

FİLTASYON TEKSTİLLERİ: KULLANILAN HAMMADDELER, ÜRETİM YÖNTEMLERİ VE KULLANIM ALANLARI

Selçuk ASLAN
Sibel KAPLAN

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Filtasyon genel olarak, hava veya sıvı içerisindeki belirli boyutlardaki partiküllerin ayrılarak akışkanın safsızlığının artırılması işlemidir. Filtasyon tekstilleri, başlıca endüstriyel, medikal ve jeotekstiller gibi teknik tekstil alt gruplarında değerlendirilebilen oldukça geniş uygulama alanına sahip bir ürün grubudur. Bu çalışmada, tekstil üretim yöntemleri ile elde edilen filtre yapılar için kullanılan hammaddeler, üretim teknikleri ve uygulanan bitim işlemleri ile filtre ürünlerin son kullanım alanları hakkında bilgiler verilmiştir. Ayrıca hammadde, üretim parametrelerindeki değişiklikler ve farklı bitim işlemleri ile farklı boyutlardaki partiküller için filtasyon performansının artırılması konusundaki çalışmaların bir kısmı da incelenerek bu konudaki bilimsel çalışmaların ilerleme yönü hakkında araştırmacılara ve üreticilere ışık tutulması hedeflenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Filtasyon tekstilleri, filtasyon mekanizmaları, sıvı filtasyonu, hava filtasyonu.

FILTRATION TEXTILES: MATERIALS, PRODUCTION PROCESSES AND APPLICATION AREAS

ABSTRACT

Filtration is the process of increasing fluid purification by separating particles having certain dimensions within air or liquid. Filtration textiles include a wide range of products which can be grouped under industrial, medical and geotextiles subgroups of technical textiles. In this study, materials, production and finishing processes and application areas of different textile filter structures are introduced. Moreover, some preceding studies conducted to increase filtration performance of the structures such as modifications carried out on material, production process parameters and finishing applications were summarized. It was aimed to light the way for scientists and filter producers about the progress of filtration technology.

Keywords: Filtration textiles, filtration mechanisms, liquid filtration, air filtration.

1. GİRİŞ

Wakeman (1985) tarafından hazırlanan Filtrasyon Terimleri Sözlüğü'nde filtre yapısı, 'üzerinde veya içerisinde katı partiküllerin depolandığı ve filtrasyon amacıyla kullanılan geçirgen materyal' şeklinde tanımlanmıştır. Sutherland ve Purchas (2002), bu tanımın yeterince geniş olmadığını belirterek filtre tanımını, 'belirtilen filtrasyon şartlarında, bir karışım, çözelti veya süspansiyonun bir ya da birden fazla bileşenine karşı geçirgen olan ve diğer bileşenleri geçirmeyen yapılar' olarak yapmışlardır. Filtrasyon genel olarak ayırma işlemidir ve bu işlemin amacı, filtrelenen malzemenin saflığını arttırmaktır. Tekstil filtre malzemeleri genellikle katı-gaz veya katı-sıvı ayırmada kullanılırlar. Katı partiküllerin tekstil filtre yapıları ile sıvılardan veya gazlardan ayrılması, çok sayıda endüstriyel işlem için ürünün saflığını arttıran, enerji tasarrufu sağlayan, proses verimliliğini yükselten, değerli maddelerin geri kazanılmasına olanak tanıyan ve kirlilik kontrolünde ve çevresel etkilerde genel anlamda iyileşme sağlayan bir işlemdir. Hava saflaştırıcılar, kişisel koruyucu ekipmanlar (cerrahi maske, önlük ve gaz maskeleri), yağ ve yakıt filtreleri, içlerinde tekstil fabrikalarının da bulunduğu endüstriyel tesislerin atık su arıtma ve kimyasal-boyardımadde geri dönüşümü tesislerinde kullanılan yapılar tekstil filtre kullanım alanlarına bazı örneklerdir. Dokuma ve dokusuz yüzey filtre yapılar, hammadde ve yapısal özelliklerine bağlı olarak kalınlıkları ve kalınlık doğrultusunda oluşan üç boyutlu cepler ile belirlenen boyuttaki partiküller için filtrasyon işlemini gerçekleştirirler. Filtre yapıları sadece dokuma ve dokusuz yüzeylerden üretilebildiği gibi bazı uygulamalarda bu yüzeylerin bir araya getirilmesiyle elde edilen çok katlı kompozit yapılar ve bitim işlemleri ile modifiye edilmiş ürünler şeklinde de kullanılabilirlerdir.

1.1. Filtrasyon Mekanizmaları

Filtrasyon işlemi, aşağıda sıralanan dört farklı mekanizma ile gerçekleşebilir [1].

1.1.1. Yüzey Geçişi

Homojen gözenek boyutuna sahip yapılar için geçerli olan bu mekanizmada uzaklaştırılması gereken parçacığın, yapının gözeneklerinden daha büyük olması nedeniyle kolayca geçememesi, gözenek çapından daha küçük çapa sahip parçacıkların ise ortam içerisinden ayrıştırılmadan geçmesi söz konusudur.

1.1.2. Derinlik Geçişi

Bu mekanizma, gözenek çapları yapı yüzeyinde nispeten daha büyük olan ve kalınlık boyunca değişkenlik gösteren keçe ve dokusuz yüzey malzemeler için geçerlidir. Parçacıklar çapın daha küçük olduğu birikme noktasına gelene kadar gözeneklere nüfuz eder ve bu noktada gözeneklere hapsolmuş olur.

1.1.3. Derinlik Filtrasyonu

Derinlik filtrasyonu derinlik geçişinden farklıdır. Bu filtrasyon mekanizması, sıvılardan katı partiküllerin uzaklaştırılması amacıyla kullanılır ve partikülün gözene-

ğin herhangi bir noktasındaki boyutundan küçük olması durumunda da etkindir. Partikül boyutunun gözenek boyutundan büyük olmasının gerektiği basit durdurma mekanizmalarından daha karmaşık bir şekilde filtrasyon, atalet, durdurma, difüzyon veya elektrostatik çekim faktörlerinden birinin etkisiyle gerçekleşir.

Etkin yakalama mekanizması parçacık boyutu ile ilgilidir. Çok küçük parçacıklarda kullanılan Brownian hareket etkisi ile parçacıklar difüzyonla yakalanır. Geniş parçacıklar büyük momentuma sahiptir. Bu parçacıkların sıvı akımından kurtulma olasılıkları daha yüksektir ve bu nedenle bunların atalet mekanizmasıyla yakalanmaları uygundur. Küçük partiküller (0,04–0,4 µm) ise yüksek difüzyon etkisi için çok büyük, atalet etkisi için ise yeterli momentuma sahip olamayacak kadar küçüktürler. Bu boyuttaki parçacıklar filtre tarafından yakalanması en zor olanlarıdır. Bunlar literatürde 'en fazla nüfuz eden partikül boyutu' (MPPS; most penetrating particle size) olarak adlandırılmıştır ve bu gruba giren yüksek performanslı HEPA ve ULPA filtre yapılarının etkinliği Avrupa standardında (EN 1822–1) MPPS'ye dayalı olarak ifade edilir [1].

1.1.4. Kek (Yüzey) Filtrasyonu

Kek (yüzey) filtrasyonu, parçacıkların yüzeyde (ya da yüzeye yakın bir yerde) kek filtre tabakası denilen bölgede yakalanmasıyla gerçekleşir. Yüzeyi iğneleme ile modifiye edilmiş keçe yapılar ve torba formunda, toz toplamada kullanılan filtre yapılar bu şekilde işlev görürler. Filtrasyon yöntemine bağlı olarak ileri ve geri akış temizleme hareketleri yüzeyin temizlenmesine, buna bağlı olarak da filtre yapısının daha sonra kullanılabilmesine olanak tanır [1].

Al-Otoom [2], gaz filtrasyonu sırasında filtre kek kalınlığı, kek porozitesi, basınç düşüşü ve filtrasyon verimliliğinin tahmini için bir istatistiksel model geliştirmiştir. Bu model parçacık boyutu ve parçacıkların rastgele takıldıkları alanlara bağlı olarak tasarlanmıştır. Burada filtre yapısının ortalama gözenek çapının ortalama partikül boyutuna oranı, kek filtre yapısının yakalama kapasitesinin tahminlenmesinde kullanılmıştır. Kek kalınlığı arttıkça kek porozitesinin azaldığı, buna bağlı olarak geçen ortalama partikül çapı düşerken iki yüzey arasındaki basınç düşüşünün de yükseldiği tespit edilmiştir.

1.2. Partikül Yakalama Mekanizmaları

Dokusuz yüzey filtrelere dair çoğu teoremin derinlik filtrasyonu etkisine dayalı olduğu görülür. Derinlik filtrasyonu ve ayrıştırma teorileri atalet etkisi, durdurma, difüzyon ve elektrostatik çekim gibi partikül yakalama mekanizmaları ile gerçekleşmektedir.

1.2.1. Atalet Etkisi (Inertial Impaction)

Bir hava akışı içerisinde büyük partiküller hareket ederken, ataletleri onların yönlerinde ani değişiklikler olmasını engeller. Hava akışı yönünde yerleştirilen filtre, partiküllerin izledikleri yol üzerinde bir engel anlamına gelmektedir. Filtre ile partikül çarpışır ve tutunma gerçekleşmiş olur [1].

1.2.2. Durdurma (Interception)

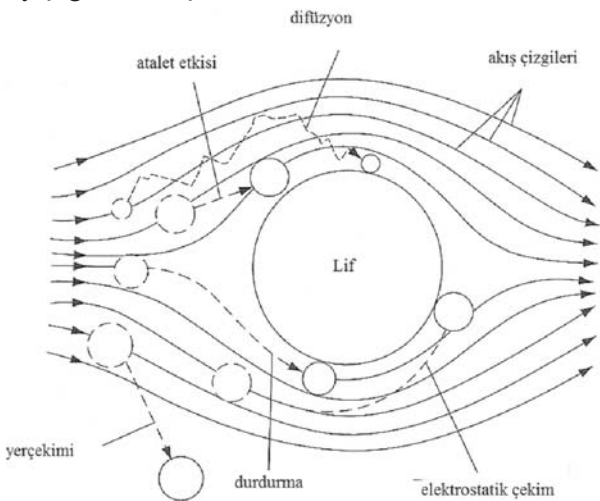
Parçacığın, lif yüzeyinden kendi çapından daha küçük bir uzaklıktan geçmeye çalışması durumunda devreye girer. Parçacık life dokunarak lif tarafından tutulur ve hava akımından kurtulur. Lif yüzeyinden bir partikül çapından daha büyük bir mesafede geçen partiküller bu mekanizmaya dahil olmazlar. Partikülün boyutu onun lifin ne kadar yakınından geçebileceğini belirler. Durdurma mekanizmasının etkinliği lif çapına bağlı, akış hızından bağımsızdır [3].

1.2.3. Difüzyon (Diffusion)

Brownian tipi harekete yani rastgele titreşime göre küçük moleküllerin akıntı içerisindeki titreşimlerle durdurulmasını içerir. Bu mekanizmanın oldukça yavaş hareket eden partiküller için ve ince liflerden oluşmuş kalın filtrelerden geçişte önemli bir durdurma mekanizması olduğu söylenebilir. Parçacıklar liflerin açıklıklarından direkt içeri girmek yerine zigzag bir rota izleyerek tutulur. Sıcaklık ve filtre kalınlığı Brownian difüzyonunun filtreleme verimliliğini ters yönde etkiler [3].

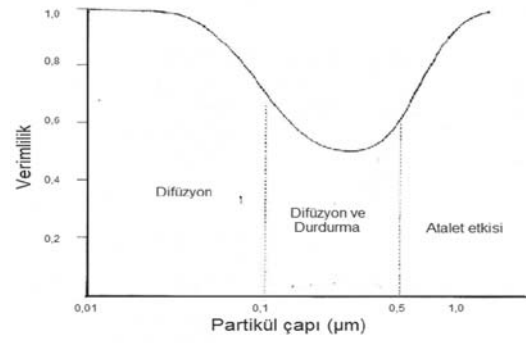
1.2.4. Elektrostatik Çekim (Electrostatic Attraction)

Sadece mekanik metotların kombinasyonu ile filtre edilen akışkandaki partiküllerin tutulması zordur. Bir partikül, elektrostatik bir alandan geçerse, kendisi ile zıt yüklü bir gövde üzerinde tutulur. Bu sebeple liflere üretimleri sırasında elektrostatik yükler verilerek partikülleri çekmesi sağlanabilir. Bu mekanizma küçük ve orta büyüklükteki partiküller için kullanılabilir. Elektrostatik olarak yüklenmiş olan filtreler, filtrasyonun ilk aşamalarında geleneksel filtrelere göre yüksek verimliliğe sahiptirler. Ancak yüklenmiş filtre kumaşlarının verimliliklerinin, filtrasyonun ilerleyen aşamalarında filtre üzerindeki elektrostatik yük etkisinin azalması sonucunda biraz düştüğü, daha sonra da filtrenin üzerinde oluşan kekin verimliliğe pozitif yönde etkisi sonucu yükseldiği tespit edilmiştir [3]. Şekil 1'de partikül yakalama mekanizmalarının işleyişi gösterilmiştir.



Şekil 1. Partikül Yakalama Mekanizması [4]

Şekil 2.'de üç farklı partikül yakalama mekanizmasının (difüzyon, durdurma ve atalet etkisi) sahip oldukları verimlilik değerlerinin partikül çapına bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Şekil 2. Verimliliğin partikül çapına bağlı olarak değişimi [5]

Filtrasyon mekanizmalarının teorik olarak analiz edildiği bir çalışmada Lee ve Liu [6], difüzyon ve durdurma mekanizmalarını daha önceki çalışmaların üzerine geliştirdikleri bir formülle ifade etmiş ve modelin doğruluğunu deneysel sonuçlarla kontrol etmişlerdir.

1.3. Yüzeydeki Materyalin Takılması ve Materyal Kaybı

Normal şartlarda bir partikülün hızı arttıkça oluşan momentum etkisi ile bir filtre yapısı tarafından tutulma olasılığı artar. Fakat pratik uygulamalarda filtre materyalinin küçük lif parçacıkları şeklinde yapıdan uzaklaşması teorik filtre verimliliği hesaplarında ve filtre edilen materyalin safsızlığında sapmaya neden olur. Bahsedilen materyal kaybı akışkan hızıyla doğru orantılıdır [1].

1.4. Membran Prosesleri

Şimdiye kadar ele alınan mekanizmalar genellikle hava ve aerosol filtrasyonunda kullanılmaktadır. Hassas filtreleme işlemleri, yani çok küçük boyuttaki partiküllerin sıvı akışkanlarından ayrıştırılması mikrofiltrasyon, ultrafiltrasyon, nanofiltrasyon ve ters osmoz prosesleriyle gerçekleştirilir. Bunlar genellikle membran süreçleridir. Nanolif kategorisindeki liflerden elde edilen dokusuz yüzey kompozitler yüksek etkinlikleri nedeniyle sıklıkla mikrofiltrasyon ve ultrafiltrasyon amacıyla kullanılır. Aşağıda, bahsedilen membran ayırma işlemleri alt başlıklar halinde açıklanmıştır [1].

1.4.1. Mikrofiltrasyon

Mikrofiltrasyon inceliği 0,1 µm (100 nm)'den daha az olan parçacıkların filtrasyonunda kullanılır. Bu süreç nispeten düşük basınçlarda (1-4 bar veya 100-400 kPa) gerçekleşir. Sıvı arıtma ve steril filtrasyon mikrofiltrasyonun ayrı iki uygulamasıdır [1].

1.4.2. Ultrafiltrasyon

Ultrafiltrasyon partikül ve moleküler filtrasyon arasında bir köprü işlevi görür. Burada filtrasyona maruz kalan parçacık boyutu yaklaşık 0,004 µm - 0,1 µm (4-100 nm) arasındadır. Ultrafiltrasyon esas ağırlığı 10.000'den fazla olan virüs ve molekül gibi küçük partiküllerin geçişini engeller. İşlem basınç aralığı 5-10 bar (500-1000 kPa)'dır. Ultrafiltrasyon uygulamaları makromoleküler çözeltilerin ayrışmasını da içerir [1]. Ultrafiltrasyon işlemi suda

2.2. Adsorban Yapılar

Adsorban yapılar sıvı akışı ile yüzey etkisi yaratarak uzaklaştırılmak istenen maddeleri ayrıştırırlar. Adsorban yapılar ise gözenekli yapıları sayesinde sünger gibi kirleticilerin yüzeyden emilimini sağlar. Emilim etkinliğinin yüksek olması nedeniyle dokusuz yüzeyler adsorban olarak kullanılırlar ve genellikle sıvı akışını kolaylaştırdıkları için orta katmanlarda yer alırlar. Örneğin; çocuk bezlerinin içine yerleştirilen dokusuz yüzeyler bu amaçla kullanılmaktadır. Hijyenik pedler ve mendiller ayırma (filtrasyon) işlemi gerçekleştirmedikleri için filtre yapıları olarak kabul edilmezler. Diğer taraftan bazı materyaller seçici özellik gösterirler. Poliolefinler hidrofobik olmalarına rağmen petrole olan kimyasal ilgilerinden dolayı su içerisinde yer alan petrolün ayrıştırılmasında sık sık kullanılmaktadır. Bu yüzden poliolefin malzemeler çoğu zaman deniz altındaki petrol sızıntılarını önlemek amacıyla kullanılmaktadır.

Yüksek emicilik filtrasyon için çok fazla tercih edilen bir durum değildir. Selülozun sıvı absorpsiyonu sonucu filtre yapısında yumuşama, mukavemet kaybı, dolayısıyla da kullanım ömründe kısalma görülür. Dahası, yapının sıvı absorpsiyonu lif şişmesine ve buna bağlı olarak da filtrasyon performansının değişimine yol açar [1].

2.3. Elektrofiltrasyon

Elektrofiltrasyon işleminde, filtre yapılar veya filtre yapılarında kullanılan elyaf, filtrasyon özelliklerinin değiştirilmesi için elektrostatik şarj edilirler. Elektretler (electrets), dış kaynaklı elektrik alan oluşturan dielektrik materyallerdir. Hava filtrasyonunda kullanıldıklarında, büyük ölçüde filtrasyon verimliliği sağlar ve basınç düşüşünü azaltır. Elektrokinetik filtrasyon ise sıvı uygulamalarında kullanılır. Bu durumda materyal, apolar sıvı akışındaki en fazla aniyonik özelliğe sahip partiküllere etki etmek üzere pozitif elektriksel yüklerle yüklenir [1].

Elektriksel olarak uyarılan filtre yapılarıyla ilgili çalışmalar genellikle yapının veya partikülün farklı süre ve şekillerde elektrik yüklenmesiyle maksimum etki süresinin elde edilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Yang ve ark. [8], hava filtrasyonunda kullanılan meltblown yöntemiyle elde edilen polipropilen dokusuz yüzey filtre yapılarını farklı sürelerde yüksek elektriksel alana maruz bırakarak filtrasyon performansındaki değişimi incelemişlerdir. Sonuçta, incelenen materyal için en iyi hava filtrasyon performansını sağlayan elektriksel işlem süresi belirlenmiştir. Benzer bir çalışmada Ji ve ark. [9], kabin hava filtresi olarak kullanılan elektriksel yüklenebilen filtreye mikron altı boyuttaki partikülleri farklı düzeylerde elektriksel yükleyerek belirli hızda göndermişlerdir. Araştırmacılar sonuçları, filtre üzerinde biriken partikül miktarı, partiküllerin boyutları ve çalışma süresi boyunca filtre

performansı açılarından değerlendirerek filtrenin etkili olduğu partikül türleriyle ilgili sonuçlar ortaya koymuşlardır. Kim ve ark. [10], farklı çözücülerin korona ile elektriksel yüklenen polipropilen filtre yapısının filtrasyon performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sıvı fazda isoproponala (IPA) maruz bırakılan filtre yapısının taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri sonucu herhangi bir morfolojik değişikliğe uğramadığı, yüzeyler arasındaki basınç düşüşünün önemsiz derecede olduğu gözlenmiştir. Filtrasyon verimliliğindeki düşüşün ise EFM (Elektrostatik Kuvvet Mikroskobu) ile tespit edilen tek liflerin elektriksel yüklerindeki değişimden kaynaklandığı tespit edilmiştir.

Elektriksel olarak uyarılmış filtrelerde, oluşan elektriksel alan filtre yüzeyleri arasındaki basınç düşüşünü azaltır. Bunun olası nedenlerinden biri, oluşan elektriksel alan etkisiyle filtre üzerinde tozun düzensiz olarak yayılması ve akış yönünde büyük gözenekli bölgelerin oluşmasıdır. Morris ve ark. [11], elektriksel olarak uyarılmış filtrelerde homojen olmayan filtre yapısı ve toz dağılımında filtrenin karşı yüzeyindeki basınç düşüşünü Happel Hücre Modeli'ne dayandırdıkları matematiksel model ve deneysel ölçümlerle incelemişlerdir.

2.4. Antimikrobiyal Yapılar

Antimikrobiyal filtre yapıları mantar, bakteri ve maya gibi mikroorganizmaların büyüüp çoğalmalarını engelleyen kimyasallar içerir. Aynı zamanda bu yapılar süzülmüş veya filtrelenmiş ürün içine biyolojik zararlıların göçünü engelleme amaçlı da kullanılabilir. Antimikrobiyal işlem bitim aşamasında ya da lif düzeyinde tekstil materyaline uygulanabilir [1].

2.5. Kompozit Yapılar

İki veya daha fazla tülbent filtre yapısının, performansını optimize etmek (dayanımı artırmak, filtrasyon verimliliğini artırmak, vb.) amacıyla birleştirilmesine kompozit oluşturma denir. Bu şekilde elde edilen yapılar da filtrasyon uygulamalarında sıkça kullanılır [1].

3. FİLTASYON YAPILARININ ÜRETİMİNDE KULLANILAN HAMMADDELER

Dokusuz yüzey filtre yapıları için kullanılan hammaddeler aşağıda kategorilere ayrılmıştır;

1. Polimerler
2. Elyaf
3. Reçine ve yapıştırıcılar (formaldehit ve lateks reçineleri, vb.)
4. Katkı Maddeleri, bitim kimyasalları (adsorban yapılar, güç tutuşur kimyasallar, su iticiler, antimikrobiyal kimyasallar, vb.)

Dokusuz yüzey filtre tasarımı için malzeme seçimi performans, işlenebilirlik ve ekonomi gibi parametrelere bağlıdır. Tülbent, kalınlık, mukavemet, elastikiyet, yırtılma direnci, kimyasal ve termal direnç ile çevresel stabilite özelliklerinin doğru kombinasyonlarıyla mamul filtre formuna getirilebilir [1].

3.1. Filtrasyon için Önemli Lif Özellikleri

Dokusuz yüzey filtreler için hammadde, üretilecek filtre türüne ve uygulama alanına göre belirlenir ve yapıda oluşan gözenek büyüklüğü, dolayısıyla da hava geçirgenliği seçilen lif özelliklerine göre değişir. Hacim ve hava geçirgenliği tülbentin gözenekliliğine ve gözenek derinliğine bağlı olup yapının partikül tutma kapasitesini etkileyen bir faktördür. Genel amaç, gözenek genişliliğini en küçük boyutta tutarak en yüksek filtrasyon verimliliği sağlamaktır. Düşük çapa sahip lifler küçük gözenek boyutu, yüksek yoğunluk ve yüksek filtrasyon verimliliği sağlar. Lif enine kesit şekli de filtre yapısının performansını etkileyen özelliklerden biridir. Filtrasyon yapılarında kullanılan doğal ve sentetik liflerin enine kesit şekilleri, yüzey alanını değiştirerek filtrasyon verimliliğini yükseltme yönünde etkili olurlar [1].

3.2. Kullanılan Lif Çeşitleri

3.2.1. Doğal Lifler

Pamuk lifinin ilk hasat linterleri iğnelenmiş keçe filtre yapılarının üretiminde kullanılmaktadır. Odun hamuruna alternatif olarak kullanılan birinci ve ikinci linterler ise yaş yöntemle filtre üretiminde kullanılmaktadır. Abaka lifi çay poşetleri, kahve filtreleri, endüstriyel filtreler ve vakum torbaları gibi sıvı filtrasyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Aynı zamanda tıbbi gaz maskelerinde ve mikro cam lifi takviye edilmiş hava filtrelerinde de kullanılmaktadır. Bu lifler 6mm'den daha yüksek lif uzunluğuna ve 20-24µm çapa sahiptirler. Yaş filtrasyon uygulamalarında kullanılan bir diğer hammadde de esparto lifidir. 3mm'den kısa ve 5-15µm çapa sahip olan lifler kıvrımlı yapıları sayesinde hacimli bir filtre yapısının elde edilmesini sağlar. Esparto lifinden elde edilen hamur odun hamurundan daha yüksek maliyete sahip olmasına rağmen özellikle yüksek filtrasyon verimliliğinin istendiği durumlarda kullanılır. Yün, hava filtrasyon uygulamalarında, endüstriyel gaz maskeleri ve elektrikli süpürge torbalarında, yağ, hidrolik ve ev filtrasyon uygulamalarında genellikle iğnelenmiş keçe formunda kullanılmaktadır [1].

Anandjiwala ve Boguslawsky [12], sadece keten atığı kullanılarak elde edilen iğneleme yöntemiyle üretilmiş dokusuz yüzey filtre yapısının hava filtrasyon uygulamalarındaki filtrasyon performansının keten lif özelliklerine bağlı olarak değişimini araştırmışlardır. Yapının geçirgenlik özelliklerinin beklendiği şekilde kumaş yoğunluğu ve gözenek büyüklüğüne göre değiştiğinin tespit edildiği çalışmada ayrıca çok katlı yapılarla mekanik özelliklerde-

ki değişim de incelenmiştir. Yapıya uygulanan kalandırılma işleminin gözenek büyüklüğü, dolayısıyla da filtrasyon performansını olumlu yönde etkilediği de elde edilen sonuçlar arasındadır.

3.2.2. Sentetik Lifler

Poliester lifi (PET), ekonomik olduğu ve filtre yapılarına uygunluğu nedeniyle son zamanlarda dokusuz yüzey filtre uygulamalarında önemli oranda tercih edilmektedir. Poliester lifleri tek başlarına veya diğer liflerle (genellikle pamuk) karışım halinde iğneleme yöntemi ile üretilip hava filtrasyon uygulamalarında kullanılmaktadır. Kesikli poliester lifleri ise genellikle sıvı filtrasyon uygulamalarında, selüloz çözeltisiyle karışımları gelişmiş reçine kaplamalı filtre yapılarında kullanılır. Spunbond yöntemiyle elde edilen poliester filtreler ise hem hava hem de sıvı filtrasyon uygulamalarına uygun, istenilen gözenek büyüklüğünün ayarlanabildiği, poliesterin özelliklerinden kaynaklanan yüksek mukavemetli yapılarıdır.

Filtre yapılarını da içeren teknik uygulamalarda poliamid türlerinden Naylor 6 ve Naylor 6.6 sıkça kullanılmaktadır. Poliamid, torba (baghouse) filtrasyon uygulamaları için iğneleme yöntemiyle elde edilen filtrelerde kullanılır. Diğer liflerle karışımları yumuşak ve yoğunluğun fazla olması istenen hava ve sıvı filtrelerinde tercih edilir. Donaldson Şirketi, elektrospun nanolif filtre üretiminde poliamid elyafını kullanmıştır [1].

Poliaramidlerin iki ana grubu olan para-aramid ve meta-aramidlerden meta-aramidler yüksek sıcaklık gerektiren hava filtre yapılarında, para-aramidler ise özellikle yüksek mukavemet gereksinimi olan filtre yapılarında kullanılır ve poliaramidlerin filtre uygulamalarındaki avantajları, yeterli rutubet absorpsiyonu sağlayarak statik elektriklenmeyi önleyebilmeleri, yüksek kimyasal direnci ve yüksek boyutsal stabilite özellikleridir. Yüksek ısı, kimyasal ve hidrolik dirence sahip bir diğer elyaf da polifenilen sülfattır. Özellikle sıcak ve/veya aşındırıcı sıvıların filtrelenmesinde kullanılan polifenilen sülfat melt-blown ve spunbond yöntemleriyle elde edilmiş dokusuz yüzeylerde karışım bileşeni olarak kullanılır. Ticari ismi P-84 olan poliimid elyafı sahip olduğu trilobal kesit sayesinde yapının filtrasyon yüzeyini artırır. Yüksek termal direnci sayesinde 260°C'nin üzerindeki sıcaklıklardaki hava ve duman filtrasyon uygulamalarında iğnelenmiş keçe formunda kullanılır. Aynı zamanda yüksek sıcaklığa ve kızgın yağa dirençli olmasından dolayı kartuş yağ filtrelerinde izolasyon maddesi olarak da kullanılır. Karbon takviyeli kompozit yapılar da yüksek kimyasal ve termal dirençleri ve absorpsiyon özelliklerinden dolayı endüstriyel filtrasyon ve ayrıştırma uygulamalarında kullanılırlar.

Çapları 1-80µm aralığında değişen metal lifleri kesikli formda yaş filtrasyon uygulamalarında kullanılabilir. İğnelenmiş halde bulunan metal veya metal içerikli lifler, rijit bir yapı oluşturmak için sertleştirilir. Metal lifinden üretilen filtreler temizlenip tekrar kullanılabilir [1].

4. FİLTASYON YAPILARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

4.1. Dokuma Yapılar

Dokuma filtreler, filament veya stapel ipliklerden standart örgülerde üretilebilir ve genellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılır. Düzenli gözenek boyutuna sahip olan dokuma filtreler yüzey filtrasyon uygulamalarında yalnızca gözenek boyutundan daha büyük partiküllerin ayrılması amacıyla kullanılırlar. Bu özellikleri ile beraber yüksek maliyetleri de göz önünde bulundurulursa, dokusuz yüzeylerin neden pek çok uygulamada artık dokuma filtrelerin yerini aldığı anlaşılabilir. Dokuma filtrelerin yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri, kağıt üretiminde su filtrasyonu uygulamasıdır. Son yıllarda bu uygulama için de dokusuz yüzey filtreler kullanılmaya başlan-

mıştır. Dokuma kumaşlar filtrasyon fonksiyonunu bazı uygulamalarda tek başına yerine getirememektedir. Bu durumda, takviye malzemesi olarak da kullanılmaları söz konusudur. Dokuma kumaşlardan, dokusuz yüzeyler ile beraber kompozit malzeme oluşturmak üzere de faydalanılabilir [3].

4.2. Dokusuz Yüzeyler

Dokusuz yüzeylerin üretilmesinde iki ana işlem grubu, kuru ve yaş yöntemlerdir. Bu iki yöntem arasında basit bir ayırım söz konusudur. Kuru yöntemde yapı hava ortamında şekillenmekte iken yaş yöntemde yapı su içerisinde şekillendirilir. Tablo 1'de dokusuz yüzeylerden üretilen filtre yapılarının üretim yöntemleri ve kullanım alanlarına örnekler verilmiştir.

Tablo 1. Farklı yöntemlerle üretilen filtrasyon ürünlerinin kullanım alanları [1]

Üretim Yöntemi	Hammadde/Yapı Özellikleri	Kullanım Alanı
Kuru Yatırım (Dry Laid)	İğnelenmiş keçe ve spunlace	Endüstriyel hava filtreleri
	İğnelenmiş keçe, elektrostatik filtre	Vakum torbaları
	Reçine bağlanmış	Süt filtre
	İğneli keçe	Bant filtreler
	Kimyasal bağlı, iğneli keçe veya spunlace	Dairesel filtreler
Spunbond	Poliester ve naylon	Kartuş toz filtreleri
	Aktif karbon tabaka	Kabin hava filtreleri
	Pileli- antimikrobiyal	Yüzme havuzu filtreleri
	Poliester	Sıvı gıda filtreleri
Melt-Blown	Kompozit	Panel ve paket filtreler
	Kaplamalı kompozit	Cerrahi yüz maskesi
	Pileli	Derinlik filtreleri
	Kompozit/reçineli kağıt	Vakum torbaları
	Melt-Blown	Pileli kartuş
Elektrospun	Selüloz takviyeli nanolif	Havalandırma filtreleri
	Selüloz ve sentetik lif takviyeli nanolif	Kabin hava filtreleri
	Selüloz takviyeli nanolif	Vakum temizleyiciler
Yaş Yatırım (Wet Laid)	Reçine uygulamalı kağıt	Kartuş toz filtreleri
	Reçine bağlı cam mikrolifi	Temiz oda filtreleri ve ön filtre (HEPA ve ULPA)
	Kaplanmış cam mikrolifi, aktif karbon uygulanmış	Cerrahi yüz maskeleri, solunum cihazı ve hava saflaştırıcılar
	Yaş mukavemeti yüksek kağıt	Kahve filtreleri
	Yüksek yaş mukavemetli abaka lifi	Çay poşetleri
	Reçine uygulamalı pileli, antimikrobiyal	Yüzme havuzu filtreleri
	Reçine uygulamalı, poliester, selüloz ve bazı mikrolifler	Motor yağ filtreleri ve Yakıt filtreleri
	Selüloz	Sigara filtre kağıdı
Kompozit	İğneleme veya spunlace keçelerle takviyeli membran	Endüstriyel hava filtreleri
	Membran takviyeli iğneli veya spunlace keçe	Kartuş toz filtreleri
	Kaplanmış melt -blown kompozit, cam mikrolifi, elektrospun nanolif, aktif karbon uygulaması	Cerrahi yüz maskeleri ve solunum cihazları
	Islak yatırılmış doku suz yüzey takviyeli elektrospun nanolif	Vakum torbaları
	Kaplanmış melt-blown/selüloz kompozit	Ters osmozla çalışan ön filtre

4.2.1. Kuru Yöntem

4.2.1.1. Havayla Yatırım (Airlaid) Yöntemi

Çoğunlukla selüloz hamurundan üretilen havayla yatırılmış yapılar, genellikle bebek bezi ve kişisel hijyenik pedler gibi adsorbent materyaller, endüstriyel hava filtreleri ve silindirik filtre yapılarının üretiminde kullanılmaktadır. Hacimli hamur, dövülerek tek life ayrılır, hava akışı ile hareketli bir sonsuz bant üzerine gönderilir veya kumaş oluşturmak üzere kablo formuna getirilir. Stapel haldeki poliester, polipropilen, naylon, rayon gibi sentetik lifler, üretim bölgesine beslenebilir. Karboksi metil selüloz (CMC) gibi süper adsorbent polimerler (SAP) sık sık üretime dahil edilir.

4.2.1.2. Kuru Yatırım (Drylaid) Yöntemi

Kuru yatırım yöntemi filtrasyonda kullanılan keçe ve tülbent yapılarının üretiminde kullanılır. Kuru yatırımla elde edilen tülbentler havayla yatırılmış yüzeylere göre daha uzun liflerden üretilir [1].

4.2.1.3. Spunbond Yöntemi

Spunbond prosesi, erimiş haldeki polimerin bir haznedeki çekilmesini ve hızlı bir şekilde soğutulmasını içerir. Venturi tüp içerisindeki akış, filamentlerin dağıtıcı çember içerisinden geçerek havalanmasına ve karmaşılaşmasına sebep olur. Karmaşılaşdırılan lifler hareketli bant üzerine vakum vasıtasıyla emilip biriktirilir. Hareketli bant ve bandın altındaki emiş, kalandır veya baskı silindirinin ısıl bağlama etkinliğini artırır. Son olarak bağlanmış tülbent top halinde sarılır [1]. Tablo 1.'de görüldüğü gibi bu yöntemle elde edilen dokusuz yüzeyler kabin hava filtreleri, kartuş toz ve sıvı gıda filtreleri ile antimikrobiyal özellik gerektiren çeşitli medikal uygulamalarında geniş kullanım alanına sahiptir.

Jankowski [13], spunlace yöntemiyle elde edilen çok katmanlı dokusuz yüzeylerin yapısal özelliklerinin sıvı aerosol filtrasyonuna etkilerini araştırmıştır. Çalışmada farklı fiziksel özelliklere (kalınlık, yoğunluk, özgül ağırlık, gözenek boyutu vb.) sahip çok katmanlı dokusuz yüzeylere farklı hızlarda aerosol gönderilmesi sonucu elde edilen verimlilik değerleri ölçülmüştür. Alagirusamy ve Nagendra [14], ise çalışmalarında iki tip spunbond kumaşın (ısı ve iğneleme metotları ile birleştirilmiş) gramaj, kalınlık, hava geçirgenliği ve gözeneklilik gibi özelliklerini incelemişler, filtrasyon performansını ise geliştirdikleri bilgisayarlı hava filtrasyon test cihazı ile ölçmüşlerdir. Sonuçta, iğneleme yöntemiyle üretilmiş yapıların termal olarak birleştirilmiş yapılara göre daha küçük basınç düşüşüne ve daha yüksek filtrasyon verimliliğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

4.2.1.4. Elektrosponning Yöntemi

Elektrosponning yöntemi, polimer çözeltisi veya eriyik haldeki polimere yüksek akımlı elektrik uygulanarak bunlardan nano boyutta lif üretilmesi esasına dayanır. Bü-

yük oranda yönlendirilmiş lifler alt kısımdaki toplayıcı üzerindeki hareketli yüzeyde birikerek birbiri ile bağlantılı kısa liflerden oluşan bir tülbent oluştururlar. Filtrasyon amacıyla kullanılan liflerin çapı 0,25 µm civarındadır. Tülbent çok düşük inceliğe (1µ veya daha az) ve sınırlı mekanik özelliklere sahiptir. Yüzeyde hareketli halde bulunan lifler genellikle bir sonraki işlem için mukavim ve stabil bir yapı oluşturmak için toplanırlar. Genellikle takviye materyali olarak dokusuz yüzey yapılarla birleştirilirler [1].

Elektrosponning yönteminin filtrasyon yapılarında kullanımıyla ilgili çalışmalara bakıldığında genellikle hammadde, lif özellikleri veya kompozit yapı bileşenlerinin değiştirilmesiyle filtrasyon performansındaki değişimler incelenmiştir. Graham ve ark. [15], nanoliflerden elde edilen filtre yapılarının hava filtrasyonunda kullanımı ve filtrasyon performansını değerlendirilmişlerdir. Birçok laboratuvar testlerinde nanoliften elde edilen yapıların düşük geçirgenlikle birlikte yüksek filtrasyon verimliliği sağladığı görülmüştür. Qin ve Wang [16], benzer bir çalışma yaparak nanoliflerden elde edilen filtrelerin yüksek adsorbanlık ve mükemmel filtrasyon özelliklerine sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Heikila ve ark. [17], poliamid-66 elektrospon lifleriyle kaplı örme, dokuma ve dokusuz yüzeylerin filtrasyon performansları ve nanolif katmanlarının uzama performansını test etmişlerdir. Kaplanmış yüzeylerin en düşük nanolif gramajında bile (0,02 g/m²) filtrasyon verimliliğinin kaplanmamış örneklerle göre çok belirgin bir şekilde arttığı ve en yüksek nanolif kaplama gramajında (0,5 g/m²) mikronaltı aerosol partiküllerine karşı filtrasyon verimliliğinin %90'a ulaştığı görülmüştür. Nanolif kaplamaların uzama özelliklerinin elastik materyallerle birlikte kullanıma uygun olmadığı, daha rijit yapıdaki spunbond yüzeyler ve daha kalın nanolif katmanlarıyla birleştirilmeye uygun olduğu da elde edilen sonuçlar arasındadır. Vaisniene [18], elektrospon PVA nanoliflerin gaz filtrasyonundaki kullanımını araştırmış ve PVA nanolifinden elde edilen filtre yapılarının geçirgenliklerinin düşük olduğu ve sigara filtrelerinde kullanımının uygun olduğunu tespit etmiştir.

4.2.1.5. Melt-Blown Yöntemi

Melt-blown tülbent yapısı da doğrudan polimer eriyiğinden elde edilir. Bu yöntem yüksek hız, sıcak hava, uçlara yakın enjekte edebilme ve daha ince lifler üretilmesi gibi özellikleriyle spunbond yönteminden farklılık gösterir. İnceltmiş filamentler soğuk havaya maruz bırakılır ve hareketli toplayıcılar yardımıyla toplanır. İnceltmiş filamentler genellikle 1-4 µm çap aralığında ve düşük gramajlı çok düzgün tülbent yapısına sahip olurlar. Melt-blown tülbentin üretimi için polipropilen ve polibütül tereftalat en sık kullanılan polimerlerdir.

Melt-blown tülbent genellikle spunbond tülbentlerden daha yumuşak ve daha zayıf yapıya sahiptir. Melt-blown tülbent, genellikle mukavemet ve istikrarı sağlamak için kompozit ya da kaplama formunda madde ya da katmanlarla birlikte kullanılırlar [1]. Butler [19], meltblown tülbent tüketiminin üçte ikisinin kompozit formda olduğunu belirtmiştir. Melt-blown tülbentler, ince lif yapısına bağlı olarak sahip oldukları yüksek verimlilikle hem sıvı hem de hava filtrasyon uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Brochocka ve Majchrzycka [20], çalışmalarında melt-blown yüzeye biyoaktif madde ilave ederek elde ettikleri solunum maskelerinin daha yüksek biyokoruyucu özellik gösterdiğini tespit etmişlerdir. Liu ve ark. [21], melt-blown yönteminde kullanılan ve biyolojik olarak parçalanabilen polilaktik asitten (PLA) elde edilen yüzeyin üretim parametreleri ile filtrasyon performansı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Burada PLA'nın eriyik sıcaklığı, hava sıcaklığı ve düze-püskürtme yüzeyi arasındaki hava boşluğu genişliği gibi parametrelerin filtrasyon performansı ile ilişkileri taramalı elektron mikroskop (SEM) ve filtrasyon verimlilik ve geçirgenlik test cihazı ölçümleriyle incelenmiştir. Sonuçta, üretim parametrelerinin filtrasyon performansı üzerinde anlamlı etkileri olduğu tespit edilmiştir ve PLA'nın meltblown prosesine uygun bir malzeme olduğu tespit edilmiştir.

4.2.2. Yaş Yöntem

Yaş yöntemle üretilen bütün filtre yapıları esas olarak kağıt filtre yapıları olarak tanımlanır. Yaş yöntemle üretilen dokusuz yüzeylerin önemli bir miktarının filtre olarak tanımlanması INDA (Association of the Nonwoven Fabrics Industry) tarafından uygun bulunmuştur. Yaş yöntemde odun hamuru ve doğal liflere ek olarak, poliester, rayon, naylon, cam, kevlar, nomeks, grafit ve suda çözünebilen her türlü elyaf işlenebilir. Üretilen yapılar genellikle reçine katmanı ilavesi ile kullanılır. Yaş yöntemle tülbent eldesi; tülbentin oluşumu, bir kimyasal eklenmesi veya tülbentin bir reçine besleyici içerisinden geçirilmesi ve filtrenin son kullanım amacına uygun olarak mekanik ve geometrik özelliklerini değiştirmek amacıyla farklı form verme yöntemleriyle (kırıştırma, buruşturma, geri sarma, yarık açma, tabaka kesme, pileleme, torba oluşturma vb.) şekillendirilmesi aşamalarından oluşur [1].

4.2.3. Kompozit Yapılar

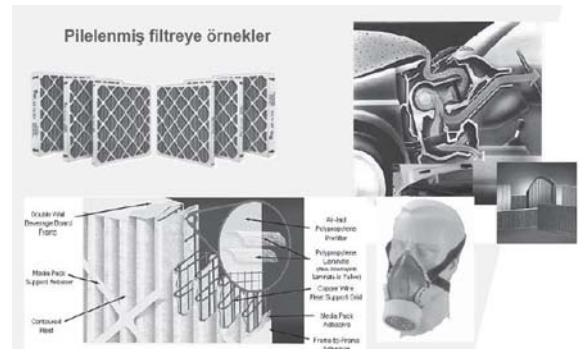
Kompozit yapılar dokusuz yüzey katmanların membran veya elektrospun yapılarla birleştirilmesi ile elde edilir. Birçok iğnelenmiş keçe, filtrasyon uygulamalarında yapısal bütünlüğü sağlamak için ince bir bez ile güçlendirilmiştir. Kompozit yapılar, farklı yoğunlukta katmanların birleştirilmesiyle değişken yoğunlukta filtrelerin elde edilebilmesine olanak tanır. Kimberly-Clark Firması SMS (spunbond/melt-blown/spunbond)

adını verdikleri prosesle üç katlı yüksek performanslı filtre yapısını üretmiştir. Otomotiv hava filtreleri de koku ve dumanı filtrelemek amacıyla dokusuz yüzey filtre yapısının aktif karbon tabakası ile birleştirilmesiyle elde edilebilir. Kompozit yapılarının bütün katmanları dokusuz yüzey olmak zorunda değildir; yapısal destek sağlamak amacıyla bir ya da daha çok katman dokuma, membran, plastik veya metalden oluşabilir [1].

4.3. Dokusuz Yüzey Filtre Yapılarına Form Vermek veya Fonksiyonellik Kazandırmak için Yapılan İşlemler

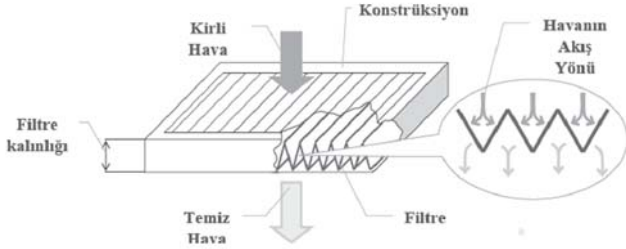
Son yıllarda filtre yapılarına sıkça uygulanan bitim işlemlerinin genel amacı; kumaş stabilitesi sağlamak, yüzey karakteristiklerini geliştirmek ve kumaşın geçirgenliğini kontrol etmektir. Bu işlemlerle, yüzeyden kek uzaklaşmasının kolaylaşması ve temizleme sürecinin kısaltması, yüzey düzgünlüğü ve homojen geçirgenlik ve verim, boyutsal stabilite gibi çok sayıda özellik kazandırılabilir. Uygulanan bitim işlemlerinden bazıları; kalandırlama, ısı ile şekil verme, gazeleme ve kaplamadır. Isı ile şekil verme işlemi filtrelerin kullanımda çekmeye maruz kalmalarını engellemek ve kumaş stabilitesini sağlamak için uygulanır. Yüzey yakma işlemi ile kesikli liflerden elde edilmiş filtre kumaşları üzerinde kumaş içerisinden yüzeye çıkmış olan lifler uzaklaştırılır. Dolayısıyla düzgün bir yüzey elde edilmiş olur. Pürüzsüz bir yüzeyden kek uzaklaştırmak, pürüzlü yüzeyden uzaklaştırmaktan daha kolaydır. Belirli bir hızda ve belirli bir basınç altında silindirler arasında kumaşın geçirilmesine dayanan kalandırlama işlemi ile filtre yapısının direnci artar, geçirgenliği homojen hale gelir ve gözeneklerin tıkanması belirli oranda önlenir [3].

Kuru filtrasyon uygulamalarında dokusuz yüzeyin kartuş ve panel filtre çeşitlerinde olduğu gibi pilelenmesi de yaygın bir uygulamadır. Bu yapılarda, tekstil materyalinin her iki tarafında bulunan kısaçaların aşağı yukarı hareketiyle materyal kısıtılır ve oluklu bir yapı oluşturulmuş olur. Oluşturulan bu oluklar sayesinde filtre geniş yüzey alanına sahip olmakta ve bu alan partikülleri yakalama verimliliğini artırmaktadır. Şekil 4'te pileli filtre yapısına örnekler gösterilmiştir [1].



Şekil 4. Pileli yapıların farklı uygulama alanları [22]

Pileli filtre yapılarının en yaygın kullanıldığı yer kartuş filtrelerdir. Katların meydana getirdiği yüksek yüzey alanı ve bunun sayesinde düşük basınç düşümü söz konusudur. Pileli filtreler hem silindirik hem de düz (levha) şekilde üretilebilirler. Bunlar ön filtre, HEPA, kabin ve HVAC filtrelerinde kullanılmaktadır [22]. Bu filtrelerin çalışma mekanizması Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Pileli filtre mekanizması [22]

5. FİLTRE YAPILARININ KULLANIM ALANLARI

5.1. Sıvı Filtrasyon Uygulamaları

Sıvı filtrasyon uygulamaları sıvı-sıvı, katı-sıvı gibi karışımların veya hidrokarbon (petrokimyasallar, reçine, atık yağlar, vb.) içeren sıvıların filtrasyonunu içerir. Sıvı filtrasyon yapılarının önemli bir bölümü dokusuz yüzeylerden üretilir ve bu yapıların çoğunluğu kek filtrasyonu ile safsızlıkların yüzeyde birikmesiyle ayırma işlemini gerçekleştirir. Atıksu arıtma ve ağır metal iyonlarının sudan ayrıştırılması, gıda filtrasyonu (şarap, yağ, vb.), medikal filtrasyon (böbrek ve kan, ilaç üretimi, vb.), yüzme havuzları sıvı filtrasyonunun en yaygın olarak kullanıldığı alanlardır. Sıvı filtrasyonunda değiştirilebilir yapıların kullanımı son yıllarda artış göstermiştir ve bunlardan en yaygın olarak kullanılanları kartuş ve torba filtrelerdir.

5.1.1. Kartuş Filtreler

Kartuş filtreler sıvı filtrasyon alanında yaygın kullanılan filtre türlerinden birisidir. Çoğunlukla silindirik formda üretilirler ve çok farklı materyallerden (dokuma, sertleştirilmiş metal, sargılı iplik, vb.) üretilebilirler. Kartuş filtreleri boyama endüstrisinde yüksek derecede saflığın ve filtrasyon etkinliğinin istendiği durumlarda kullanılır. Medikal uygulamalar, içme suyu ve havuz suyu filtrasyonu ve motorlu sistemler en yaygın kullanım alanlarıdır. Pileleme ve reçine aplikasyonu bu tür filtreler için sıkça uygulanan işlemlerdir. Sargılı filtreler ise yakıtlardan suyun ayrıştırılması gibi bazı sıvı karışımlarının filtrasyonunda kullanılır. Bunlar benzer kâğıtların bir mil etrafına sarılmasıyla elde edilir. Sargılı ve kartuş filtreler sıvı filtrasyonunda değiştirilebilir filtre yapılarıdır [1].

5.1.2. Dairesel Filtreler

Dairesel filtreler akış halindeki sıvıdan atıkların ayrıştırılmasında kullanılır. Örneğin çamur temizleme, atık suların arıtılması ve metal parçacıkların sıvı içerisinde ayrıştırılması işlemlerinde kullanılır. Derin taban filtreleri ve basınçlı filtrasyon sistemlerinde kullanılanlar olmak üzere iki çeşidi mevcuttur [1].

5.1.3. Torba Filtreler

Torba filtreler kimyasal içeren birçok sıvı filtre uygulamalarında; bitkisel yağ gibi gıda endüstrisi uygulamalarında, temizlik madde üretiminde, soğutma sıvılarının filtrasyonunda, boya ve vernik üretiminde kullanılır. Manila elyafından üretilen çay poşetleri de torba filtreler grubuna girmektedir. Torba filtreler basit boru yapılarının sonlarına eklenerek kullanılırlar. Yüksek basınç ve büyük hacimli uygulamalarda, torba filtre, bir ağ sepet tarafından desteklenen gövdenin içerisine yerleştirilir. Torba filtrelerin üretiminde dokuma yapıları kullanılabildiği gibi iğnelenmiş keçe, melt-blown, spunbond ve kompozit yapılar çoğunlukla kullanılır [1].

Akbari ve ark. [7], poliamiddan üretilen nanofiltre membran yapısının farklı özelliklerde (anyonik ve katyonik) boyarmadde içeren tekstil atıksularını arıtmadaki performansını incelemişler ve farklı boyarmadde türleri için geçerli olan filtrasyon mekanizmaları ve verimliliği ile ilgili sonuçlar ortaya koymuşlardır. Benzer bir çalışmada bir tekstil işletmesinin atık suyunda bulunan dört farklı boyarmaddenin (reaktif, dispers, asidik ve bazik) kullanılabilirlik dereceleri ve biyolojik parçalanabilirliklerini spiral sargılı formda farklı moleküler ağırlıktaki nanofiltre yapıları ve ters ozmoz prensibiyle çalışan membran yapılarının kullanımıyla tespit edilmiştir [23]. Sonuçlara göre biyolojik parçalanabilirlik ve filtre etkinliği açısından ters ozmoz prensibiyle çalışan membran yapısının gittikçe düşen fiyatı da düşünülürse atık su arıtmada kullanılabilecek bir seçenek olduğu belirtilmiştir.

5.2. Hava Filtrasyon Uygulamaları

5.2.1. Toz Toplama Sistemleri

Dokusuz yüzey veya dokuma yapılarından elde edilen toz toplama sistemleri hava filtrasyon uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Sıvı filtrasyon uygulamalarında bahsedilen silindirik kartuş filtre yapıları ve sargılı filtreler toz filtrasyonunda da kullanılabilir. Çok yüksek sıcaklık (1000°C ve üstü) gerektiren uygulamalar için, seramik lif içeren silindirik filtreler de kullanılabilir [1].

Genellikle endüstriyel alanlarda kullanılan toz toplama ve hava filtreleriyle ilgili yapılan çalışmalar genellikle filtre performansının artırılması için proses parametreleri veya elektriksel olarak yükleme gibi son işlemlerle ilgilidir. Yeo ve ark. [24], iğneleme ve ısıl bağlama yöntemlerinin kombinasyonuyla farklı üretim şartlarında üretilen dokusuz yüzey torba filtre yapılarının filtrasyon performanslarındaki değişimi incelemişlerdir. Yapılan basınç düşüşü ve yakalama verimliliği testleri sonucunda torba filtrelerde iğneleme yoğunluğunun artışıyla dayanıklılık ve hava geçirgenliğinin arttığı, basınç farkı ve ortalama gözenek boyutunun azaldığı gözlemlenmiştir.

Çalışmada ayrıca iyi kalite bir torba filtrenin üretimi için gereken üretim parametreleri konusunda bilgi verilmiştir. Doğan [3], örme ve dokuma kumaş takviyeli ve takviyesiz olarak farklı iğneleme yoğunluklarında üretilen iğnelenmiş dokusuz yüzey filtre kumaşların toz filtrasyon verimliliklerini, hava geçirgenliği; mekanik özelliklerini ise kopma, yırtılma ve patlama mukavemet testleri ile belirleyerek kumaş takviyesi ve iğneleme yoğunluğunun filtrasyon ve mekanik performans üzerindeki etkilerini incelemiştir. Sonuçta, takviyesiz filtre yapıların düşük performans gerektiren yerlerde veya ön filtrasyon uygulamalarında kullanılabileceğini, yüksek mekanik performans gereken yerlerde ise dokuma kumaş takviyeli yapıların kullanılması gerektiğini belirtmiştir.

5.2.2. Havalandırma ve Klima Sistemleri

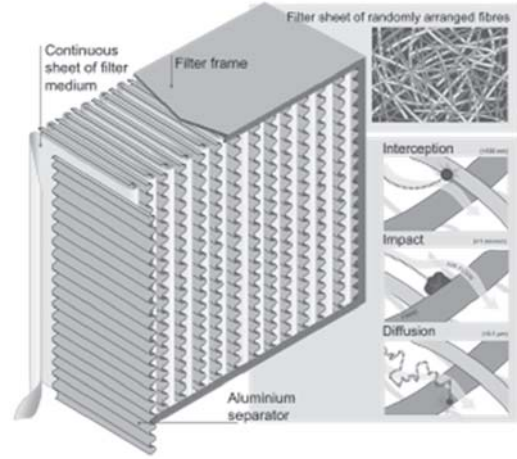
HVAC (Heat Ventilation and Air Conditioning) sistemleri konut ve işyerlerindeki hava kalitesinin sağlanmasında kullanılır. Bunlar çalışma ortamlarında, toz ve mikropların problem olduğu hassas elektronik parçaların bulunduğu ortamlar, ilaç üretim yerleri ve hastane ameliyat odaları gibi ortamlarda havanın safsızlaştırılmasını sağlar. Konut ve ofis havalandırma filtreleri genellikle yüksek filtrasyon verimliliği gerektirmez. Ancak, bazı kimyasal ve biyolojik zararlıların uzaklaştırılmasında yüksek filtrasyon verimliliği aranır [1].

Li ve Jo [25], demet (fiber bundle) tipi polipropilen elektriksel uyarılmış filtre yapısının toz toplama etkinliğini Seul Metrosu'nun havalandırma sisteminde test etmişlerdir. Filtre yüzeyleri arasındaki basınç düşüşü ve filtre verimliliğini kapsayan bir kavram olan 'filtre kalitesi' incelendiğinde, lif demetlerinden oluşan yapının mekanik filtre veya panel tipi elektriksel uyarılmış filtrelere göre daha yüksek kaliteye sahip olduğu tespit edilmiştir. Lif demeti şeklindeki üç boyutlu yapısı ve yüksek elektriksel yüklenmesi sayesinde demet tipi filtrelerin daha uzun partikül tutma süresi ve yüzeyler arasında sabit bir basınç düşüşüne sahip olduğu da bu yapıların tespit edilen avantajları arasındadır.

5.2.3. Temiz Oda Filtreleri

Temiz oda uluslararası standart ISO 14644-1 tarafından: 'havada asılı kalan parçacıkların konsantrasyonunun kontrol altında tutulduğu, partiküllerin oluşumu ve yenilenmesinin minimuma indirildiği ve uygun sıcaklık, bağıl nem ve basınç şartlarının sağlanıp kontrol edilebildiği ortam' olarak tanımlanır. Havada asılı durumdaki çok farklı özelliklerdeki sıvı veya katı partiküller olarak tanımlanabilen aerosollerin özellikle çalışma koşullarında insan sağlığına zarar vermeyecek şekilde uzaklaştırılması büyük önem taşımaktadır. Yüksek verimliliğe sahip hava filtreleri konusundaki ilk çalışmalar askeri personelin toksik duman ve kimyasal-biyolojik silahlara karşı korunması amacıyla yapılmıştır. Daha sonraları cam mikroliflerinden üretilen

yüksek verimliliğe sahip filtre yapılar günümüzde de kullanılmaktadır. 1960'larda elektronik ve eczacılık endüstrileri ve ameliyathane gibi temiz oda uygulamalarında kullanılmak üzere HEPA filtreleri geliştirilmiştir. Bu filtreler kişileri yaşadıkları ortamlardaki alerjen ve bulaşıcı hastalıklara neden olan mikroplardan korur. Bazı uygulamalarda filtre verimliliğinin %99,7 değerlerine ulaşması istenir ve %99,999 oranında verimliliğe sahip (0,1–0,2µm) filtreler daha sonra ULPA (ultra düşük hava nüfuzu) olarak adlandırılmıştır [1]. Şekil 6'da HEPA filtre yapısı ve fonksiyonları gösterilmektedir.



Şekil 6. HEPA filtre ve fonksiyonları [26]

Frising ve ark. [27], katı ve sıvı aerosol partiküllerinin filtrasyon mekanizmalarındaki farklılığı da göz önünde bulundurarak yüksek verimliliğe sahip HEPA filtrelerinin katı ve sıvı aerosol karışımlarının filtrasyonundaki performanslarını katı ve sıvı partikül yoğunluğunun filtre basınç düşüşü üzerindeki etkileri açısından incelemişlerdir.

5.2.4. Cerrahi ve Tıbbi Yüz Maskeleri

Cerrahi ve tıbbi yüz maskelerinin asıl amacı koloidal mikroorganizmalara ve cerrahi müdahale esnasında sıçrayan kan ve diğer sıvılara karşı korumaktır. Tuneval (1991), ameliyat esnasında personelin taktığı tıbbi maskelerin bakteri yayılmasını azalttığını ve bu şekilde hastaların ve tıbbi personelin korunduğuna dikkat çekmiştir [1]. Şekil 7'de cerrahi yüz maskesine bir örnek verilmiştir.



Şekil 7. Cerrahi Yüz Maskesi [28]

Yanma, kaynak, lazer uygulamaları, freze, öğütme ve boyama proseslerinde ortaya çıkan nanopartiküller ciğerlere ulaşarak insan sağlığını olumsuz yönde etkilemektedir. NIOSH (Ulusal İşçi sağlığı ve Güvenliği Enstitüsü) tarafından onaylanan N, R ve P tipi yüz maskeleri, farklı boyutlardaki partiküllerin en az % 95 oranında filtrelenmesini sağlar. Rengasamy ve ark. [29], 4-30 nm boyutlarındaki nanopartiküllerin yüz maskeleri tarafından filtrasyonunu test etmek amacıyla bir cihaz geliştirdikleri çalışmalarında farklı modellerdeki N95 (havada asılı partiküllerin en az %95'ini filtreler) ve P100 (yağ iticidir ve havada asılı partiküllerin en az %99,97'sini filtreler) maskeleri monodispers gümüş aerosollerinin kullanılmasıyla test etmişlerdir. Aynı boyutlardaki NaCl ve gümüş monodispers aerosollerin incelenen filtrelenme performansları arasında anlamlı farklar gözlenmiştir. Sonuçta, NIOSH tarafından onaylanan hava saflaştırıcı N95 ve P100 yüz maskelerinin nanopartiküllere karşı beklenen etkinliği gösterdiği tespit edilmiştir.

Hinds ve Kraske [30], yarım yüz maskeleri ve tek kullanımlık solunum cihazlarının performanslarını deneysel olarak bir manken üzerinde farklı hızlarda püskürttükları polidispers ve monodispers aerosoller üzerinde test etmişler ve geçen partikülleri optik partikül sayacı ile tespit etmişlerdir. Sonuçta partikül boyutu, basınç düşüşü ve akış hızı arasındaki ilişkileri tespit etmişlerdir. Meyer [31], koruyucu solunum maskelerinin 18 °C deki ortamlarda yaklaşık 1 saat giyilmesini kabul edilebilir bir süre olduğunu ve hava sıcaklığının artmasıyla konfor hissini azaldığını ifade etmiştir. Bahsedilen çalışmada, çalışanların koruyucu kıyafetleri giydiklerinde daha çabuk yorulduğu ve verimli çalışma sürelerinin azaldığı tespit edilmiştir. Lisowski ve ark. [32], lif inceliği, paketlenme yoğunluğu ve gramaj açılarından farklılık gösteren kesikli polipropilen lifinden iğneleme yöntemiyle üretilmiş bir grup filtre materyalinin etkinliklerini çapları 1, 5–9 μm arasında değişen monodispers aerosol ve standart sentetik toz ile test etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan lif inceliğinin azalması, paketlenme yoğunluğunun ve kalınlığın artması tüm filtre türleri için performansı artırmıştır. Ayrıca filtre tıkanma düzeyinin de lif çapına bağlı olarak değiştiği tespit edilmiştir. Leonas ve Jones [33], de benzer şekilde cerrahi maskelerin fiziksel ve geçirgenlik özelliklerinin (ağırlık, kalınlık, gözenek boyutu, sentetik kan akışına direnç) bakteriyel filtrasyon verimliliğini hangi oranda etkilediğini incelemişlerdir. Ping [34], kişisel koruyucu ekipmanların (KKE) etkinliği, performansı ve bunlara etki eden parametreleri araştırdığı doktora çalışmasında medikal amaçlı kullanılan koruyucu maske ve giysileri incelemiştir. Standart cerrahi maske ve N95 tipi maskelerin nano kaplama ve model değişikliği sonucu filtrasyon performanslarındaki değişimin yanı sıra bu maskelerin kullanılmasıyla subjektif giyim denemeleri de gerçekleştirilerek maskelerin giyim sırasındaki filtrasyon performansları ve termal konfor performansları test edilmiştir. Sonuçta, incelenen ürünlerin koruma performansının ya-

nında fizyolojik ve çevresel etkileri ile fiyatını içeren bir değerlendirme sistemi geliştirilmiştir. Qian [35], üç farklı üreticiden alınan N95 solunum maskelerini incelediği çalışmada maskelerin farklı partikül boyutları için koruma düzeylerini test etmiştir. Tipik iş kıyafetleri giyildiği zaman solunum maskesi etrafında toplanan aerosol kütlelerinin hesaplanmasında deneysel veriler kullanılmıştır. Yapıya nüfuz eden kütle oranları, yüzden sızdırma olmadığı durumda, büyük partiküllerde % 0,02 ile micron ve altı boyutlardaki duman türü partiküller için % 1,8 arasında değişmektedir. Sonuçta N95 solunum maskelerinin, yüzü iyi kapatmaları durumunda aerosollere karşı mükemmel koruma sağladığı saptanmıştır. Charvet ve ark. [36], filtrenin katı aerosollerden farklı bir mekanizma ile uzaklaştırılan sıvı aerosol ayırma performansını gerçekleştirdikleri testler ve geliştirdikleri model vasıtasıyla incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre sıvı aerosol filtrasyonu, katı aerosollerden farklı olarak filtrenin tıkanmasından sonra sabit bir basınç düşüşü ile karakterize edilebilen bir drenaj safhasını içerir. Filtre tıkanması sırasında farklı boyutlardaki partiküllerin geçiş performansı da çalışmada deneysel olarak incelenmiş ve matematiksel olarak modellenmiştir.

5.2.5. Gaz Maskeleri

Gaz maskeleri genellikle hava temizleyici olarak bilinirler (Şekil 8). Bu materyallerde aranan özellikler çok iyi filtrasyon özelliği, iyi hava geçirgenliği, hafiflik ve alerjik olmama olarak sıralanabilir. Gaz maskeleri, atmosferden gelen ve sağlığı tehdit eden zararlı gazlardan koruma amaçlı kullanıldığı gibi vücuda gerekli oksijen ihtiyacını karşılamak için de kullanılırlar. Gaz maskeleri terör, savaş ve endüstriyel ortamlarda kimyasal, zararlı gaz ve duman gibi etkilerden yüz ve akciğerleri korumak amaçlı tasarlanmıştır. Gaz maskelerinin filtre kısmı genellikle katlı ve kartuş filtre yapılarından oluşur [1].



Şekil 8. Gaz maskesi [37]

Bahsedilen ana başlıklar dışında hava filtreleri, vakumlu temizleyicilerde (torbalı veya torbasız), spreyci boyama ve kaynak işlemlerinde, kimyasal laboratuvar ve egzoz filtresi olarak duman veya buharın havadan uzaklaştırılması amacıyla kullanılırlar.

6. SONUÇ

Tekstil üretim yöntemleriyle elde edilen filtre yapılar oldukça geniş bir kullanıma sahiptir ve teknik tekstiller pazarında önemli bir yeri vardır. Filtre yapıların büyük çoğunluğu sentetik liflerden dokusuz yüzey olarak üretilmekte, toz toplama sistemleri, sıvı filtrasyonu gibi bazı uygulamalarda geri dönüştürülmüş doğal lifler % 100 veya karışım olarak kullanılabilir. Genel filtrasyon uygulamalarında kuru dokusuz yüzey oluşturma yöntemleri ve mekanik bitim işlemleri uygulanabilirken yüksek performans gerektiren temiz oda filtreleri veya cerrahi ekipmanlarda spunbond, spunlace ve özellikle meltblown yöntemi ve bu yöntemlerle elde edilmiş yüzeylerin farklı materyal ve kaplamalarla birleştirildiği kompozit yapılar kullanılmaktadır. Filtrasyon uygulamaları nanolifler için de iyi bir uygulama alanıdır ve azalan lif çapı ve buna bağlı olarak daha iyi kontrol edilebilen gözenek boyutu ile farklı yapılarla desteklenmiş nano yüzeylerin yüksek performanslı filtrelerde kullanımı konusunda çok sayıda çalışma mevcuttur. Bahsedilen temel yüzey oluşturma yöntemlerine ek olarak kullanım alanına göre farklı yardımcı kimyasal ve bağlayıcıların kullanımı da söz konusudur. Bu çalışmada genel olarak filtrasyon işleminin mekanizmaları hakkında bilgi verildikten sonra filtre yapıların üretiminde kullanılan lifler, üretim yöntemleri, farklı mekanik ve kimyasal bitim işlemleri ile başlıca iki ana grup olan hava ve sıvı filtrasyon uygulamaları, konularla ilgili çalışmaların bir kısmını da içerecek şekilde özetlenmiştir. Filtrasyon yapılarının kullanım alanlarının genişliği, hammadde ve üretim parametrelerinin de sayısını artırmıştır. Çalışmada filtrasyon işlemi ve kullanım alanına göre değişen gereksinimler konusunda genel bir çerçeve çizilmeye çalışılmıştır. Çalışmanın, belirli bir kullanım alanı için performans artırıcı deneysel çalışmalar veya üreticilerin kalite artışı konusundaki çabalarına katkıda bulunması amaçlanmıştır.

7. KAYNAKLAR

- 1) Hutten, I.M., (2007), Handbook of Nonwoven Filter Media, Burlington, USA.
- 2) Al-Otoom, A. Y., (2004), Prediction of the Collection Efficiency, the Porosity and the Pressure Drop Across Filter Cakes in Particulate Air Filtration, Atmospheric Environment, 39, 51-57.
- 3) Doğan, G., (2006), Kuru Hava Filtrasyonunda Kullanılan Dokusuz Yüzeylerin Performansları Üzerine Bir Çalışma, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- 4) Adanur, S., (1995), Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles, Auburn University, Alabama, USA.
- 5) Barrier Fabrics for Protection Against Aerosols (1995), Maini, S.M., Hersh, S.P., Tucker, P.A., The Textile Institute Publications, Textile Progress, Vol:26, No:1, Manchester, UK.
- 6) Lee, K.W., Liu, B.Y.H., (1982), Theoretical Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters, Aerosol Science and Technology, 1, 147-161.
- 7) Akbari, A., Remigy, J.C., Aptel, P., 2002, Treatment of Textile Dye Effluent Using a Polyamide-Based Nanofiltration Membrane,

Chemical Engineering and Processing, 41, 601-609.

- 8) Yang, Z. Z., Lin, J. H., Tsai, I. S., (2002), Particle Filtration with an Electret of Nonwoven Polypropylene Fabric, Textile Research Journal, 72(12), 1099-1104.
- 9) Ji, J.H., Bae, G.N., Kang, S.H., Hwang, J., (2003), Effect of Particle Loading on the Performance of an Electret Cabin Air Filter for Submicron Aerosols, Journal of Aerosol Science, 34, 1493-1504.
- 10) Kim, J., Hinestroza, J.P., Jasper, W., Barker, R.L., (2009), Effect of Solvent Exposure on the Filtration Performance of Electrostatically Charged Polypropylene Filter Media, Textile Research Journal, 79(4), 343-350.
- 11) Morris, B.A., Lamb, G.E.R., Saville, D.A., (1984), Electrical Stimulation of Fabric Filtration, Part V: Model for Pressure Drop Reduction, Textile Research Journal, 54, 6, 403-408.
- 12) Anandjiwala, R.D., Boguslawsky, L., (2008), Development of Needle-Punched Nonwoven Fabrics from Flax Fibres for Air Filtration Applications, Textile Research Journal, 78, 7, 614-624.
- 13) Jankowski, T., (2009), Influence of Structural Characteristics on Liquid Aerosol Filtration in Multilayer Nonwoven Fabrics of the Spunlace Type, Fibres & Textiles in Eastern Europe, 17, 4(75), 87-92.
- 14) Das, A., Alagirusamy, R., Nagendra, K., (2009), Filtration Characteristics of Spun-laid Nonwoven Fabrics, Indian Journal of Fibre and Textile Research, 34, 253-257.
- 15) Graham, K., Ouyang, K., Raether, T., Grafe, T., McDonald, B., Knauf, P., (2002), Polymeric Nanofibers in Air Filtration Applications, Fifteenth Annual Technical Conference & Expo of the American Filtration & Separations Society, 9-12 Nisan, Texas, USA.
- 16) Qin, X., Wang, S., (2006), Filtration Properties of Electrospinning Nanofibers, Journal of Applied Polymer Science, 102, 1285-1290.
- 17) Heikkilä, P., Sipilä, A., Peltola, M., Harlin, A., Taipale, A., (2007), Electrospun PA-66 Coating on Textile Surfaces, Textile Research Journal, 77(11), 864-870.
- 18) Vaisniene, A.D., Katunskis, J., Buika, G., (2009), Electrospun PVA Nanofibres For Gas Filtration Applications, Fibres&Textiles in Eastern Europe, 17, 6, 40-43.
- 19) Butler, I., (2000), Filtration Technology Handbook, INDA Publications, 1st Edition, 48 s., USA.
- 20) Production of Bioactive Melt-Blown Filtration Materials Applied to Respiratory Protective Devices, Fibres&Textiles in Eastern Europe, 17, 5(76), 92-98.
- 21) Liu, Y., Cheng, B., Cheng, G., (2009), Development and Filtration Performance of Polylactic Acid Meltblowns, Textile Research Journal, 80(9), 771-779.
- 22) <http://www.nanofmg.com/pdfs/Hava%20Filtrasyonu.pdf>, Erişim Tarihi: 10.05.2010.
- 23) Gholami, M., Nasser, S., Alizadehfard, M., Mesdaghinia, A., (2003), Textile Dye Removal by Membrane Technology and Biological Oxidation, Water Quality Research Journal of Canada, 38, 2, 379-391.
- 24) Yeo, S.Y., Kim, O.S., Lim, D.Y., Byun, S.W., (2004), Effects of Processing Condition on the Filtration Performances of Nonwovens for Bag Filter Media, Journal of Materials Science, 40, 5393-5398.
- 25) Li, K., Jo, Y. M., (2010), Dust Collection by a Fiber Bundle Electret Filter in an MVAC System, Aerosol Science and Technology, 44, 578-587.
- 26) <http://en.wikipedia.org/wiki/HEPA>, Erişim Tarihi: 28.10.2010.

- 27) Frising, T., Gujisaite, V., Thomas, D., Calle, S., Bemer, D., Contal, P., Leclerc, D., (2004), Filtration of Solid and Liquid Aerosol Mixtures: Pressure Drop Evolution and Influence of Solid/Liquid Ratio, *Filtration&Seperation*, 41, 37-39.
- 28) http://en.wikipedia.org/wiki/Surgical_mask , Erişim Tarihi: 27.10.2010.
- 29) Rengasamy, S., King, W.P., Eimer, B.C., Shaffer, R.E., (2008), Filtration Performance of NIOSH-Approved N95 and P100 Filtering Facepiece Respirators Against 4 to 30 Nanometer-Size Nanoparticles, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 5, 9, 556-564.
- 30) Hinds, W.C., Kraske, G., (1987), Performance of Dust Respirators with Facial Seal Leaks: I. Experimental, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 48(10), 836-841.
- 31) Meyer JP., Hery M., Herrault J., Hubert G., Francois D., Hecht, G., Villa, M., (1999), Field Study of Subjective Assessment of Negative Pressure Half-Masks: Influence of the Work Conditions on Comfort and Efficiency, *Applied Ergonomics*, 28: 5/6, 331-338.
- 32) Lisowski, A., Jankowska, E., Thorpe, A., Brown, R.C., (2001), Performance of Textile Fibre Filter Material Measured with Monodisperse and Standart Aerosols, *Powder Technology*, 188, 149-159.
- 33) Leonas, K.K., Jones, C.R., (2003), The Relationship of Fabric Properties And Bacterial Filtration Efficiency for Selected Surgical Face Masks, *Journal of Textile and Apparel, Technology and Management*, 3,:2, 1-8.
- 34) Ping, G., (2009), Personal Protective Equipment Against Infectious Respiratory Diseases, Doktora Tezi, The Hong Kong Polytechnic University, Institute of Textiles&Clothing, Hong Kong, 341 s.
- 35) Qian, Y., Willeke, K., Grinshpun, S.A., Donnelly, J., Coffey, C.C., (2010), Performance of N95 Respirators: Filtration Efficiency for Airborne Microbial and Inert Particles, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 59, 2, 128-132.
- 36) Charvet, A., Gonthier, Y., Gonze, E., Bernis, A., (2010), Experimental and Modelled Efficiencies During the Filtration of a Liquid Aerosol with a Fibrous Medium, *Chemical Engineering Science*, 65, 5, 1875-1886.
- 37) <http://www.itusozluk.com/img.php/6e52e07dac261eb0a92bfa923e695d9727383/gaz+maskesi>, Erişim tarihi: 10.05.2010.