membran üretme yöntemidir. Bu özel özellik, elektrospun lif ağı karakteristlik özelliklerini anlamak için çeşitli lif karakterizasyon tekniklerinin uygulanmasını gerektirir. Bu teknikler arasında lif çapı, lif oryantasyon dağılım fonksiyonu ve gözenek boyutu dağılımı gibi önemli özelliklerin belirlenmesi yer almaktadır. Xu, (1996) ‘nın yaptığı araştırmaya göre bu teknikleri kullanarak, farklı lif içeriğine ve birim alan başına farklı ağırlığa sahip dokusuz yüzeyleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, gözenek özelliklerinin değerlendirilmesinde ve dokusuz yüzeylerin performansının anlaşılmasında kullanışlı bir araç olabilecek yeni analitik yaklaşımları göstermektedir. Bu metin, elektrospinning işleminin temelini oluşturan bu karakterizasyon tekniklerine odaklanarak, bu yöntemle elde edilen lif ağların detaylı analizini sağlamayı amaçlamaktadır [59].

4.1 Mikroskopik Tabanlı Karakterizasyon Teknikleri

Nanomalzemelerin fiziksel karakterizasyonu, mikroskop tabanlı yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, nanomalzemenin yapısı hakkında kapsamlı bilgiler sağlamaktadır. Parçacık boyutu, boyut dağılımı, şekil, morfoloji ve yüzey alanı gibi tanımlayıcı parametreler, fiziksel karakterizasyon sürecinde detaylı bir şekilde incelenmektedir [60]. Fiziksel karakterizasyon, nanomalzemenin özelliklerini anlamak ve optimize etmek için önemli bir araçtır.

4.1.1 Elektron mikroskopları

Elektron mikroskopunun temel amacı, katı numunelerin görüntülenmesini sağlamaktır. İnce numune hazırlama teknikleri daha sonradan geliştirilmiştir [61]. Elektron mikroskobu (EM), nano boyutlu malzemelerin görselleştirilmesini ve karakterizasyonunu mümkün kılar. Bu yüksek çözünürlüklü

görüntüleme yeteneği, nanometre ölçeğinin altında bir elektron ışını kullanımının bir sonucudur. Elektron mikroskobunun çözünürlüğü, elektron ışınının dalga boyunun ışığından çok daha kısa olması nedeniyle artar. Örneğin, 100 kV ivme voltajına sahip bir elektron mikroskobu için dalga boyu değeri 0.0037 nm olacaktır. EM'de, tespit ve karakterizasyon için genellikle iki ana görüntüleme tekniği olan taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve iletim elektron mikroskobu (TEM) kullanılmaktadır [62].

Elektron mikroskobu, gelecekte daha hızlı ve çok boyutlu büyümeyi destekleyecek ve malzemelerin işlevlerini incelemek için temel bir cihaz olmaya devam edecektir. Yüksek uzaysal ve zamansal çözünürlük, bu teknolojinin ilgi çekici kalmasını sağlamaktadır. Gelişen elektron kaynakları, daha hızlı dedektörler ve özel spektrometreler gibi yenilikçi araçlar sayesinde elektron mikroskobu zamanla daha ileri bir seviyeye taşınacaktır. Bu tür ilerlemeler, bilim ve mühendislik alanlarında çeşitli gelişmeleri beraberinde getirecektir [63].

4.1.1.1 Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağıtıcı X-ışını Spektroskopisi (SEM-EDS)

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), ışık yerine elektronları kullanarak görüntü oluşturan bir mikroskop türüdür. Geleneksel ışık mikroskoplarına kıyasla, SEM kullanmanın birçok avantajı bulunmaktadır. SEM, geniş bir alan derinliğine sahiptir, bu da üç boyutlu gözlem imkânı tanır. Bu özellik, numunenin birkaç katmanının aynı anda odakta olmasına olanak tanır ve böylece bir görüntüde çok sayıda lifin ölçülmesine imkân verir. Ayrıca, SEM yüksek çözünürlüklü görüntüler üretmektedir, bu da yakın aralıklı özelliklerin yüksek büyütme ile incelenebileceği anlamına gelir [64]. Numunelerin hazırlanması nispeten kolaydır, çünkü çoğu taramalı elektron mikroskobu sadece numunenin elektriksel olarak iletken olmasını gerektirir, ki bu özellik nanolif örneği için geçerlidir. SEM, numune yüzeyini düşük enerjili bir elektron demeti ile yani 1-30 keV ile tarayarak saçılan elektronları tespit ettikten sonra görüntüsünü oluşturur ve bu teknikle 3 boyutlu görüntüler elde edilir [62]. Yüksek büyütme, geniş odak derinliği, yüksek çözünürlük ve numune hazırlığı kolaylığı gibi avantajların kombinasyonu, SEM'in nanolif ağ çalışmaları için en uygun seçenek haline gelmesini sağlar.

Numune yüzeyinde görüntüleme için kullanılan elektron etkileşimlerine ek olarak bir dizi fiziksel olay meydana gelir. Kimyasal bilgi elde etmek için bu etkileşimlerden yararlanmak mümkündür. Görüntüleme için ikincil elektronlar üretildiğinde, etkileşime giren atom iyonize olur ve temel duruma dönmek için bir dış kabuk elektronunu yakalamak zorundadır [65]. Enerjinin korunumu yasasına göre, daha sonra, meydana gelen kabuk geçişinin özelliği olan ve kuantum mekaniği kurallarıyla tanımlandığı gibi "kuantize" olan bir foton yayılır. Yayılan fotonun enerjisini ölçülür ve esasen her element için meydana gelen enerji geçişleri değerlendirilir. SEM numunelerin bileşim özelliklerini ve oryantasyonunu belirlemek için, EDX ile birlikte kullanılır. EDS numunelerdeki elementleri analiz etmek ve

tanımlamak için hayati bir yöntemdir [66]. EDS dedektörü, X-ışını elektromanyetik spektrumunda yayılan fotonların enerjisini ölçmek için kullanılmaktadır. Dedektör, yüksek kuantum verimliliği için süper iletken sıcaklığa soğutulan ve gelen ışının eksenini dışında bulunan katı halli bir çip veya kristaldir.

Tespit edilen X-ışınları, dedektörle etkileşimlerine bağlı olarak enerji kanallarına ayrılır ve tespit edilen enerjilerin bir spektrumunu oluşturur. Spektrum ile tepe enerjilerini belirlene-bilmekte ve hangi elektron geçişinin gerçekleştiğini ve dolayısıyla bunun hangi elemente karşılık geldiğini belirlenebilmektedir. Ayrıca bu verileri SEM görüntüleme tekniğiyle birleştirerek yüksek bireysel element konsantrasyonlarına sahip alanları üst üste koymak veya sunmak için verilerin X-ışını haritaları oluşturulabilmektedir [67].

4.1.1.2 Transmisyon Elektron Mikroskobu (TEM)

Transmisyon elektron mikroskobu (TEM), nanomalzeme karakterizasyonunda en sık kullanılan elektron mikroskoplarından biridir. TEM, malzemelerin atom boyutlarına kadar çeşitli ölçeklerde yapısal detaylar ve kimyasal bileşimler hakkında bilgi sağlayabilen önemli bir cihazdır [68].

TEM, elektron yayan bir kaynak, hızlandırıcı, yoğunlaştırıcı mercek sistemi, numune tutucu, büyütülmüş bir görüntü oluşturan objektif mercek, projektör sistemi ve iki boyutlu bir elektron detektöründen oluşur. Elektronlar, kaynaktan çıkarak örnek ve lenslerden geçer ve sonucunda floresan veya CCD ekran üzerinde görüntü oluşturulur. TEM'de genellikle kullanılan iki tür elektron tabancası vardır: FEG (Alan Emisyon Tabancası) ve LaB6 (Lantanyum Hekzaborit). TEM için numunenin çok ince bir kesite sahip olması gerekmektedir [69]. Numune hazırlığı işlemi, TEM'de zaman alıcı ve zahmetli olabilir. TEM, yüksek enerjili elektronlar kullanılarak gerçekleştirilen tüm kırınım, görüntüleme veya spektroskopi teknikleriyle nanolif karakterizasyonunda önemli bir araçtır.

Taramalı Elektron Mikroskobu'nun çalışma prensibi, numune yüzeyini taramak için oluşturulan ince odaklı bir elektron probundan kaynaklanır. Bu prob, numune yüzeyinde ikincil elektronlar ve geri saçılan elektronlar üretir. Bu elektronlar tespit edilir ve eşzamanlı olarak taranan bir katoda beslenen numune yüzeyinden gelen ışın tüpüne yoğunluk modülasyonlu bir sinyal olarak iletilir. Bu sinyal, Katot Işın Tüpü ekranında numune görüntüsünü oluşturur. İkincil elektronlar, düşük enerjili elektronlardır ve genellikle numune yüzeyinden yayılan elektronlardır. Geri saçılan elektronlar ise numune tarafından geri saçılan elektronlardır ve genellikle gelen elektronların enerjisiyle benzer bir enerji seviyesine sahiptir. Bu elektronlar, numune bileşimi ve numune topografyası hakkında bilgi içerir [70].

4.1.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), yüzey bilimi ve nanoteknolojide kritik bir araştırma aracı olarak kabul edilir. Bu mikroskop tekniği, katı yüzeylerin detaylı analizi için kullanılır ve

yüksek çözünürlük sağlayarak morfoloji ve yüzey özellikleri hakkında kapsamlı bilgiler sunar [60]. AFM, 1980'lerin ortalarında geliştirilmiş olup, keskin bir probu kullanarak yüzey özelliklerini nanometre ölçeğinde büyütme için tasarlanmıştır. Bu teknoloji, ince ve kalın film kaplamalar, seramikler, kompozitler, camlar, sentetik ve biyolojik membranlar, metaller, polimerler ve yarı iletkenler gibi çeşitli malzemelerin araştırılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır [71].

AFM' nin çalışma prensibi, çekici veya itici kuvvetleri ölçerek temellenir. Nano boyutlu bir uca sahip esnek bir konsol üzerine monte edilmiş bir prob kullanılır; bu prob, bir numunenin yüzeyini taramaktadır [72]. Taranan malzemenin yüzeyindeki atomlar ile tarama ucundakiler arasındaki kuvvet, ucu sapmaya iter. Sapmanın büyüklüğü, yüzey atomları ile uç atomları arasındaki ayrıma ve aralarındaki atomik kuvvetlere bağlıdır. Bu sapma, konsolun tepesine odaklanan ve fotodetektörlere yansıtılan bir lazer kullanılarak kaydedilebilir. Fotodetektör sinyalleri, numunelerin yüzey özelliklerini nano ölçeklere kadar inen çözünürlüklerle haritalamak için kullanılmaktadır. Piezoelektrik dönüştürücüler, ucun yanal ve dikey hareketlerini kontrol eder ve bir geri besleme döngüsü, hareketle orantılı voltaj farklılıkları üretir [73].

Teknik liflerin nanoyapılarının karakterizasyonu, performansları ve yapı-özellik ilişkisinin anlaşılmasında önemlidir. Bu bağlamda, AFM özellikle lif yüzeylerini ve arayüzlerini karakterize etmek için kullanılır. Teknik liflerin yüzey yapıları, üretim ayarları ile yüzey morfolojisi gelişimi arasındaki ilişkilerin anlaşılmasına bağlı olarak farklı teknolojik uygulamaların ihtiyaçlarını karşılayacak şekilde özelleştirilebilir [74]. Bu nedenle, AFM, tek tek liflerin ve lifli yapıların yüzeylerinin ve arayüzlerinin karakterizasyonu için önemli bir araç olarak kabul edilir.

4.2 X-Işını ile İlişkili Karakterizasyon Teknikleri

4.2.1 X-Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), kristal malzemeleri incelemek için kullanılan güçlü ve tahribatsız bir tekniktir. Bu teknik, yapılar, fazlar, tercih edilen kristal yönelimleri (doku), ortalama tane boyutu, kristallik, gerinim ve kristal kusurları gibi çeşitli yapısal parametreler hakkında bilgi sağlamaktadır. X-ışını kırınım zirveleri, numunedeki her bir kafes düzlemi setinden belirli açılarda saçılan monokromatik bir X-ışını ışınının yapıcı girişimiyle oluşur ve pik yoğunlukları, kafes içindeki atomların dağılımına bağlı olarak bilinmektedir. Dolayısıyla, X-ışını kırınım modeli, belirli bir malzemedeki periyodik atomik düzenlemelerin bir tür parmak izidir.

X-ışını kırınımı günümüzde kristal yapıların ve atomik aralıkların detaylı incelemesi için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknik, monokromatik X-ışınlarının ve bir kristal numunenin yapıcı girişimine dayanır. X-ışınları genellikle bir katot ışın tüpü tarafından üretilir, filtrelenir ve numuneye yönlendirilmek üzere

konsantre edilir [75]. Gelen ışınlar, Bragg yasasını karşıladığında, yapıcı girişim ve kırılan ışın üretir:

$$n\lambda = 2d\sin(\theta) \quad (1)$$

Burada, n bir tam sayıdır, λ X-ışınlarının dalga boyunu, d kırınımı oluşturan düzlemler arası aralığı ve θ kırınım açısını temsil eder.

Bragg yasası, elektromanyetik radyasyonun dalga boyunu, kristal bir numunedeki kırınım açısı ve kafes aralığını birbirine bağlayan bir ilkedir. Kırılan X-ışınları daha sonra tespit edilir, işlenir ve sayılır. Numunenin tüm olası kırınım yönlerine ulaşmak için numuneyi 2θ açısı aralığında tarayarak, toz halindeki malzemenin rastgele yönelimi göz önüne alınır. X-ışını difraktometreleri temel olarak üç ana bileşenden oluşur: bir X-ışını tüpü, bir numune tutucu ve bir X-ışını detektörü [76].

X-ışınları, bir katot ışın tüpünde üretilir. Burada, bir filament ısıtılarak elektronlar üretilir ve ardından bir voltaj uygulanarak hızlandırılır. Hedef materyalin elektron bombardımanına tutulmasıyla karakteristik X-ışını spektrumları oluşturulur. X-ışını difraktometresinin geometrisi, numunenin koşutlanmış X-ışını demeti yolunda belirli bir θ açısıyla dönmesini sağlar. X-ışını detektörü ise kırılan X-ışınlarını toplamak için bir kola monte edilir ve belirli bir açıda dönmektedir. Bu açıyı korumak ve numuneyi döndürmek için kullanılan araca gonyometre denir [77]. Tipik olarak, veriler toz desenleri için önceden ayarlanmış 5° ila 70° arasındaki 2θ açılarında X-ışını taramalarında toplanır. X-ışını toz kırınımı, bilinmeyen kristal malzemelerin (örneğin mineraller, inorganik bileşikler) tanımlanması için yaygın olarak kullanılır. Bilinmeyen katıların belirlenmesi jeoloji, çevre bilimi, malzeme bilimi, mühendislik ve biyoloji alanlarında yapılan çalışmalar için kritik öneme sahiptir. Diğer uygulamalar arasında kristal malzemelerin karakterizasyonu, optik olarak belirlenmesi zor olan ince taneli minerallerin tanımlanması, birim hücre boyutlarının belirlenmesi ve numune saflığının ölçülmesi yer almaktadır [78].

X-ışını kırınımı (XRD), özel teknikler kullanılarak kristal yapılarını belirleme, minerallerin modal miktarlarını (kantitatif analiz) tespit etme, ince film numunelerini karakterize etme ve çok kristalli bir numunede tanelerin yönelimi gibi dokusal ölçümler yapabilme yeteneğine sahiptir [79].

X-ışını toz kırınımının (XRPD) bazı avantajları ve sınırlamaları bulunmaktadır:

Avantajlar

- Bilinmeyen bir mineralin tanımlanması için güçlü ve hızlı (<20 dakika) bir yöntemdir.
- Çoğu durumda kesin mineral tespiti sağlar.
- Minimum numune hazırlama gerektirir.
- XRD ünitelerinin geniş kullanılabilirliğine sahiptir.
- Nispeten basit veri yorumlama süreçleri vardır.

Sınırlamalar

- Bilinmeyen bir maddenin tanımlanması için homojen ve tek fazlı malzeme en uygundur.
- İnorganik bileşiklerin standart bir referans dosyasına erişim gereklidir.
- Numune toz haline getirilmelidir, bu da genellikle gramın onda biri kadar malzemeyi içerir.
- Karışık malzemeler için tespit limiti numunenin yaklaşık %2' sidir.

X-ışını kırınımı, sıvılar, metaller, mineraller, polimerler, katalizörler, plastikler, farmasötikler, ince film kaplamalar, seramikler, güneş pilleri ve yarı iletkenler dahil olmak üzere çok çeşitli malzemeleri analiz etmek için kullanılan yüksek teknoloji ve tahribatsız bir tekniktir. Bu teknik, mikroelektronik, enerji üretimi, havacılık ve birçok endüstride sayısız pratik uygulama bulmaktadır. XRD analizi, belirli bir kristaldeki kusurların varlığını, strese karşı direnç seviyesini, dokusunu, boyutunu, kristallik derecesini ve numunenin temel yapısına ilişkin hemen hemen tüm diğer değişkenleri kolayca tespit edebilir [80].

4.2.2 X-Işını Kırınım Topografisi (XRT)

X ışını topografisi (XRT), kristallerin incelenmesinde önemli bir konuma sahip olan X ışını difüzyonu temelli bir yöntemdir. Özellikle fraksiyon fenomenleri ile ilişkilendirilir ve yarı iletken tek kristal büyütme üzerinde yapılan çalışmalar, kristal gelişimine önemli katkılar sağlamıştır. Bu çalışmaların çoğu başlangıçta silikon üzerine odaklanmıştır ve XRT, özellikle silikon üzerinde en etkili şekilde uygulanarak, kısa sürede mikroelektronik alanındaki temel malzemelerden biri haline gelmiştir [81].

XRT nin geliştirilmesi ve kristal büyütme teknolojisinin iyileştirilmesi, özellikle silikon temelli cihaz teknolojisinin ilerlemesiyle eş zamanlı olarak gerçekleşmiştir. Bu süreçte, XRT' nin başarıları ve kavramları, topolojisi, radyografi, faz-kontrast topografisi (introskopi), tomografi ve topotomografi gibi yeni tekniklerle silikon alanındaki teknolojik ilerlemelerle birlikte karşılıklı olarak zenginleşmiştir [75]. XRT, difüzyon mikroskobu olarak da bilinmektedir [82]. Zamanla, XRT' den ayrılan yeni yöntemler ortaya çıkmıştır. İlk olarak, X ışını interferometrisi gibi yöntemler geliştirilmiştir. Daha sonra, senkrotron radyasyonunun absorpsiyon keşfedilmiştir [83].

Bugün XRT, malzeme biliminde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır ve bu teknolojilerin gelişimi, mikro, opto ve akustik elektronik gibi çeşitli alanlarda bilimsel ve teknik ilerlemenin temel bir unsuru olmuştur. XRT, kristal yüzeylerinde veya kütle noktalarında farklı yoğunlukları görüntülemek için tasarlanmış olup, yoğunluktaki değişimleri birleştiren bir dizi yöntemi kullanır. Bu teknolojinin fiziksel temeli, X ışınlarının saçılmasının dinamik teorisine dayanmaktadır [84]. Görüntüler elde etmek için kullanılan yöntemler, dinamik ve kırınım görüntüsünün kinematik teorilerine dayanır. Bu teoriler, özellikle kusurlu

kristaller için X ışını saçılması teorisinin özel durumlarına uygulanır. Mekanizmanın karmaşıklığına rağmen, kusurların kırınım görüntüsünün oluşturulması oldukça açıklayıcıdır ve bu görüntüler, kusurlar hakkında nitel (ve nicel) bilgiler sağlar. Bugüne kadar, çeşitli kusur türlerinin kristallerdeki görüntüleri başarıyla hesaplanmıştır [85].

XRT tekniği, kristallerin içinden geçen X ışınlarının yönlerinde veya yoğunluklarında meydana gelen değişikliklere odaklanır [86]. X-ışını kırınım topografisi (XRT), tek kristalli malzemelerdeki yapısal kusurlar hakkında bilgi sağlayan bir X-ışını kırınım yöntemidir. Bu teknik, numunenin dış yüzeyi hakkında bilgi sunmaz; ancak düzlemler arası mesafelerde ve bu düzlemlerin dönüşlerindeki lokal değişiklikleri gösterir [87-89].

4.2.3 X-Işını Bilgisayarlı Tomografi (XCT)

X-ışını Bilgisayarlı Tomografi (XCT), gözenekli malzemelerin üç boyutlu karakterizasyonu için benzersiz ve tahribatsız bir görüntüleme tekniği sunan bir yöntemdir. Ancak, bu yaklaşımın kullanılan cihazların çözünürlüğü genellikle 1-3 mikrometre arasında olduğu için nanolif dokusuz yüzeylerin karakterizasyonunda sınırlamalara neden olmuştur. Bu nedenle, bu teknik genellikle daha büyük özellik boyutlarına sahip PET dokusuz yüzeylerle sınırlı kalmıştır [90]. Bu analizle ölçülen gözeneklilik ölçümlerindeki farklar, dokuma yapısının heterojenliğinden kaynaklanabilir; 3 boyutlu görüntüler, bazı bölgelerin yüksek lif yoğunluğuna ve diğer bölgelerin yüksek gözenekliliğe sahip olduğunu göstermektedir [91].

XCT için numunelerin küçük olması, görüntüleme sırasında numune hareketini en aza indirmek için kritik bir öneme sahiptir. Görüntüleme için kullanılan dokusuz yüzeylerin tipik boyutu yaklaşık 1 cm × 0,5 cm'dir [92]. Ancak, küçük bir görüntüleme alanı dokusuz yüzeyi tam olarak analiz edemeyebilir. Bu durum, eksik tanımlama ile sonuçlanabilir ve görüntünün net bir şekilde eşiklenmesine izin vermez, gözenekliliğin zayıf bir şekilde tahmin edilmesine neden olabilmektedir. Daha geniş bir alanın kullanılması gözenekliliğin belirlenmesinde daha kullanışlı olabilir, ancak bu durum daha az büyütme kullanılması nedeniyle çözünürlüğün azalması anlamına gelmektedir. Bu nedenle, XCT uygulamasında, istenen çözünürlük ile gerekli görüntüleme alanı arasında bir denge kurmak önemlidir [93].

Ayrıca, lifler arasındaki kontrastı artırarak ve görüntüleme sırasında gözenekleri daha net hale getirerek eşikleme iyileştirilebilir. Gözenekliliğin daha doğru tahmin edilmesine olanak tanıyan bu yöntem, potasyum iyodür gibi bir kontrast maddesi eklenerek veya osmiyum iyodür gibi daha yüksek çözünürlüklü tomografi teknikleri kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bu tartışmalar, X-ışını bilgisayarlı tomografinin dokusuz yüzeylerin gözenek yapısının kolay ve etkili bir şekilde değerlendirilmesinde potansiyel bir araç olarak kullanılabilirliğini göstermektedir [94].

4.3 Spektroskopi Tabanlı Karakterizasyon Teknikleri

4.3.1 Ultraviyole Görünür Işık (UV-VIS) Spektrofotometresi

UV-VIS spektroskopisi, molekül tarafından absorbe edilen UV bölgesi ışığı (200-400 nm) ile ilgili bir absorpsiyon spektroskopisi türüdür. Spektrofotometre çalışma düzeni ışık kaynağı, dalga boyu seçicisi, detektörler ve merceklerden oluşur. Mercekler, ışığı toplar, odaklar, yansıtır, iki ışın demetine ayırır ve belirli bir şiddette numune üzerine gönderirler. UV-VIS spektroskopisi, nanoparçacıkların boyutunu, konsantrasyonunu, toplanma derecesini değerlendirmek ve kararlılığını izlemek için kullanılır [95]. Aynı zamanda malzemede gerçekleşen elektronik geçişler hakkında bilgi sağlar. Yarı iletkenlerdeki kullanımında, değerlik bandı ile iletim bandı arasındaki elektronik geçişleri araştırdığı için optik bant boşluğunu tahmin etmek için uygun bir yöntemdir [96]. Lazer teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, spektrofotometrik ölçüm algılama sınırlarında iyileştirmeler sağlanmıştır. UV-VIS spektrofotometre büyük bir potansiyele sahiptir ve spektrofotometrik analizleri ultra hızlı bir şekilde gerçekleştirebilir. Gelecekte UV-VIS spektrofotometre, taşınabilirlik ve kullanım kolaylığı sağlama konusundaki gelişmelerini sürdürecektir. Işık kaynağındaki gelişmeler, spektrofotometrenin gelişimi dahil yeni uygulamalar için yenilikler getirecektir [97].

4.3.2 Raman Spektroskopisi

Raman spektroskopisi, bir titreşim spektroskopisi türü olarak geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Temel olarak, numuneye güçlü bir lazer ışını gönderilir ve numuneden saçılan ışınların ölçülmesi prensibine dayanır [98,99]. Saçılan ışığın dalga boyunun, gönderilen ışığın dalga boyuyla aynı olması durumunda, Rayleigh saçılması olarak adlandırılır. Eğer gönderilen ışığın bir kısmı numuneye geçiyorsa, bu Stokes Raman saçılması olarak bilinir ve saçılan ışığın enerjisi gönderilen ışıktan daha az olur. Tam tersi durumda, numunenin enerjisinin bir kısmı ışına aktarıldığında, bu durumda Anti-Stokes Raman saçılması meydana gelir ve saçılan ışığın enerjisi daha yüksek olur [100].

Raman spektroskopisinin üç temel bileşeni bulunmaktadır: ışık kaynağı, aydınlatma sistemi ve spektrometre. Bu teknik, genellikle lazeri ışık kaynağı olarak kullanır ve karbon bazlı nanomalzemelerin, grafen gibi, karakterizasyonu için standart bir yöntem olarak kabul edilir. Metal oksitleri, nanotüpler, nanobeltler ve nanorodlar gibi çeşitli nanomalzemelerin karakterizasyonunda da kullanılır [100].

Raman spektroskopisi, nanomalzemelerin niteliksel ve kantitatif özelliklerini karakterize etmek için güçlü ve hassas bir araçtır. Bu yöntemin avantajları arasında tahribatsızlık, düşük numune miktarı, yüksek uzaysal çözünürlük, geniş spektral kapsama, yüksek hassasiyet, düşük su girişimi ve dar spektral bantlar aralığı bulunmaktadır. Ancak, floresan girişimine eğilimli olması ve düşük sinyal-gürültü oranına sahip olması gibi bazı dezavantajları da vardır [101].

4.3.3 Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi (FTIR), organik, inorganik ve polimerik numunelerin analizinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir, bu teknik numunelerin kızılötesi ışıkla analiz edilmesini sağlar. Numunelerin absorpsiyon ve emisyon kızılötesi spektrumunun elde edilmesi temel bir spektroskopi yöntemidir ve malzeme bileşimindeki değişimleri belirlemek için kullanılır [102,103]. FTIR spektroskopisinin asıl amacı, numunelerin farklı dalga boylarındaki ışığı ne ölçüde absorbe ettiğini ölçmektir [104]. Numune peletlerinin şeffaflıkları nedeniyle potasyum bromür (KBr) tuzları ile hazırlanır, böylece spektrumun daha iyi çözünürlüğü sağlanır. Biyoaktif bitki özlerinin yapılarının aydınlatılması, FTIR' ın en yaygın kullanım alanlarından biridir.

FTIR spektroskopisi, numunelerin element ve molekül dağılımı hakkında detaylı bilgi sağlar. Kaynaktan gelen radyasyon, interferometreden sonra numuneden geçerek dedektör tarafından algılanır ve dijital bir sinyale dönüştürülerek bilgisayara aktarılır. Bilgisayar ile yapılan Fourier dönüşümü, spektral verilerin analizinde önemli bir rol oynar [102]. FTIR spektrometresi, geniş aralıkta eşzamanlı olarak spektral verileri toplar ve bu, dağıtıcı spektrometrelere göre önemli bir avantaj sağlar. Ayrıca, FTIR, toplam yansıma Fourier dönüşümü kızılötesi (ATR-FTIR) spektroskopisi gibi örnek tekniklerle birlikte kullanılarak daha hızlı ve maliyet-etkin analizler yapılmasını sağlar. ATR-FTIR, örnek moleküllerin moleküler bağ titreşimlerini kaydetmek için kızılötesi ışık kullanan bir örnek ısınlama yöntemidir ve gelecekte klinik tanı aracı olarak daha geniş bir şekilde kullanılması beklenmektedir [103].

4.3.4 Enerji Dağılımlı X-ışını (EDX)

Enerji Dağıtıcı X-ışını (EDX) mikroanalizi, element analizi teknikleri arasında, numunelerdeki elementlerin varlığını belirleyen karakteristik X ışınlarının üretilmesine dayanan ve genellikle elektron mikroskoplarıyla ilişkilendirilen bir yöntemdir [105]. Biyomedikal araştırmacılar ve klinisyenler, farklı biyomedikal alanlarda EDX mikroanalizini yaygın bir şekilde kullanmaktadır [106].

EDX mikroanalizinin spektrumu, yarı niteliksel ve yarı niceliksel bilgileri içermektedir. Bu teknik, özellikle ilaç dağıtım çalışmalarında (çoğunlukla bazı kemoterapötik ajanların terapötik performansını artırmak amacıyla kullanılan nanopartikülleri tespit etmek için) ilaç araştırmalarında önemli bir araç olarak değerlendirilmektedir [107].

Ayrıca, EDX mikroanalizi, çevre kirliliği araştırmalarında ve dokularda biriken biyolojik minerallerin karakterizasyonunda da etkili bir şekilde kullanılmaktadır. EDX, doku, hücre veya başka bir örnek üzerinde element tayinini gerektiren bir dizi çalışmada değerli bir araç olarak kabul edilebilir. Bu bağlamda, EDX mikroanalizi, geniş bir uygulama yelpazesi ve bilimsel keşifler için önemli bir kaynak olarak öne çıkmaktadır [108].

Wei ve diğer araştırmacıların çalışmasında, fonksiyonelleştirilmiş dokusuz yüzeylerin yüzey karakterizasyonu ve özellikleri incelenmiştir. PP dokusuz yüzeylerin Cu, ZnO ve PTFE püskürtmeli kaplamalarla işlevselleştirilmesi, EDX analizleriyle doğrulanmıştır. Yapılan çalışmada, EDX spektrumları, PP dokusuz yüzeylerin Cu, ZnO ve PTFE püskürtmeli kaplamalarından önce ve sonrası gösterilmektedir. Dokusuz malzemenin yüzeyi püskürtme kaplamadan önce ağırlıklı olarak C'den oluştuğu gözlemlenmiştir. Malzemedeki hidrojen (H) bileşimi, EDX analizinde tespit edilemeyecek kadar hafiftir. Spektrumda, Cu püskürtme kaplamadan sonra dokusuz yüzey üzerinde önemli miktarda Cu görülebilir, ancak Cu kaplama tarafından yüzeyin kaplandığını gösteren EDX spektrumunda C miktarı azalır. Ayrıca, ZnO kaplama 60 dakika boyunca gerçekleştirilirken Zn ve O bileşenlerinin önemli artışı göstermiştir. PTFE kaplama aynı zamanda malzemenin yüzeyindeki C ve F bileşenlerini gösteren EDX spektrumu ile doğrulanmıştır [109].

4.4 Diğer Karakterizasyon Teknikleri

4.4.1 Optik Karakterizasyon Teknikleri

4.4.1.1 Konfokal Lazer Tarama Mikroskopisi (CLSM)

Konfokal Lazer Taramalı Mikroskopisi (CLSM), ilk olarak 1980'lerde floresan etiketli biyolojik numunelerin görüntülenmesinde kullanılmıştır [110]. Geleneksel mikroskopinin sınırlamalarını aşarak, net görüntüler elde etmekte zorlanılan numunelerin keskin görüntülerini üretmek için güçlü bir teknik olarak belirlenmiştir.

CLSM'nin temel prensibi, lazer taramalı konfokal mikroskoptan gelen uyarma ışığının numuneye yönlendirilmesine dayanmaktadır. Işık demeti bir tarama sisteminden geçer ve numune üzerinde bir noktaya odaklanır. Numuneden yayılan floresan ışık her yöne dağılır, ancak detektöre ulaştığında bir filtre, odak dışı ışığı bastırır ve istenen odak içi ışıkları algılar. Bu teknik, biyolojik örneklerin incelemesinde kuantum optiği, nanokristal görüntüleme ve spektroskopisi gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadır [111].

CLSM, biyofilmleri tahribatsız bir şekilde görüntülemenin yanı sıra biyofilmlerin hücre ve matris dağılımlarının uzamsal bilgilerini kolayca elde etmenin avantajlarına sahiptir [112]. Bu tekniğin başlıca avantajları arasında numune için ön hazırlık gerektirmemesi, ıslak ortamlarda görüntüleme yapabilme yeteneği, hızlı görüntü elde etme kapasitesi, yüksek kontrast sağlama özelliği ve kullanım kolaylığı bulunmaktadır. Ancak, mikro ölçekte sınırlı bir çözünürlüğe sahip olması da dikkate alınmalıdır. Hamada ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, sulu ve çözücü mürekkeplerin mikro ölçekteki dağılımı, dokusuz yüzeylerin biriktirme homojenliğini değerlendirmek amacıyla konfokal lazer taramalı mikroskop (CLSM) kullanılarak karakterize edilmiştir. CLSM, sulu ve çözücü mürekkepler arasındaki mikro ölçekli dağılımlar arasındaki açık farkları elde etmek için de kullanılmıştır. Ayrıca, bu çalışmada dokusuz yüzeylere mürekkep emilim oranları, ortak bir absorpsiyon test

yöntemi kullanılarak karakterize edilmiştir. Emilim oranları, Darcy yasası ve Laplace denklemi kullanılarak basınç ile tahmin edilmiştir. CLSM, mikro ölçekte mürekkeplerin dokusuz yüzeyler üzerindeki dağılımını araştırmak için kullanılmıştır. Sonuç olarak, sulu ve çözücü mürekkepler arasında farklı substratlar için oranlarda ve pigment birikiminde belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir [113].

4.4.2 Termodinamik Karakterizasyon Teknikleri

Termal Analiz, lif karakterizasyonu için etkili bir yöntem olabilir. Bu yöntem, bir numunenin özgül ısısındaki değişiklikleri veya sıcaklıkla birlikte entalpideki değişiklikleri tespit etme esasına dayanır. Numuneye termal enerji sağlandıkça, entalpisi artar ve belirli bir enerji girişi için numunenin özgül ısısı tarafından belirlenen bir miktarla sıcaklığı yükselir. Bir malzemenin özgül ısısı, belirli bir fiziksel durumda sıcaklıkla yavaşça değişir, ancak bir durum değişikliğinde süresiz olarak değişir. Numune sıcaklığını artırmanın yanı sıra, termal enerji kaynağı numunede fiziksel veya kimyasal süreçlere neden olabilir. Bu entalpi değişiklikleri, termal analiz aracılığıyla tespit edilebilir ve numunede meydana gelen süreçlerle ilişkilendirilebilir. Termal analiz, ısıtma eğrilerinin ölçümü, dinamik adyabatik kalorimetri, diferansiyel termal analiz (DTA), diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC), termogravimetri (TG), termal mekanik analiz (TMA), dinamik mekanik termal analiz (DMTA) gibi çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilebilir [114].

4.4.2.1 Termogravimetrik Analiz (TGA)

Nanolif karakterizasyonunda sıkça kullanılan bir teknik olan termogravimetrik analiz (TGA), malzeme örneklerinin termal stabilitesini değerlendirmek için güçlü bir araçtır. TGA, malzemenin kütesinin zaman veya sıcaklıkla değişimini inceleyen bir yöntem olarak öne çıkar [115]. TGA, numunenin sıcaklığı arttıkça kütle değişimlerini ölçer ve bu değişimleri genellikle 2000°C'ye kadar olan sıcaklık aralığında ve 1g'dan daha az olan nanolif örnekleriyle gerçekleştirir [116].

TGA, izotermal ve tarama modları olmak üzere iki farklı modda kullanılır. İzotermal mod, kütle değişimini zamanla kaydederken, tarama modunda kütle değişimi sıcaklıkla ilişkili olarak kaydedilir [117]. TGA sistemleri genellikle radyant ısıtma odası, sıcaklık kontrolörü, hassas terazi, gaz besleme sistemi ve veri analizörü içerir. Terazi, sıcaklık kontrolörünün üzerine yerleştirilmiş ve ısıdan termal olarak izole edilmiştir. Numune kabı, terazi üzerinde asılıdır ve genellikle hava, helyum ve argon gibi gazların varlığında sıcaklık altında kütle değişimini ölçer. TGA analizi, nanolif örneklerinin kütesindeki değişimleri belirleyerek termal davranışlarını karakterize etmek için önemli bir araştırma aracı sağlar [118].

4.4.2.2 Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (Differential Scanning Calorimetry, DSC), bir malzeme karakterizasyon tekniği olup, bir

numunenin ısıtılması, soğutulması veya sabit sıcaklıkta tutulması sırasında emilen veya salınan enerji miktarını ölçer. DSC aynı zamanda hassas sıcaklık ölçümleri gerçekleştirir [119]. Numune ve referans, DSC 'de bir termal olay sırasında belirlenen sıcaklıkta tutulur. Numune ile referans arasındaki sıcaklık farkını sıfırda tutmak için numuneye verilmesi veya numuneden çekilmesi gereken enerji miktarı, termal analiz eğrisinin ordinatını oluşturan deneysel bir parametreyi ifade eder. DSC 'nin ölçüm prensibi, numunenin ısı akış oranını, aynı zamanda ısıtılan veya soğutulan inert bir malzeme ile karşılaştırarak belirler [120].

Kim ve Lee, Poli (etilen tereftalat)'tan elektrospun lifleri başarıyla üretmişlerdir, aynı zamanda Poli(etilen naftalat) ve Poli(etilen tereftalat)/Poli(etilen naftalat) karışımı da elde etmişlerdir. Diferansiyel taramalı kalorimetre ve termogravi-metrik analizör, özellikle elektrospinning işlemi sırasında polimerlerin termal özelliklerinin anlaşılmasına katkıda bulunmuştur. Tüm polyesterler, amorf fazın camısı geçişi, kristal-leşme ve kristal fazın erimesinden kaynaklanan ekzotermik ve endotermik nedeniyle özgül ısılarında bir azalma göstermiştir [121].

Elektrospinning genellikle kristallığın artmasına yol açar ve bu nedenle PET ve PEN'in camısı geçiş ve kristalleşme sıcaklıklarında değişikliklere sebep olur. PET/PEN karışımlarındaki termal değişiklikler ise reaksiyonlar nedeniyle ortaya çıkar ve bu durum, moleküler ağırlıkta bir azalmaya ve sonuç olarak termal bozulmaya neden olabilir.

4.5 Fiziksel Testler

Dokusuz yüzey malzemeler, çeşitli endüstrilerdeki çok yönlü uygulamaları nedeniyle önemli bir rol oynamaktadır. Dokusuz yüzeylerin fiziksel özelliklerinin karakterize edilmesi, malzemenin belirli amaçlar için uygunluğunu sağlamak açısından esastır. Fiziksel testler, dokusuz yüzey kumaşların yapısal, mekanik ve termal özellikleri hakkında değerli bilgiler sunar ve bu özellikleri çeşitli alanlarda etkili bir şekilde kullanmalarına katkıda bulunur.

4.5.1 Mekanik Özellikler

Mekanik testler, dokusuz yüzey malzemelerin dayanıklılığını, esnekliğini ve dayanıklılığını değerlendirmek için hayati öneme sahiptir. Çekme dayanımı, yırtılma direnci ve patlama dayanımı testleri, dokusuz yüzeylerin uygulanan kuvvetlere nasıl yanıt verdiği hakkında değerli veriler sağlar. Bu mekanik özellikler, malzemenin stres altında olabileceği yerlerde, örneğin jeotekstillerde, tıbbi tekstillerde veya otomotiv bileşenlerinde önemli bir rol oynar [122].

4.5.1.1 Çekme Dayanımı Testi

Dokusuz yüzey malzemenin mukavemetini ölçer. Bir çekme test cihazı kullanılarak malzeme belirli bir hızda çekilir ve bu esnada oluşan gerilme miktarı kaydedilir [122]. Test basamakları şu şekildedir;

- İncelemeye alınacak malzemenin standart örnekleri belirlenir ve hazırlanır. Numuneler, genellikle belirli bir geometrik şekle ve boyuta sahip olacak şekilde kesilir ve düzenlenir. Hazırlanan numune, test cihazına monte edilir. Bu adımda, numunenin test makinesinin çenelerine düzgün bir şekilde yerleştirilmesi sağlanır.
- Numune, test makinesinin çenelerine sıkı bir şekilde bağlanır ve gerekli ayarlamalar yapılır. Numunenin düzgün bir şekilde tutunması ve testin doğru bir şekilde gerçekleştirilmesi için önlemler alınır. Numunenin başlangıç uzunluğu ölçülür. Bu, test sırasında malzemenin çekme miktarını belirlemek için referans bir değer olarak kullanılır.
- Test makinesi, belirli bir hızda yük uygular ve numuneyi çeker. Yük, belirli bir hızda artırılır ve numunenin çekme dayanımı bu süreçte kaydedilir. Test sırasında, test makinesi tarafından uygulanan kuvvet ve numunenin uzaması sürekli olarak ölçülür. Bu, çekme dayanımının belirlenmesinde temel bilgileri sağlar.
- Numune, belirli bir kuvvet altında veya belirli bir deformasyona ulaştığında test otomatik olarak durdurulur.

Bu an, malzemenin kırılma noktası olarak kaydedilir. Test sonuçları analiz edilir ve çekme dayanımı, kırılma noktası, elastik modül gibi önemli mekanik özellikler belirlenir. Elde edilen veriler, genellikle standart bir rapor formatında sunulur. Elde edilen verilere göre çekme mukavemeti ve uzama yüzdesi hesaplanır.

4.5.1.2 Yırtılma Direnci Testi

Malzemenin yırtılma dayanımını belirler. Yırtılma direnci testi, bir çekme test cihazı veya yırtılma direnci test cihazı kullanılarak yapılır [122]. Test basamakları şu şekildedir;

- Yırtılma direnci test cihazına monte edilmiş numune kullanılır. Cihaz, numunenin bir hızda yırtılmasını sağlar.
- Yırtılma sırasında oluşan kuvvet kaydedilir ve bu değer yırtılma direnci olarak raporlanır.

4.5.2 Gözeneklilik ve Geçirgenlik

Dokusuz yüzeyler genellikle gözenekli olacak şekilde tasarlandığından, gözeneklilik ve geçirgenlikle ilgili değerlendirmeler, filtrasyon, tıbbi tekstiller veya hijyen ürünleri gibi uygulamalarda önemli rol oynar. Hava ve su geçirgenliği testleri, sıvıların veya gazların malzemenin ne kadar kolay geçebileceğine dair içgörüler sağlar ve bu da malzemenin belirli son kullanımlardaki performansını etkiler.

4.5.2.1 Hava Geçirgenliği Ölçümü

Hava geçirgenliği ölçümü, bir malzemenin hava geçirgenliğini ölçmek için kullanılan bir standart testtir. Bu test genellikle kâğıt, karton ve dokusuz yüzey malzemelerin gözenek yapısını

değerlendirmek için uygulanır [123]. Test basamakları şu şekildedir;

- Test edilecek malzeme belirli bir standart boyutta kesilir ve hazırlanır. Numune, testi yapacak cihazın özelliklerine uygun şekilde düzgün bir şekilde monte edilir.
- Gurley Densitometre cihazı belirli bir standartta ayarlanır. Ayarlamalar, numunenin boyutları, test basıncı ve test süresi gibi faktörlere göre yapılır.
- Hazırlanan numune, test cihazına yerleştirilir ve cihazın alt ve üst kısımları arasına yerleştirilir. Numune, hava geçirgenliğini ölçmek amacıyla test cihazının içine konumlandırılır.
- Belirli bir standart test basıncı uygulanır. Basınç, numune üzerindeki hava geçirgenliğini değerlendirmek için kullanılır. Belirli bir süre boyunca (genellikle saniye cinsinden), numune üzerindeki basınç uygulanmaya devam eder. Bu süre, malzemenin hava geçirgenliği üzerindeki etkilerini değerlendirmek için belirlenir.
- Test süresi sona erdikten sonra, numunenin hava geçirgenliği ölçülür. Elde edilen veriler, Gurley Testi' nin sonuçlarını temsil eder ve genellikle saniye cinsinden ifade edilir.

Yapılan bir çalışmada, Polipropilen (PP) dokusuz yüzey ve Termoplastik poliüretan (TPU) dokusuz yüzey oluşturulmuştur. Oluşturulan nanoliflerin etkisini değerlendirmek için karşılaştırmalı bir yöntem kullanılmıştır. İlk etapta, 40 g/m² PP dokusuz kumaş kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve değerler kaydedilmiştir. Daha sonra, belirlenen parametrelerde sistem çalıştırılarak dokusuz kumaş yüzeyi kaplanmış ve bu numune cihaza bağlanarak deneyler tekrar edilmiştir. Sonuç olarak, kaplanmış kumaşın hava geçirgenlik değeri, kaplanmamış kumaşa göre yaklaşık %70 oranında azalmıştır. Bu bulgular, sistemin filtrasyon uygulamalarında kullanılmaya uygun olduğunu gösteren önemli deneysel verilerdir [124].

4.5.3 Çekme Özellikleri

Emme yeteneğinin kritik olduğu uygulamalarda, örneğin hijyen ürünlerinde veya tıbbi pansumanlarda olduğu gibi, sıvı emme ve su çekme yetenekleri ile ilgili testler esastır. Bu testler, malzemenin sıvıları etkili bir şekilde nasıl emebildiğini ve dağıtabildiğini belirler, bu da malzemenin gerçek dünya senaryolarında performansını etkiler [125].

4.5.3.1 Sıvı Çekme Kapasitesi Testi

Malzemenin belirli bir sıvıyı emme yeteneğini ölçer. Ölçülen sıvı miktarı, malzemenin emme kapasitesini gösterir [125]. Test basamakları şu şekildedir;

- İncelemeye alınacak malzemenin standart örnekleri hazırlanmalıdır. Örnekler genellikle belirli bir boyut ve şekilde kesilir, ölçülür ve tartılır. Malzeme, önceki deneylerden veya üretim aşamasından kaynaklanan nemin etkilerini önlemek için

belirli bir süre boyunca önceden belirlenmiş bir sıcaklıkta kurutulmalıdır.

- Sıvı emme kapasitesi genellikle belirli bir test sıvısı kullanılarak ölçülür. Bu sıvı genellikle su veya belirli bir kimyasal özellik taşıyan bir çözelti olabilir. Hazırlanan numune, belirlenen test sıvısına batırılır. Bu adım, malzemenin sıvıyı emme sürecini simgeler. Numune, belirli bir süre boyunca test sıvısı içinde bekletilir. Bu süre, genellikle malzemenin doygunluğa ulaşabilmesi için yeterli bir zamanı içerir. Belirli bir süre sonra numune, fazla sıvıyı aktaracak şekilde çıkarılır. Bu adım, doygun malzemenin ağırlığını belirlemek için kullanılır.
- Malzeme, test öncesi ve sonrası ağırlığı ölçülerek sıvı emme kapasitesi hesaplanır. Bu, başlangıç ağırlığından son ağırlığı çıkararak yapılır. Elde edilen veriler belirli bir formül veya hesaplama kullanılarak sıvı emme kapasitesini ifade eden bir birimle ifade edilir. Sonuçlar, standartlara uygun bir şekilde kaydedilir.

4.5.4 Haslık Testleri

4.5.4.1 Işık haslığı testi

Tekstil ürünlerinin kullanımı sırasında güneş ışığına maruz kalan boyalı malzemeler, üretimin tüm aşamalarında veya kullanım sırasında zamanla solacak veya renk değiştirecektir. Tekstil malzemesinin renginin ışık haslığına ışık haslığı denir. Işık direnci testi gün ışığında çok uzun sürdüğü için güneşten solma efekti veren cihazlarla yapılmaktadır. Su soğutmalı veya hava soğutmalı olmak üzere iki tip ekipmanla yapılabilen bir test standardına dayanmaktadır.

4,5 x 1 cm boyutlarında ve kare ağırlığı yaklaşık 200 g/m² olan test numuneleri hazırlanır. Işık hızı mavi ölçekte derecelendirilmiştir. Kumaş numunesi ve mavi skala eş zamanlı olarak ışığın önünde tutularak değerlendirilir. Mavi skala, 8 yün için yapılmış ve dayanıklılıklarına göre sınıflandırılmış standart renklerden oluşur. Işık direnci sayısal olarak derecelendirilir ve 8 standart renk için uygun 1-8 derecelendirme noktasından oluşur. "1" en düşük, "8" ise en yüksek ışık direnci anlamına gelir [126].

4.5.4.2 Sürtme haslığı testi

Standartlara uygun olarak gerçekleştirilen bu testin amacı, tekstil ürünlerinin aşınmaya karşı renk haslığı ve diğer malzemelere renk geçişine karşı direncini tespit etmektir. Sürtünme direnci, bir kumaşın sürtünme yoluyla temas ettiği başka bir kumaşa rengini aktarmaya gösterdiği dirençtir. Test iki yöntem kullanılarak yapılır. İlk yöntem rengin ıslak bir kumaştan başka bir kumaşa sürtülerek aktarılmasıdır. Diğer bir yöntem ise, kuru bir kumaşın kurduğunda başka bir kumaşa sürtülerek renk aktarılmasıdır. Bu test için Sürtme Cihazı (Crockmeter) kullanılmaktadır.

Bu testte pamuklu çubuk (gevşek, ağartılmış, cilalanmamış, boyanmamış olmalıdır), gri tonlama, su geçirmez zımpara kâğıdı,

kasık ölçüsü, test edilecek kumaş parçaları ve damıtılmış su kullanılır. 14x5 cm ölçülerinde kuru kumaş, 4 numune, 2 swab ve 2 ıslak swab hazırlanır. Numunelerin uzun kenarına paralel olan kısımlar çözgü yönüne paralel olmalıdır. Test numuneleri testten en az 4 saat önce işleme tabi tutulur (normal atmosferik koşullar altında %65±2 bağıl nemde ve 20oC±2 sıcaklıkta tutulur).

Test numunesi, kumaşın uzun kenarı cihazın hareket yönünde olacak şekilde cihazın alt kısmına yerleştirilir ve kelepçelerle sabitlenir. Sürtünme aletinin kolu 10 saniyede 10 ileri ve 10 geri hareket ettirilerek saniyede bir devir yapılmaktadır. Bu hareket yaklaşık 10 cm uzunluğunda bir çizgi boyunca yüzeye 9 newtonluk bir kuvvet uygulayarak gerçekleşir.

Test edilen numuneler cihazdan alınarak en az 4 saat normal atmosfer koşullarında (oda sıcaklığında) bekletilir. Cihazdan çıkarılan aşındırıcı bezin arkasına üç kat beyaz aşındırıcı bez yerleştirilerek renk değişimi gri skala üzerinden değerlendirilir [126].

4.5.4.3 Ütülemeye karşı renk haslığı testi

Boyalı ve baskılı tekstillerin demir mukavemeti, renklerin üretim sırasında ütülenmeye veya yuvarlanmaya karşı dayanıklılığını belirlemek için ölçülür. Tekstil malzemesinin kuru, ıslak ve ıslak koşulları için ayrı ayrı testler yapılır. Uygulanabilir test, tekstil malzemesinin kullanım amacına göre belirlenir. Bu testler TS 472 EN ISO 105-X11 standartlarına dayanmaktadır.

Testte kullanılan renkli kumaş numunesi ve beyaz pamuklu kulüp kumaşı 10x4 cm ebatlarında yapılmıştır. Test numuneleri testten önce normal atmosferik koşullar altında (bağıl nem % 65 ± 2 ve sıcaklık 20 ± 2 °C) işlenir. Basınç cihazının alt tabakası ısıya dayanıklı bir tabaka, yün flanel dolgulu ve pamuklu kumaş (boyasız, ağartılmış, ağırlık 100-130 g/m2, pürüzsüz yüzey) ile kaplanmıştır.

Presleme sıcaklığı, kumaşı oluşturan elyafın türüne göre değişir. Kumaşın farklı elyafların karışımından oluşması durumunda bu, ısı direnci en düşük olan elyafa göre belirlenir. En sık kullanılan presleme sıcaklıkları şunlardır:

- 110±2 °C
- 150±2 °C
- 200±2 °C

Gerekirse farklı sıcaklıklar kullanılabilir ancak bu durum testte belirtilmelidir. Her üç yöntemle de test edilen numune kumaşın renk değişimi Dayanıklılık testinden hemen sonra veya Normal atmosfer koşullarında 4 saat bekledikten sonra (işleme) olmak üzere iki farklı şekilde değerlendirilir [126].

4.5.4.4 Su haslığı testi

Boyalı veya baskılı tekstil ürününün normal ortam sıcaklığında belirli miktardaki suya karşı dayanıklılığıdır. Bu, bitişikteki

boyanmamış ürüne boya transferi (boya moleküllerinin elyaftaki boya konsantrasyonunun yüksek olduğu bölgelerden düşük olduğu bölgelere aktarılması) ile belirlenir. Test edilecek numunenin saf su (standartlara uygun) muamelesi sonucu renginde bir değişiklik olup olmadığını ve kullanılan refakat kumaşına renk verip vermediğinin tespiti.

Çok lifli refakat bezi kullanılacak ise; Test numunesinden 40 mm x 100 mm boyutlarında deney numunesi kesilir ve kullanım yüzeyi aynı boyutlardaki çok lifli (multifibre) refakat kumaşının üzerine yerleştirilerek kısa kenarından biri boyunca refakat bezi ile birlikte dikilir. Hazırlanan birleşik, her bir deney numunesi oda sıcaklığında, içinde standartlara uygun saf su bulunan bir kap içine daldırılarak 30 dakika boyunca tamamen ısıtılır. Her bir test numunesinin ayrı kaplarda ıslanması sağlanır. Fazla suyu uzaklaştırmak için birleşik deney numunesini bir cam veya akrilik plaka üzerine düzgün bir şekilde yerleştirdikten sonra bir baget yardımı ile fazla su uzaklaştırılır. Başka bir cam veya akrilik plaka numune üzerine konur. Bu şekilde hazırlanmış numuneler arasına bir plaka yerleştirilerek toplam 10 adet test numunesi bir arada test edilebilir. İşlem sonrası renk skalası değerlendirilir [127].

4.5.4.5 Yıkama haslığı testi

Bu testteki amaç, boyalı ve baskılı tekstil ürünlerinin, ürünün cinsine ve kullanım amacına bağlı olarak farklı koşullardaki yıkama etkilerine karşı dayanıklılığının kontrol edilmesidir.

Çok lifli refakat bezi kullanılacak ise; test numunesinden 40 mm x 100 mm boyutlarında deney numunesi kesilir ve kullanım yüzeyi aynı boyutlardaki çok lifli (multifibre) refakat kumaşının üzerine yerleştirilerek kısa kenarından biri boyunca refakat bezi ile dikilir. Tek lifli refakat bezi kullanılacak ise; test numunesinin cinsine uygun olarak 40 mm x100 mm boyutlarındaki tek lifli iki adet refakat bezi arasına 40 mm x 100 mm boyutlarındaki deney numunesi yerleştirilir ve kısa kenarlarından biri boyunca dikilir. Hazırlanan kumaşlar yıkama makinesine konulur. İşlem sonrası renk skalası değerlendirilir [127].

4.6 Materyaller İçin Biyolojik Uyum Testleri

4.6.1 In vitro Sitotoksite Testleri

In vitro sitotoksite testleri, yeni bir materyalin biyoyoumluğunu değerlendirmede ilk tercih edilen yöntemlerdendir. Bu testlerde, materyalin hücre kültürlerinde hücre büyüme oranı ve hücre morfoloji üzerindeki etkisi, kontrol grupları ile karşılaştırılarak incelenir [128]. Organizmanın dışında gerçekleştirilen bu testler, test tüpleri, hücre kültür kapları ve çeşitli taşıyıcı kaplarda yapılabilir. Testlerde memeli hücreleri, dokular, organeller, bakteriler veya bazı enzimler biyolojik sistem olarak kullanılır. Materyal veya materyal özütü, biyolojik sistemle temas edecek şekilde test kabına yerleştirilir. Temas, direkt veya indirekt olabilir. Direkt temasta biyolojik sistem materyalle doğrudan temas ederken, indirekt temasta aradaki etkileşim agar,

filtre membranları veya dentin gibi bariyerlerle sağlanır. Bu testler, malzemelerin vücuda yerleştirildiğinde oluşturacağı biyolojik reaksiyonları simüle eder [129]. Hayvan deneylerine geçmeden önce yapılan bu laboratuvar testleri, zaman ve maliyet açısından avantaj sağlar. Ancak, in vitro biyoyuymululuk testleri, in vivo sistemlerden bağımsız değerlendirildiği için bazı zorluklar ve standardizasyon sorunları yaşanabilir. Teknolojinin hızla gelişmesi, standartların sürekli güncellenmesini gerektirir. İyi bir korelasyon sağlayan çalışmalar, in vitro testlerin materyal seçiminde etkili olduğunu göstermiştir. Bu testlerin avantajları arasında spesifik hücre fonksiyonlarının değerlendirilmesi, çok sayıda örneğin ekonomik olarak test edilmesi, kantitatif sonuçlar elde edilmesi, test yöntemlerinin standardize edilebilmesi ve toksik maddelerin hayvan deneylerine geçmeden önce tespit edilmesi sayılabilir [130]. Ancak, her test için tek tür hücre kullanılması, kültür hücrelerinin konak hücrelerinden farklı olması ve in vitro ortamın organizmadaki kompleks sistemlere sahip olmaması gibi dezavantajlar da mevcuttur. Bu nedenle, test sonuçlarının in vivo şartlarla uyumluluğu tartışılmalı olabilir. Tüm sitotoksik testlerinin steril, toksik olmayan ve tekrarlanabilir olması önemlidir [131].

4.6.2 Enzimatik Aktivite ve Biyosentez Testleri

DNA ve protein sentezi ölçümleri, biyosentez testlerinin yaygın örnekleridir. Bu analizlerde, hücre kültür ortamına radyoizotoplu bir işaretleyici eklenir ve DNA veya proteinle birleşip birleşmediği değerlendirilir. Sitotoksikite değerlendirmesinde yaygın kullanılan enzimatik testlerden biri de MTT testidir. MTT boyası, tetrazolium halkasının süksinat dehidrogenaz enzimi tarafından parçalanması sonucu soluk sarıdan koyu mavi-mor renkteki formazan ürününe dönüşür. Bu dönüşüm, canlı ve mitokondri fonksiyonu bozulmamış hücrelerin mor renkte boyanmasını, ölü veya fonksiyonu bozulmuş hücrelerin ise boyanmamasını sağlar [132]. Optik yoğunluk ölçümleriyle formazan oluşumu saptanabilir veya mikroskopik yöntemlerle de belirlenebilir. Hücre ölümünü belirlemede, hücre zarı bütünlüğü ve sitoplazmik enzim aktivitesinin ölçümü önemli bir parametredir. Laktat dehidrogenaz (LDH), hücre zarı hasar gördüğünde kültür süpernatantına salınan sabit bir sitoplazmik enzimdir ve NAD⁺'nın indirgenmesi reaksiyonlarında rol oynar. LDH aktivitesi kolorimetrik yöntemlerle değerlendirilebilir [131-133].

4.6.3 Hücre Yoğunluğu ve Büyüme Analizleri

Sitotoksikite, malzeme ile temas sonrası hücre sayısı ve büyümesi ölçülerek belirlenir. Hücreler önce kültür kaplarına ekilir ve yapışmaları sağlanır, ardından test malzemesi eklenir. Malzeme sitotoksik değilse, hücreler kültür kabında yapışık kalır ve çoğalır. Ancak toksik malzeme kullanıldığında, hücreler çoğalmaz, sitopatik değişiklikler gösterir veya kültür kabından ayrılır. Katı malzemelerde, malzeme çevresindeki hücre yoğunluğu değişebilir ve büyümenin bozulduğu alanlar (zonlar) tanımlanabilir. Hücre yoğunluğu kantitatif, semikantitatif ve kantitatif olarak belirlenir.

Malzeme çevresindeki hücrelerin canlılığı, DNA içeriğinin biyokimyasal yöntemlerle ölçülmesi gibi tekniklerle değerlendirilebilir. Bu yöntemler, sitotoksikitenin malzeme ile temas sonrası hücreler üzerindeki etkisini anlamak için kullanılır [131-134].

4.6.4 In vitro yara iyileşmesi testi

Yara iyileşmesinde hücrelerin yara yatağında çoğalması ve göç etmesi kritik bir adımdır, çünkü bu migrasyon fazı yara iyileşmesini hızlandırıcıdır. Bu nedenle, hücre göçünü inceleyen deneyler in vitro yara iyileşmesi analizinde oldukça faydalıdır [135]. In vitro çizik testi, hücre göçünü incelemek için basit, düşük maliyetli ve iyi geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde, birleşen hücre tabakası üzerinde bir çizik oluşturularak, bu yapay boşluğun kenarındaki hücrelerin çizik alanını kapatmak için hareket etmesi gözlemlenir. Temel adımlar arasında, hücre tabakasında bir çizik oluşturulması, çiziciyi kapatmak için hücre göçü sırasında düzenli aralıklarla görüntülerin alınması ve bu görüntülerin karşılaştırılarak hücre göçü hızının belirlenmesi yer alır. Bu yöntem, hücre hareketliliğini ve yara iyileşmesini anlamak için etkili bir araçtır [136].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Dokusuz yüzey malzemelerin geniş kullanım alanları ve özellikleri, modern endüstrinin taleplerine uygun bir malzeme seçeneği sunmaktadır. Bu malzemelerin çeşitli endüstrilerdeki avantajları, özellikle esnek, hafif ve ekonomik olmalarından kaynaklanmaktadır. Ancak, bu benzersiz özelliklerin daha etkili bir şekilde değerlendirilebilmesi için doğru karakterizasyon yöntemlerinin kullanılması önemlidir. Dokusuz yüzey malzemelerin karakterizasyonu, fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerinin anlaşılması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu makalede incelenen çeşitli karakterizasyon yöntemleri, dokusuz yüzey malzemelerin yapısal özelliklerini, mukavemetini, geçirgenliğini, emme kapasitesini ve diğer önemli özelliklerini belirlemede güvenilir araçlar sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, dokusuz yüzey malzemelerin daha spesifik uygulamalarda kullanılabilmesi için karakterizasyon yöntemlerinin daha da geliştirilmesine odaklanmalıdır. Bu malzemelerin performansını artırmak, kalite standartlarını yükseltmek ve çevresel etkilerini azaltmak için inovasyon ve teknolojik ilerlemelerin teşvik edilmesi önemlidir. Sonuç olarak, dokusuz yüzey malzemelerin geniş kullanım alanları ve bu malzemelerin özelliklerini belirleme amacıyla kullanılan karakterizasyon yöntemleri, tekstil endüstrisinden biyomedikal uygulamalara kadar geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Bu alandaki ilerlemeler, endüstrinin ihtiyaçlarına daha iyi cevap veren ve sürdürülebilir çözümler sunan dokusuz yüzey malzemelerin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Patel, B. M., & Bhrambhadd, D. (2008). Nonwoven technology. *Textile Technology*, 1-54.
- Russell, S. J. (2022). *Handbook of nonwovens*. Woodhead Publishing.
- Ajmeri, J. R., & Ajmeri, C. J. (2011). Nonwoven materials and technologies for medical applications. In *Handbook of medical textiles* (pp. 106-131). Woodhead Publishing.
- Cerkez, I., Koçer, H. B., & Broughton, R. M. (2018). Airlaid nonwoven panels for use as structural thermal insulation. *The Journal of The Textile Institute*, 109(1), 17-23.
- Wilson, A. (2010). The formation of dry, wet, spunlaid and other types of nonwovens. In *Applications of nonwovens in technical textiles* (pp. 3-17). Woodhead Publishing.
- Kalebek, N. A., & Babaarslan, O. (2009). Evaluation of friction and stiffness behaviour of nonwovens produced with spunbond and spunlace methods. *Textile and Apparel*, 19(2), 145-150.
- Peng, M., Jia, H., Jiang, L., Zhou, Y., & Ma, J. (2019). Study on structure and property of PP/TPU melt-blown nonwovens. *The Journal of The Textile Institute*, 110(3), 468-475.
- Midha, V. K., & Dakuri, A. (2017). Spun bonding technology and fabric properties: a review. *Journal of Textile Engineering & Fashion Technology*, 1(4), 1-9.
- Gupta, B. S., & Smith, D. K. (2002). Nonwovens in absorbent materials. In *Textile Science and Technology* (Vol. 13, pp. 349-388). Elsevier.
- Das, A., & Raghav, R. J. (2010). Bursting behavior of spunbonded nonwoven fabrics: Part I—Effect of various parameters.
- Purdy, A. T. (1983). Developments in non-woven fabrics. *Textile Progress*, 12(4), 1-86.
- Ajmeri, J. R., & Ajmeri, C. J. (2010). Nonwoven personal hygiene materials and products. In *Applications of nonwovens in technical textiles* (pp. 85-102). Woodhead Publishing.
- Smith, P. A. (2000). Technical fabric structures—3. Nonwoven fabrics. *Handbook of technical textiles*, 12, 130.
- Santos, A. S., Ferreira, P. J. T., & Maloney, T. (2021). Bio-based materials for nonwovens. *Cellulose*, 28(14), 8939-8969.
- Iqbal, M. K. (2009). The applications of nonwovens in technical textiles. *Technical textile and nonwovens*, 35-39.
- Das, D., Pradhan, A. K., Chattopadhyay, R., & Singh, S. N. (2012). Composite nonwovens. *Textile Progress*, 44(1), 1-84.
- Das, D., & Pourdeyhimi, B. (2014). *Composite nonwoven materials: structure, properties and applications*. Elsevier.
- Gogotsi, Y. (2006). *Nanomaterials handbook*. CRC press.
- Greiner, A., & Wendorff, J. H. (2007). Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie International Edition*, 46(30), 5670-5703.
- Boudriot, U., Dersch, R., Greiner, A., & Wendorff, J. H. (2006). Electrospinning approaches toward scaffold engineering—a brief overview. *Artificial organs*, 30(10), 785-792.
- Bartels, V. (Ed.). (2011). *Handbook of medical textiles*. Elsevier.
- Zannini Luz, H., & Loureiro dos Santos, L. A. (2023). Centrifugal spinning for biomedical use: A review. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 48(4), 519-534.
- Scott, R. A. (Ed.). (2005). *Textiles for protection*. Elsevier.
- Daristotle, J. L., Behrens, A. M., Sandler, A. D., & Kofinas, P. (2016). A review of the fundamental principles and applications of solution blow spinning. *ACS applied materials & interfaces*, 8(51), 34951-34963.
- Huang, W., & Leonas, K. K. (2000). Evaluating a one-bath process for imparting antimicrobial activity and repellency to nonwoven surgical gown fabrics. *Textile Research Journal*, 70(9), 774-782.
- Collier, B. J. (2010). Nonwovens in specialist and consumer apparel. In *Applications of nonwovens in technical textiles* (pp. 120-135). Woodhead Publishing.
- Gurbaxani, B. M., Hill, A. N., Paul, P., Prasad, P. V., & Slayton, R. B. (2022). Evaluation of different types of face masks to limit the spread of SARS-CoV-2: a modeling study. *Scientific reports*, 12(1), 8630.
- He, W., Yue, Y., Guo, Y., Zhao, Y. B., Liu, J., & Wang, J. (2023). A comparison study of the filtration behavior of air filtering materials of masks against inert and biological particles. *Separation and Purification Technology*, 313, 123472.
- Wang, A. B., Zhang, X., Gao, L. J., Zhang, T., Xu, H. J., & Bi, Y. J. (2023). A review of filtration performance of protective masks. *International journal of environmental research and public health*, 20(3), 2346.
- Katzer, K. (2002). Polyethylene polymers for hygiene market. *ASIAN TEXTILE JOURNAL-BOMBAY*, 11(6), 30-34.
- Fang, J., Niu, H., Lin, T., & Wang, X. (2008). Applications of electrospun nanofibers. *Chinese science bulletin*, 53, 2265-2286.
- 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.
- 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.
- 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.
- Lu, P., & Ding, B. (2008). Applications of electrospun fibers. *Recent patents on nanotechnology*, 2(3), 169-182.
- Uludağ, H. (2014). Grand challenges in biomaterials. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 2, 43.
- Son, Y. J., Kim, W. J., & Yoo, H. S. (2014). Therapeutic applications of electrospun nanofibers for drug delivery systems. *Archives of pharmacal research*, 37, 69-78.
- 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.
- Ohta, S., Nishiyama, T., Sakoda, M., Machioka, K., Fuke, M., Ichimura, S., ... & Ito, T. (2015). Development of carboxymethyl cellulose nonwoven sheet as a novel hemostatic agent. *Journal of bioscience and bioengineering*, 119(6), 718-723.
- Yan, D., Hu, S., Zhou, Z., Zeenat, S., Cheng, F., Li, Y., ... & Chen, X. (2018). Different chemical groups modification on the surface of chitosan nonwoven dressing and the hemostatic properties. *International journal of biological macromolecules*, 107, 463-469.

41. White, W. C., & Olderman, J. M. (1984). Antimicrobial Techniques for Medical Nonwovens: A Case Study. *Book of Papers*, 12, 13-46.
42. Wong, S. Y., Li, Q., Veselinovic, J., Kim, B. S., Klibanov, A. M., & Hammond, P. T. (2010). Bactericidal and virucidal ultrathin films assembled layer by layer from polycationic N-alkylated polyethylenimines and polyanions. *Biomaterials*, 31(14), 4079-4087.
43. Feng, Q. L., Wu, J., Chen, G. Q., Cui, F. Z., Kim, T. N., & Kim, J. O. (2000). A mechanistic study of the antibacterial effect of silver ions on *Escherichia coli* and *Staphylococcus aureus*. *Journal of biomedical materials research*, 52(4), 662-668.
44. Li, L., Pu, T., Zhanel, G., Zhao, N., Ens, W., & Liu, S. (2012). New biocide with both N-Chloramine and quaternary ammonium moieties exerts enhanced bactericidal activity. *Advanced healthcare materials*, 1(5), 609-620.
45. Palermo, E. F., & Kuroda, K. (2010). Structural determinants of antimicrobial activity in polymers which mimic host defense peptides. *Applied microbiology and biotechnology*, 87, 1605-1615.
46. Rabea, E. I., Badawy, M. E. T., Stevens, C. V., Smagghe, G., & Steurbaut, W. (2003). Chitosan as antimicrobial agent: applications and mode of action. *Biomacromolecules*, 4(6), 1457-1465.
47. Timofeeva, L., & Kleshcheva, N. (2011). Antimicrobial polymers: mechanism of action, factors of activity, and applications. *Applied microbiology and biotechnology*, 89, 475-492.
48. Abdou, E. S., Elkholy, S. S., Elsabee, M. Z., & Mohamed, E. (2008). Improved antimicrobial activity of polypropylene and cotton nonwoven fabrics by surface treatment and modification with chitosan. *Journal of Applied Polymer Science*, 108(4), 2290-2296.
49. Huang, J., Murata, H., Koepsel, R. R., Russell, A. J., & Matyjaszewski, K. (2007). Antibacterial polypropylene via surface-initiated atom transfer radical polymerization. *Biomacromolecules*, 8(5), 1396-1399.
50. Radheshkumar, C., & Münstedt, H. (2006). Antimicrobial polymers from polypropylene/silver composites—Ag⁺ release measured by anode stripping voltammetry. *Reactive and Functional Polymers*, 66(7), 780-788.
51. Zahedi, P., Rezaeian, I., Ranaci-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.
52. 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.
53. Yang, Q., Xie, Z., Hu, J., & Liu, Y. (2021). Hyaluronic acid nanofiber mats loaded with antimicrobial peptide towards wound dressing applications. *Materials Science and Engineering: C*, 128, 112319.
54. Ezhilarasu, H., Vishalli, D., Dheen, S. T., Bay, B. H., & Srinivasan, D. K. (2020). Nanoparticle-based therapeutic approach for diabetic wound healing. *Nanomaterials*, 10(6), 1234.
55. Islam, M., Karmakar, P. C., Arifuzzaman, M., Karim, N., Akhtar, N., & Asaduzzaman, S. M. (2023). Human amniotic membrane and titanium dioxide nanoparticle derived gel for burn wound healing in a rat model. *Regenerative Engineering and Translational Medicine*, 9(2), 249-262.
56. Rybka, M., Mazurek, Ł., & Konop, M. (2022). Beneficial effect of wound dressings containing silver and silver nanoparticles in wound healing—from experimental studies to clinical practice. *Life*, 13(1), 69.
57. Galante, A. J., Haghani, S., Romanowski, E. G., Shanks, R. M., & Leu, P. W. (2020). Superhemophobic and antivirofouling coating for mechanically durable and wash-stable medical textiles. *ACS applied materials & interfaces*, 12(19), 22120-22128.
58. Baysal, G., Önder, S., Göcek, İ., Trabzon, L., Kızıllı, H., Kök, F. N., & Kayaoğlu, B. K. (2015). Design and fabrication of a new nonwoven-textile based platform for biosensor construction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 208, 475-484.
59. Xu, B. (1996). Measurement of pore characteristics in nonwoven fabrics using image analysis. *Clothing and Textiles Research Journal*, 14(1), 81-88.
60. Holbrook, R. D., Galyean, A. A., Gorham, J. M., Herzing, A., & Pettibone, J. (2015). Overview of nanomaterial characterization and metrology. In *Frontiers of nanoscience* (Vol. 8, pp. 47-87). Elsevier.
61. McMullan, D. (1965). *Scanning Electron Microscopy*, 175-185.
62. Dudkiewicz, A., Tiede, K., Loeschner, K., Jensen, L. H. S., Jensen, E., Wierzbicki, R., ... & Molhave, K. (2011). Characterization of nanomaterials in food by electron microscopy. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 30(1), 28-43.
63. Zhu, Y., & Dürr, H. (2015). The future of electron microscopy. *Physics Today*, 68(4), 32-38.
64. Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018, November). Scanning electron microscopy (SEM): A review. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania* (Vol. 2018, pp. 7-9).
65. Zadora, G., & Brożek-Mucha, Z. (2003). SEM-EDX—a useful tool for forensic examinations. *Materials chemistry and physics*, 81(2-3), 345-348.
66. Raval, N., Maheshwari, R., Kalyane, D., Youngren-Ortiz, S. R., & Chougule, M. B. (2019). i RK Tekade,,Importance of Physicochemical Characterization of Nanoparticles in Pharmaceutical Product Development “, u Basic Fundamentals of Drug Delivery.
67. Scimeca, M., Bischetti, S., Lamsira, H. K., Bonfiglio, R., & Bonanno, E. (2018). Energy Dispersive X-ray (EDX) microanalysis: A powerful tool in biomedical research and diagnosis. *European journal of histochemistry: EJH*, 62(1).
68. Tang, C. Y., & Yang, Z. (2017). Transmission electron microscopy (TEM). In *Membrane characterization* (pp. 145-159). Elsevier.
69. Mansoureh, G., & Parisa, V. (2018). Synthesis of metal nanoparticles using laser ablation technique. In *Emerging applications of nanoparticles and architecture nanostructures* (pp. 575-596). Elsevier.
70. Egerton, R. F., Li, P., & Malac, M. (2004). Radiation damage in the TEM and SEM. *Micron*, 35(6), 399-409.

71. Birdi, K. S. (2003). Scanning probe microscopes: applications in science and technology. CRC press.
72. Giessibl, F. J. (2003). Advances in atomic force microscopy. *Reviews of modern physics*, 75(3), 949.
73. Trache, A., & Meininger, G. A. (2008). Atomic force microscopy (AFM). *Current protocols in microbiology*, 8(1), 2C-2.
74. Wei, Q. F., & Wang, X. Q. (2004). AFM characterisation of technical fibres. *Journal of industrial textiles*, 34(1), 51-60.
75. Kacher, J., Landon, C., Adams, B. L., & Fullwood, D. (2009). Bragg's Law diffraction simulations for electron backscatter diffraction analysis. *Ultramicroscopy*, 109(9), 1148-1156.
76. Connolly, J. R. (2012). Elementary crystallography for X-ray diffraction. EPS400-002.
77. Piga, G., Thompson, T. J., Malgosa, A., & Enzo, S. (2009). The potential of X-ray diffraction in the analysis of burned remains from forensic contexts. *Journal of Forensic Sciences*, 54(3), 534-539.
78. Ekpunobi, U. E., Duru, C. B., & Obumselu, F. (2013). XRD characterization of sand deposit in river Niger (South Eastern Nigeria).
79. Andreeva, P., Stoilov, V., & Petrov, O. (2011). Application of X-Ray diffraction analysis for sedimentological investigation of Middle Devonian dolomites from Northeastern Bulgaria. *Geologica Balcanica*, 40(1-3), 31-38.
80. Bunaciu, A. A., Udrişţioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), 289-299.
81. Lang, A. R. (1959). Studies of Individual Dislocations in Crystals by X-Ray Diffraction Microradiography. *Journal of Applied Physics*, 30(11), 1748-1755.
82. Authier, A. (2001). Dynamical theory of X-ray diffraction. *International Union of Crystallography Monographs on Crystallography*, 11, Chapter-16.
83. Zolotov, D. A., Buzmakov, A. V., Asadchikov, V. E., Voloshin, A. E., Shkurko, V. N., & Smirnov, I. S. (2011). Study of the internal structure of lithium fluoride single crystal by laboratory X-ray topo-tomography. *Crystallography Reports*, 56, 393-396.
84. Bowen, D. K., & Tanner, B. K. (1998). High resolution X-ray diffractometry and topography. CRC press.
85. Shul'pina, I. L., & Prokhorov, I. A. (2012). X-ray diffraction topography for materials science. *Crystallography Reports*, 57, 661-669.
86. Bonse, U. K., Hart, M., & Newkirk, J. B. (1966). X-ray diffraction topography. *Advances in X-ray analysis*, 10, 1-8.
87. Izumi, K., Sawamura, S., & Ataka, M. (1996). X-ray topography of lysozyme crystals. *Journal of crystal growth*, 168(1-4), 106-111.
88. Lider, V. V. (2021). X-ray diffraction topography methods. *Physics of the Solid State*, 63, 189-214.
89. Suvorov, E. V. (2018). X-Ray topography: yesterday, today, and prospects for the future. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 12, 835-852.
90. Salvo, L., Cloetens, P., Maire, E., Zabler, S., Blandin, J. J., Buffiere, J. Y., ... & Josserond, C. (2003). X-ray micro-tomography an attractive characterisation technique in materials science. *Nuclear instruments and methods in physics research section B: Beam interactions with materials and atoms*, 200, 273-286.
91. Illerhaus, B., Goebbels, J., Ketschau, A., & Reimers, P. (1988). Non Destructive Waste form and Package Characterization by Computerized Tomography. *MRS Online Proceedings Library*, 127, 507-512.
92. Kastner, J., & Heinzl, C. (2015). X-ray computed tomography for non-destructive testing and materials characterization. *Integrated Imaging and Vision Techniques for Industrial Inspection: Advances and Applications*, 227-250.
93. Kastner, J., Plank, B., Salaberger, D., & Sekelja, J. (2010, November). Defect and porosity determination of fibre reinforced polymers by X-ray computed tomography. In *2nd International Symposium on NDT in Aerospace* (pp. 1-12). Hamburg, Germany: NDT.
94. Salaberger, D., Kannappan, K. A., Kastner, J., Reussner, J., & Auinger, T. (2011). Evaluation of computed tomography data from fibre reinforced polymers to determine fibre length distribution. *International Polymer Processing*, 26(3), 283-291.
95. Chirayil, C. J., Abraham, J., Mishra, R. K., George, S. C., & Thomas, S. (2017). Instrumental techniques for the characterization of nanoparticles. In *Thermal and rheological measurement techniques for nanomaterials characterization* (pp. 1-36). Elsevier.
96. Chen, Z., Dinh, H. N., & Miller, E. (2013). Photoelectrochemical water splitting (Vol. 344, pp. 6-15). New York: Springer.
97. Łobiński, R., & Marczenko, Z. (1992). Recent advances in ultraviolet-visible spectrophotometry. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 23(1-2), 55-111.
98. Ghasempour, R., & Narei, H. (2018). CNT basics and characteristics. In *Carbon nanotube-reinforced polymers* (pp. 1-24). Elsevier.
99. Akçe, M. A., & Kadioğlu, Y. K. (2020). Raman spektroskopisinin ilkeleri ve mineral tanımlamalarında kullanılması. *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 99-115.
100. Kranz, C., & Mizaikoff, B. (2019). Nanomaterials| Characterization methods. In *Encyclopedia of Analytical Science* (pp. 98-107).
101. Araujo, C. F., Nolasco, M. M., Ribeiro, A. M., & Ribeiro-Claro, P. J. (2018). Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects. *Water research*, 142, 426-440.
102. Dwivedi, C., Pandey, I., Pandey, H., Ramteke, P. W., Pandey, A. C., Mishra, S. B., & Patil, S. (2017). Electrospun nanofibrous scaffold as a potential carrier of antimicrobial therapeutics for diabetic wound healing and tissue regeneration. In *Nano-and Microscale Drug Delivery Systems* (pp. 147-164). Elsevier.
103. Titus, D., Samuel, E. J., & Roopan, S. M. (2019). Green synthesis, characterization and applications of nanoparticles. *Micro and Nano Technologies*, 12, 303-319.
104. Asmatulu, R., & Khan, W. S. (2019). Chapter 13- Characterization of electrospun nanolif. *Synthesis and Applications of Electrospun Nanolif*, 257.
105. Scimeca, M., Orlandi, A., Terrenato, I., Bischetti, S., & Bonanno, E. (2014). Assessment of metal contaminants in non-small cell lung cancer by EDX microanalysis. *European journal of histochemistry: EJH*, 58(3).

106. Fernandez-Segura, E., & Warley, A. (2008). Electron probe X-ray microanalysis for the study of cell physiology. *Methods in cell biology*, 88, 19-43.
107. Morgan, A. J. (1985). X-ray microanalysis in electron microscopy for biologists. *Royal Microscopical Society Microscopy Handbook*, 5, 1-79.
108. Mobini, S., Solati-Hashjin, M., Peirovi, H., Osman, N. A. A., Gholipourmalekabadi, M., Barati, M., & Samadikuchaksaraei, A. (2013). Bioactivity and biocompatibility studies on silk-based scaffold for bone tissue engineering. *J Med Biol Eng*, 33(2), 207-14.
109. Wei, Q., Yu, L., Hou, D., & Huang, F. (2008). Surface characterization and properties of functionalized nonwoven. *Journal of Applied Polymer Science*, 107(1), 132-137.
110. Paddock, S. W. (1999). Confocal laser scanning microscopy. *Biotechniques*, 27(5), 992-1004.
111. Alvarez-Román, R., Naik, A., Kalia, Y. N., Fessi, H., & Guy, R. H. (2004). Visualization of skin penetration using confocal laser scanning microscopy. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 58(2), 301-316.
112. Reichhardt, C., & Parsek, M. R. (2019). Confocal laser scanning microscopy for analysis of *Pseudomonas aeruginosa* biofilm architecture and matrix localization. *Frontiers in microbiology*, 10, 677.
113. Hamada, H., Bousfield, D. W., & Luu, W. T. (2008, January). The absorption mechanism of aqueous and solvent inks into synthetic nonwoven fabrics. In *NIP & Digital Fabrication Conference (Vol. 24, pp. 549-552)*. Society of Imaging Science and Technology.
114. Mohan, A. (2003). Formation and characterization of electrospun nonwoven webs.
115. Prime, R. B., Bair, H. E., Vyazovkin, S., Gallagher, P. K., & Riga, A. (2009). Thermogravimetric analysis (TGA). *Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications*, 241-317.
116. Bottom, R. (2008). Thermogravimetric analysis. *Principles and applications of thermal analysis*, 87-118.
117. Lothenbach, B., Durdzinski, P., & De Weerd, K. (2016). Thermogravimetric analysis. A practical guide to microstructural analysis of cementitious materials, 1, 177-211.
118. De Blasio, C., & De Blasio, C. (2019). Thermogravimetric analysis (TGA). *Fundamentals of Biofuels Engineering and Technology*, 91-102.
119. Menczel, J. D., Judovits, L., Prime, R. B., Bair, H. E., Reading, M., & Swier, S. (2009). Differential scanning calorimetry (DSC). *Thermal analysis of polymers: Fundamentals and applications*, 7-239.
120. Spink, C. H. (2008). Differential scanning calorimetry. *Methods in cell biology*, 84, 115-141.
121. Kim, J. S., & Lee, D. S. (2000). Thermal properties of electrospun polyesters. *Polymer journal*, 32(7), 616-618.
122. Bais-Singh, S., & Goswami, B. C. (1995). Theoretical determination of the mechanical response of spun-bonded nonwovens. *Journal of the Textile Institute*, 86(2), 271-288.
123. Zhu, G., Kremenakova, D., Wang, Y., & Militky, J. (2015). Air permeability of polyester nonwoven fabrics. *Autex Research Journal*, 15(1), 8-12.
124. 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.
125. Hearle, J. W. S., & Stevenson, P. J. (1963). Nonwoven fabric studies: Part III: The anisotropy of nonwoven fabrics. *Textile Research Journal*, 33(11), 877-888.
126. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı. (2015). Renk Haslığı Testleri (Mekanik) 1, *Tekstil Teknolojisi*, (pp.1-29).
127. T.C. Millî Eğitim Bakanlığı. (2012). Renk Haslığı Testleri (Su ile), *Tekstil Teknolojisi*, (pp.1- 29).
128. Cenni, E., Ciapetti, G., Granchi, D., Arciola, C. R., Savarino, L., Stea, S., ... & Pizzoferrato, A. (1999). Established cell lines and primary cultures in testing medical devices in vitro. *Toxicology in vitro*, 13(4-5), 801-810.
129. Thangaraju, P., & Varthya, S. B. (2022). ISO 10993: biological evaluation of medical devices. In *Medical device guidelines and regulations handbook* (pp. 163-187). Cham: Springer International Publishing.
130. Hanks, C. T., Wataha, J. C., & Sun, Z. (1996). In vitro models of biocompatibility: a review. *Dental Materials*, 12(3), 186-193.
131. Uzun, İ. H., & Bayındır, F. (2011). Dental materyallerin biyoyoumluluk test yöntemleri. *Gazi Üniversitesi Dış Hekimliği Fakültesi Dergisi*, 28(2), 115-122.
132. Sjögren, G., Sletten, G., & Dahl, J. E. (2000). Cytotoxicity of dental alloys, metals, and ceramics assessed by millipore filter, agar overlay, and MTT tests. *The Journal of prosthetic dentistry*, 84(2), 229-236.
133. Stanford, J. W. (1980). Recommended standard practices for cytotoxicity testing. *FDI World Dental Federation in conjunction with International Standards Organization*. *Dent J*, 30, 141-73.
134. Ekwall, B., Silano, V., Paganuzzi-Stammati, A., & Zucco, F. (1990). Toxicity tests with mammalian cell cultures. Short-term toxicity tests for non-genotoxic effects, 41, 75-82.
135. Martinotti, S., & Ranzato, E. (2020). Scratch wound healing assay. *Epidermal cells: methods and protocols*, 225-229.
136. Liang, C. C., Park, A. Y., & Guan, J. L. (2007). In vitro scratch assay: a convenient and inexpensive method for analysis of cell migration in vitro. *Nature protocols*, 2(2), 329-333.