

Cerrahi Maskelerin Geçirgenlik Özelliklerinin Regresyon Analizi ile Tahminlenmesi

Gizem CELEP^{1*}, Fulya YILMAZ², Gamze D. TETİK³

Öz

Bu çalışmanın amacı, maskelerden beklenen ve son kullanıcı konforu için önemli olan hava ve su buharı geçirgenlik özelliklerinin üretim öncesinde kalınlık, gramaj ve gözeneklilik parametrelerine bağlı olarak tahmin edilmesidir. Bu amaçla, piyasadan temin edilen üç katlı spunbond- meltblown- spunbond (SMS) cerrahi maskelerin katman morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenerek; kalınlık, gramaj ve gözeneklilik gibi yapısal-fiziksel özellikleri ile hava ve su buharı geçirgenlikleri test edilmiştir. Cerrahi maskelerin ölçülen özellikleri arasındaki farkın istatistiksel olarak anlamlı olup olmadığı ANOVA testi ile belirlenmiştir. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliklerinin kalınlık, gramaj ve gözeneklilik parametreleri ile tahminlenmesine yönelik regresyon denklemleri oluşturulmuştur. İncelenen maskelerin hava geçirgenliği değerleri 81,4-149,4 l/m²/s, su buharı geçirgenlik değerleri ise 6,67-9,78 g.mm/m².gün.kPa arasında değişmektedir. En yüksek hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğine sahip maskenin gözeneklilik değerinin diğer maskelere göre daha yüksek; kalınlık ve gramaj değerlerinin ise daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar maskelerin kalınlık ve gramajındaki artışın hava ve su buharı geçirgenliği değerlerini düşürdüğünü, gözeneklilikteki artışın ise hava ve su buharı geçirgenliğini artırdığını göstermektedir. Çoklu doğrusal regresyon modeline dahil edilen gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerlerinin cerrahi maskelerin hava geçirgenliğini %99,6; gözeneklilik ve kalınlık değerlerinin ise su buharı geçirgenliğini %91,9 oranında açıklayabileceği bulunmuştur. Çalışmada yapılan regresyon analizi ile cerrahi maskelerin geçirgenlik özelliklerinin seçilen yapısal-fiziksel özellikler ile yüksek bir oranda açıklanabileceği ortaya konulmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Cerrahi maske, Hava geçirgenliği, Regresyon analizi, Su buharı geçirgenliği, Tıbbi tekstil.

Estimation of Permeability Properties of Surgical Masks by Regression Analysis

Abstract

The aim of this study is to estimate the air and water vapor permeability properties expected from masks, which are important for end-user comfort, before production, depending on thickness, weight per unit area, and porosity parameters. For this purpose, firstly, the layer morphologies of three-layer spunbond-meltblown-spunbond (SMS) surgical masks obtained from the market were examined by scanning electron microscope (SEM) and structural-physical properties such as thickness, weight per unit area, porosity, air and water vapor permeability were tested. The ANOVA test was used to determine whether the difference between the measured properties of the surgical masks was statistically significant. Regression equations were obtained to estimate air permeability and water vapor permeability with thickness, weight per unit area, and porosity parameters. The air permeability values of the examined masks varied between 81.4-149.4 l/m²/s and water vapor permeability values varied between 6.67-9.78 g.mm/m².day.kPa. The results show that the increase in the thickness and weight per unit area of the masks decreases the air and water vapor permeability values, while the increase in porosity increases the air and water vapor permeability. It was found that the weight, thickness and porosity values included in the multiple linear regression model could explain the air permeability of surgical masks by 99.6%, while the porosity and thickness values could explain the water vapor permeability by 91.9%. The regression analysis performed in the study revealed that the permeability properties of surgical masks can be explained to a high extent by the selected structural-physical properties.

Keywords: Air permeability, Medical textile, Regression analysis, Surgical mask, Water vapor permeability.

¹Uşak Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, Uşak, Türkiye, gizem.celep@usak.edu.tr

²Uşak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Uşak, Türkiye, fulya.ozdemir@usak.edu.tr

³Uşak Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Nanoteknoloji Mühendisliği, Uşak, Türkiye, gamze.tetik@usak.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

1. Giriş

Kullanıcıları çeşitli mikroorganizma ve solunabilir partiküllere karşı koruyan cerrahi maskelerin önemi COVID-19 pandemisi ile daha da önem kazanmıştır. Özellikle sağlık çalışanlarının sürekli hayatlarında olan en temel kişisel koruyucu donanım ürünü olan cerrahi maskeler, genellikle polipropilen liflerden spunbonding (eğirmeli bağlantı) ya da meltblowing (eriyik üfleme) tekniklerinin birlikte kullanımı ile üretilmektedir. Cerrahi maske üretiminde her ne kadar en fazla kullanılan lif çeşidi polipropilen olsa da polyester, polistiren, polietilen ve polikarbon lifleri de kullanılmaktadır (Sisodia ve Mittal, 2023).

Maskeler, koruyuculuk özelliklerine göre birçok farklı alanda kullanılabilen kişisel koruyucu donanımlardır. Piyasada çeşitli tipte ve özellikte maskeler bulunmaktadır. Maskeler toz, kimyasallar, virüs ve çeşitli mikroorganizmalardan korunmak amacıyla kullanılan tıbbi tekstil ürünleridir. Maskelerin koruyuculuk performansı ve özelliklerini etkileyen çeşitli parametreler bulunmaktadır. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği maskelerin konfor özellikleri üzerinde kritik etkiye sahip parametrelerdir. Nefes alabilirlik ve filtreleme verimliliği arasında optimum bir değere ulaşılması maskelerin konfor, koruma ve kullanılabilirlik özellikleri açısından önem teşkil etmektedir (Angelova ve ark., 2023).

Koruyucu maskeler genel olarak; kumaş maskeler, cerrahi maskeler ve solunum maskeleri olmak üzere üç kategoriye ayrılmaktadır. Kumaş maskeler tek ya da birden fazla katmandan oluşurlar, çok yüksek bulaş riski bulunmayan durumlarda kullanılırlar. Nefes alma ve termo-fizyolojik konfor açısından bu tür maskelerin kullanımı daha rahattır. Dokusuz yüzeylerden çeşitli tekniklerle üretilen cerrahi maskeler, iki boyutlu olarak üretilen dokuma ve örme tekstil yapılarından farklı olarak, tek tek liflerden meydana gelen konfigürasyon yapısındadır. Bu üretim tekniklerine bağlı olarak; mikro gözeneklilik, boyutsal stabilite ve kademeli filtrasyon özellikleri bakımından avantajlar sağlamaktadır (Memon ve ark., 2024). Cerrahi maskeler, genellikle spunbond-meltblown-spunbond (SMS) olmak üzere üç katlı dokusuz yüzeyden meydana gelmektedir. Meltblown dokusuz yüzeylerde kullanılan liflerin çapı en düşük 1 µm civarındadır, bu da gözenek boyutlarının küçük olmasını ve damlacıkları kalkanlamayı sağlamaktadır (Arora ve Majumdar, 2022; Memon ve ark., 2024).

Ağızdan çıkan damlacıklar gibi sıvıların dış katmandan iç katmanlara doğru nüfus etmesini önlemek amacıyla cerrahi maskelerin dış katmanının genellikle su geçirmez özellikte olması istenmektedir (Wang ve ark., 2020; Bhattacharjee ve ark., 2020; Li ve ark., 2006). Orta katmanın, belirli boyut üzerindeki partikül ve patojenlerin hem iç hem de dış katmana ilerlemesini önleyecek şekilde tasarlanması önemlidir. İç katmanda ise, ağızdan salınan damlacıkları hapsetmek için daha çok emici malzemeler tercih edilmektedir (Wang ve ark., 2020; Bhattacharjee ve ark., 2020). Dışarı verilen nefesteki nemin emilmesi, kullanıcının konforunu da arttırmaktadır. Bu üç katman birlikte,

partikül ve patojenlerin nüfuz etmesini sınırlandırarak hem kullanıcıyı hem de çevresindeki kişileri korumaya yardımcı olur (Chua ve ark., 2020).

Hava geçirgenliği, cerrahi maske kullanımında kullanıcıya konfor sağlayan en önemli özelliklerden biridir. Maske gözenekliliğinin artması, hava geçirgenliğini artırmakla birlikte, bulaş riski taşıyan aerosollerin maske yüzeyindeki gözeneklerden geçişini kolaylaştırarak, koruma seviyesinin düşmesine neden olmaktadır. Bununla birlikte yüksek hava geçirgenliği daha iyi nefes alabilirlik anlamına gelmektedir. (Hamouda ve ark., 2022; Kulichenko, 2005; Li ve ark., 2006). Maske kullanımı, özellikle sıcak ve nemli çevresel koşullarda terlemeyi artırmakta ve bu durum kullanıcı konforunu olumsuz yönde etkilemektedir. Tekstil ürünlerinden, terleme ile oluşan sıvının buharlaşarak dışarıya atılması yoluyla termo-fiziksel ve termo-fizyolojik bir konfor sağlaması beklenmekte iken (McCullough ve ark., 2003; Choudhury, 2017); benzer şekilde, maskelerden dışarı verilen nefeste bulunan nemin maske içindeki mikroklima ortamından uzaklaşarak kullanıcıya konfor sağlaması beklenmektedir. Nemin maske iç yüzeyinde hapsedilmesi, aynı zamanda mikroorganizmaların üremesi için elverişli bir ortam oluşturarak, bireyin maruziyet riskini artırabilir (Yang ve ark., 2017). Dolayısıyla, hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği maskelerin konfor özellikleriyle ilişkilendirilen parametrelerdir (Fadil ve ark., 2022). Yüksek nem oranı ve yüksek sıcaklıklarda, maske ve hava arasındaki sıcaklık farkından dolayı maskede su buharı yoğunlaşmasına neden olabilir. Maske kullanımı esnasında kullanıcı tarafından salınan damlacıklar da maskenin ıslanma sürecini hızlandırmaktadır. Nefes alma eylemi de penetrasyonu güçlendirmektedir (Li ve ark., 2006). Bu gerekçelerle, maske çeşitlerinin su buharı ve hava geçirgenliğine ilişkin parametrelerin değerlendirilmesi, kullanıcı konforunun sağlanması açısından büyük önem taşımaktadır.

Literatürdeki çalışmalarda nem akümülyasyonunu azaltmak amacı ile maske yüzeylerine grafen oksitin eklendiği ve bu sayede nemin kumaş yüzeyi üzerinden hızlıca transfer edilerek nefes alabilirliğin geliştirildiği görülmüştür (Aziz ve ark., 2024). Şevkan Macit (2024), çok katmanlı maskelerin kalınlık, hava geçirgenliği, bakteriyel filtrasyon etkinliği ve diferansiyel basınç özelliklerini incelemiştir. Maskelerdeki gramaj ve katman sayısındaki artışın genel olarak kalınlık, bakteriyel filtrasyon etkinliği ve diferansiyel basınç değerlerinin artmasına, hava geçirgenlik değerinin ise azalmasına neden olduğunu ortaya koymuş ve gramajdaki artışın katman sayısındaki artışa kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmiştir. Cerrahi maskelere ekstra bir filtre tabakasının eklenmesi ile maskelerin filtreleme verimliliği de iyileştirilebilmektedir (Tcharkhtchi ve ark., 2021). Fadil ve ark., cerrahi maskelere elektrolif çekim tekniği ile nanoliflerden oluşan filtre tabakası yerleştirmiş ve maskelerin hava geçirgenliği, su buharı geçirgenliği ve eğilme rijitliği gibi özelliklerindeki değişimi incelemişlerdir. Ayrıca cerrahi maskelere ilave filtre tabakasının eklenmesi ile maskelerin hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerlerinin azaldığını belirtmişlerdir (Fadil

ve ark., 2022). Bir başka çalışmada, bakteriyel filtrasyon verimlilikleri (BFE) %98 ve üzeri olan maskelerin toplam su buharı geçirgenliklerinin en düşük değerde olduğu bulunmuştur. BFE değerinin yüksek olması bir avantaj iken, maskelerin su buharı geçirgenlik değerinin düşük olması maskenin kişisel koruyucu donanım olarak uzun bir süre boyunca kullanılması ile konforun bozulacağı belirtilmiştir (Akça, 2023). Lee ve ark. (2020) tek kullanımlık cerrahi maskeler ile tekrar kullanılabilir özellikteki örme ve dokuma maskeleri antimikrobiyal ve antiviral özellikleri hariç tutarak konfor özellikleri bakımından incelemişlerdir. Hava geçirgenliği ve kalınlık arasındaki korelasyon katsayısını 0,44 olarak bulmuşlardır. Kullanılan kumaş yapısı, kumaş özellikleri ve lif çapının bu durumda etkili olabileceğini belirtmişlerdir (Lee ve ark., 2020).

Konu ile ilgili güncel literatür, maskelerin çeşitli etken maddeler ve nanoliflerle birleştirildiği (Celebioglu ve ark., 2023), maskelerdeki ısı transferinin incelendiği (Angelova ve ark., 2024b), maskelerden geçen havanın nümerik olarak simüle edildiği (Angelova ve ark., 2024a) birtakım çalışmaları barındırmaktadır. Literatürde maskelerin hava geçirgenliği, su buharı geçirgenliği veya bakteriyel filtrasyon verimliliği özelliklerinin tespitine yönelik çalışmalar mevcuttur (Akca ve Katı, 2023; Leonas ve ark., 2003; Sekhar ve ark., 2023). Ancak deneysel olarak gözlemlenen sonuçlar ile birlikte istatistiksel modelleme yapılarak maskelerin hava ve su buharı geçirgenliklerinin tahminlendiği çalışmalar sınırlı olup, ağırlıklı olarak tek parametre ile maskelerin hava geçirgenlikleri tahminlenmiştir (Celep ve ark., 2022; Lee ve ark., 2020).

Bu çalışmanın amacı, piyasada bulunan ve son kullanıcıya ulaşmış ticari cerrahi maskelerin hava ve su buharı geçirgenliklerinin, maskelerin taşıdığı yapısal-fiziksel özelliklerle regresyon denklemleri sayesinde tahminlenmesidir. Bu amaçla üç farklı ticari cerrahi maske temin edilerek; kalınlık, gramaj ve gözeneklilik değerleri ölçülmüştür. Maskelerin geçirgenliklerini belirleyen bu özelliklerin hava ve su buharı geçirgenlikleri üzerindeki etkileri istatistiksel açıdan incelenerek, çoklu doğrusal regresyon modelleri oluşturulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada piyasada bulunan üç farklı ticari markaya ait cerrahi maske kullanılmıştır. Bu maskeler polipropilen esaslı olup, üç katlı SMS yapıdadır. Cerrahi maskelerin gramajları tekstil standart atmosfer koşullarında ($20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklık ve $65 \pm 5\%$ bağıl nemde) 48 saat bekletildikten sonra, 0,1 mg hassasiyetli analitik terazi ile (Radwag, Polonya) 10 tekrarlı olarak ölçülmüştür. Maskelerin kalınlıkları 10 μm hassasiyetli dijital mikrometre (Mitutoyo, Japonya) ile 10 tekrarlı olarak ölçülmüştür.

Maskelerin tüm katmanlarının taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüleri, 10 kV ivmelendirme voltajı uygulanarak Phenom Pro X marka cihaz (Hollanda) ile 260 ve 500 kat

büyütmelerde alınmıştır. Maskeler polipropilen liflerden üretilmiş olup, yalıtkan olduklarından görüntünün sorunsuz alınabilmesi için katmanlara SEM analizi öncesinde 15 saniye süresince altın kaplama uygulanmış (Cressington Sputter Coater, Dortmund, Almanya) ve sonrasında görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Ayrıca cihaza bağlantılı kamera ile alınan 52X büyütme görüntüleri de sunulmuştur. Katmanlara ait lif çapları ve bağlantı noktaları boyutları Amerikan Ulusal Sağlık Enstitüleri (National Institutes of Health, NIH) tarafından geliştirilen Image J açık erişimli görüntü inceleme programı ile ölçülmüştür.

Cerrahi maskelerin su buharı geçirgenlik testleri ASTM E96/E96M-24a-Malzemelerin Su Buharı İletim Oranının Gravimetrik Tayini için Standart Test Yöntemleri (2024) Standardına göre gerçekleştirilmiştir. Su buharı geçişinin önem taşıdığı, kalınlığı 32 mm'ye kadar olan kağıt, plastik filmler ve tabaka formunda malzemelerin su buharı geçirgenliğinin belirlenmesinde bu test yönteminden faydalanılmaktadır. Literatürde benzer malzemelerin bu test yöntemi ile su buharı geçirgenliği ölçümünü içeren çalışmalar mevcuttur (Bertuzzi ve ark., 2007; Tarhan ve Şen, 2022; Al-Hassan ve Norziah, 2012; Kar ve ark., 2007; Lee ve ark., 2020). Silika jel içeren desikatörün içerisine analog bir termohigrometre yerleştirilmiş ve desikatör içi nem oranının %0'a inmesi beklenmiştir. Su buharı geçirgenliği ölçümünde kullanılacak olan 4 cm iç çaplı cam kapların her birine 30 ml distile su eklenmiştir. Kapların ağız kısımları cerrahi maskelerle tamamen kapatılmıştır ve bu sayede kap içerisinde %100 bağıl nem oranı sağlanmıştır. Analitik terazi ile ağırlıkları ölçülen kaplar, desikatörün içerisine yerleştirilmiş ve test 24 saat sonunda desikatör içindeki nem oranı sabitlendiğinde tamamlanmıştır. Kapların ağırlıkları tekrar analitik terazi ile ölçülerek su buharı geçirgenlik oranı (SBGO) Denklem 1'e göre hesaplanmıştır:

$$SBGO = (m/t)/A \quad (1)$$

Bu denklemde, m/t (g/gün) zamana göre kaplardaki suyun ağırlık kaybı, A (m^2) ölçüme tabi olan cerrahi maske alanıdır (cam kap ağız alanıdır). Denklem 1'e göre hesaplanan SBGO ile maske kalınlığı ve basınç değişimi değerleri göz önünde bulundurularak, su buharı geçirgenliği (SBG) değerleri hesaplanmıştır.

$$SBG = SBGO * \tau / \Delta P = SBGO * \tau / S(R1 - R2) \quad (2)$$

Denklem 2'de τ (mm) cerrahi maske kalınlığı, ΔP (kPa) su buharı basıncındaki değişim, S test sıcaklığı olan 20°C' de su buharı doymuluk basıncı, $R1 - R2$ ise maskelerin iç ve dış yüzeyleri arasındaki bağıl nem farkıdır.

Cerrahi maskelerin hava geçirgenlik testleri TS 391 EN ISO 9237 Tekstil- Kumaşlarda hava geçirgenliğinin tayini (1999) standardına göre Prowhite Air Test II (Proser, İstanbul, Türkiye) test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. 20 cm² örnek alanı için 100 Pa basınç ayarlanarak testler yapılmıştır. Cerrahi maskelerin uygulamadaki karakteristiklerini belirleme noktasında su buharı geçirgenliği ile hava geçirgenliği değerlerini birlikte yorumlayabilmek amacıyla maskelerin sadece iç (arka) yüzeylerinden ölçüm alınmıştır.

Cerrahi maskelerin gözeneklilik değerleri civa porozimetresi (Autopore IV 9500, Micromeritics, ABD) ile ASTM UOP578-11-Civa Porozimetresi ile Gözenekli Malzemelerin Otomatik Gözenek Hacmi ve Gözenek Boyutu Dağılımı (2011) standart test metoduna göre ölçülmüştür. Gözeneklilik test sonuçları % cinsinden verilmiştir.

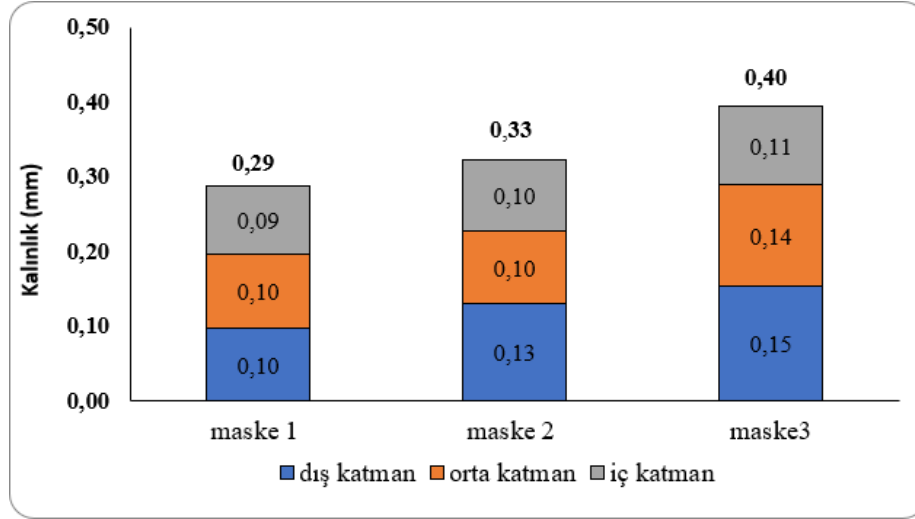
Çalışmanın istatistiksel analizi IBM SPSS 23 paket programı ile yapılmış olup, tek yönlü ANOVA değerlendirme yöntemi seçilmiştir. Testlerde önem seviyesi $\alpha=0,05$ olarak belirlenmiştir. Hava ve su buharı geçirgenliği ile kalınlık, gözeneklilik ve gramaj arasındaki ilişkinin açıklanması amacıyla doğrusal regresyon analizi yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Cerrahi maskelerin gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerleri Tablo 1’de, maskelerin katman kalınlıkları ise Şekil 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Cerrahi maskelerin gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerleri

Maske Türü	Gramaj (g/m ²)	Kalınlık (mm)	Gözeneklilik (%)
1	71,96±0,41	0,288±0,008	78,97±0,55
2	76,40±0,85	0,332±0,008	77,34±0,61
3	89,02±0,13	0,404±0,005	77,07±0,40



Şekil 1. Maskelerin katman kalınlıkları

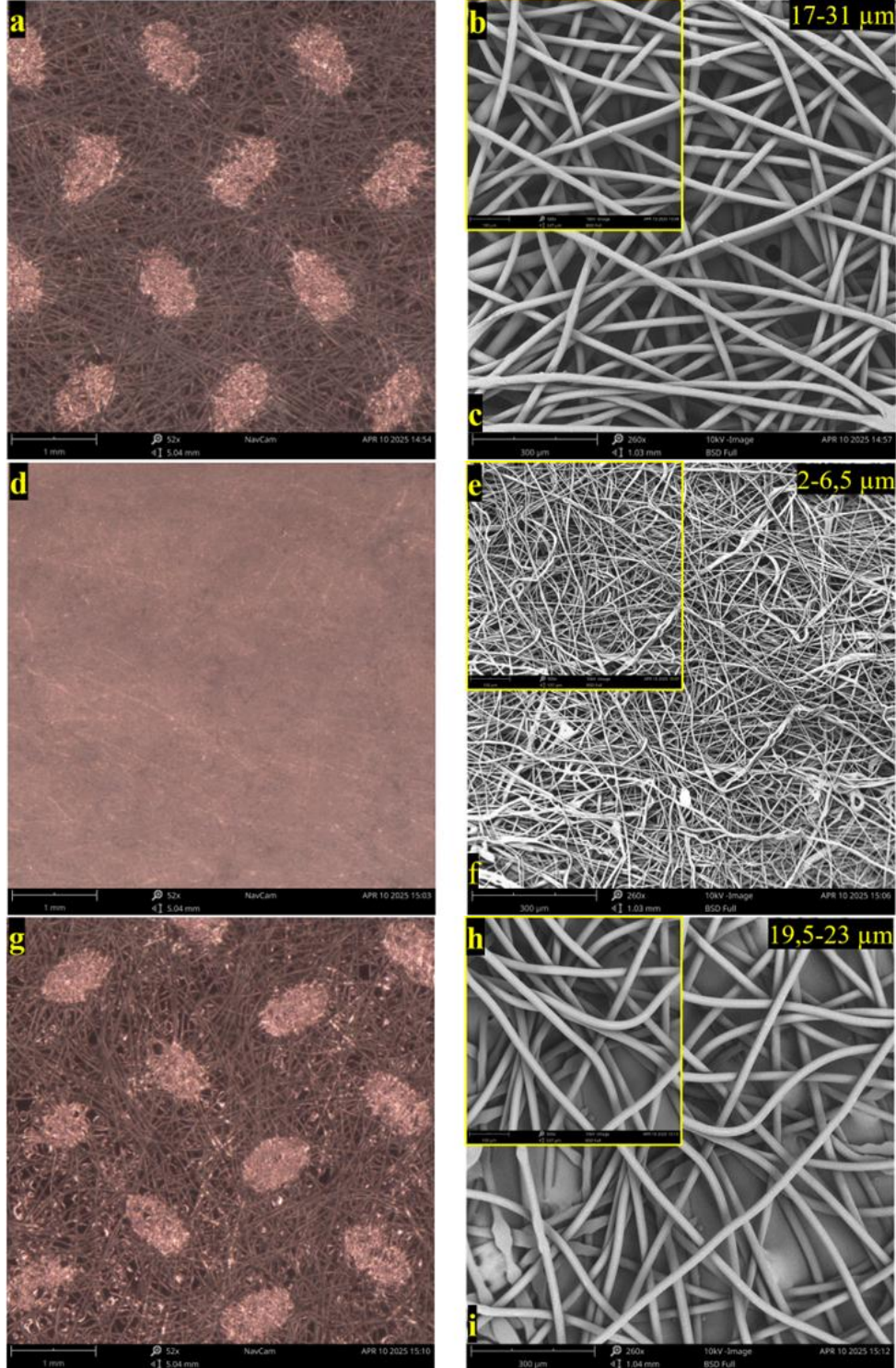
Her üç maskenin üst, orta ve alt katmanlarının SEM cihazı ile alınan tüm görüntüleri Şekil 2-4'te verilmektedir. Genel olarak maske üst katmanlarının lif çapları 17-31 μm arasındadır (Şekil 2-4 b, c). Bu çap değerleri literatürde belirtilen çap değerleri ile uyumludur. Djeghdır ve ark. (2023) spunbond tabakanın ortalama lif çapının 25 μm olduğunu belirtmiştir. Zhang ve ark. (2021) ise spunbond tabakalarda lif çaplarının 15-40 μm arasında değiştiğini ifade etmektedir. Üst katmanda en ince lif çapına sahip maske 3 nolu maske iken, 1 nolu maskenin lif çap dağılım aralığı en geniştir (Aralık(R) = 16 μm).

Genel olarak alt katman lif çapları üst katman lif çaplarından daha düşüktür. Alt katmanları oluşturan lif çapları değerlendirildiğinde, en ince lif çapları 3 nolu maskede gözlenmiştir (Şekil 2-4 h, i). Lif çapları maske alt katmanları için küçükten büyüğe doğru 3, 2 ve 1 nolu maske olarak sıralanmaktadır.

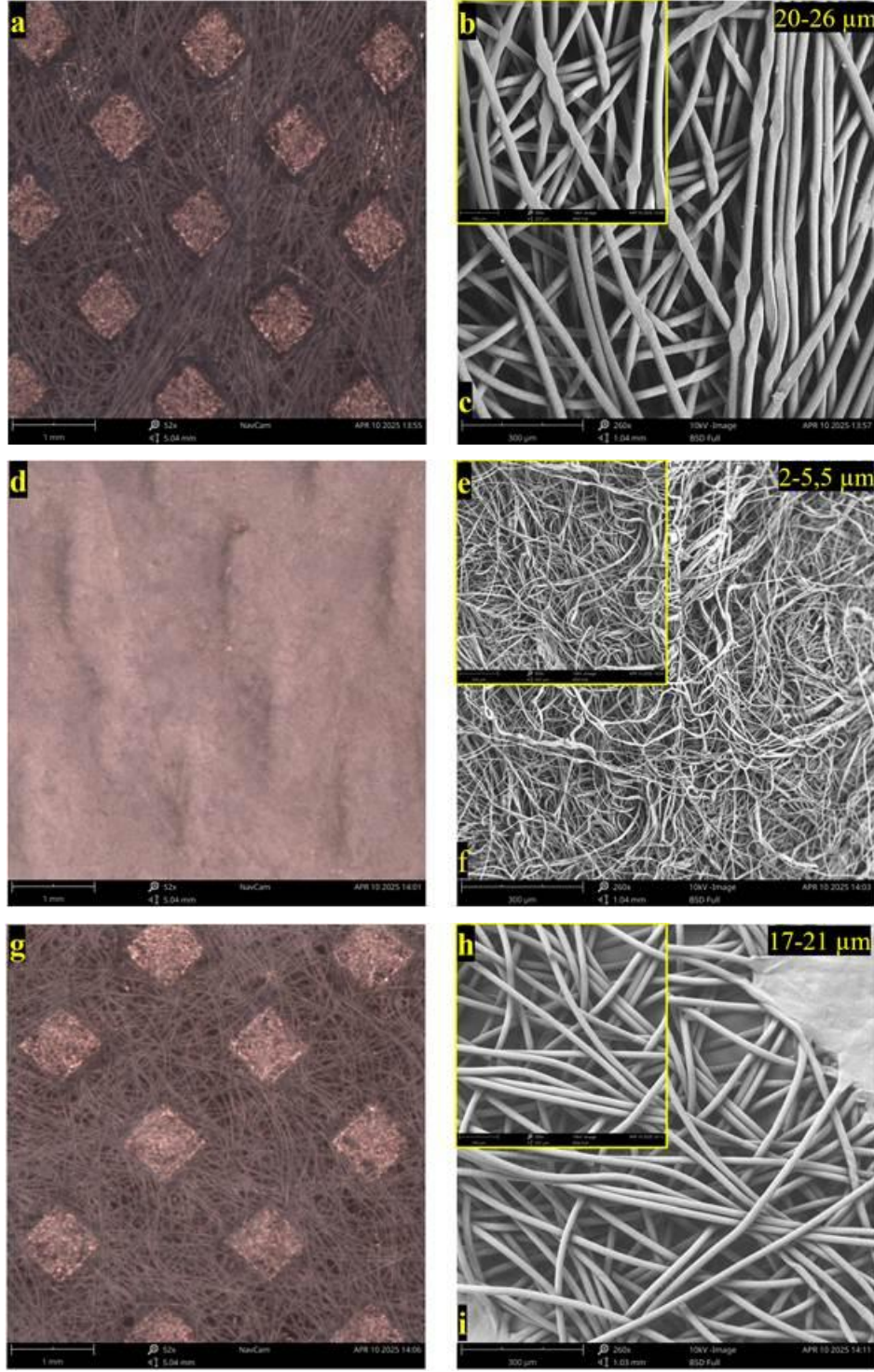
Meltblowing tekniği ile üretilmiş orta katmanlar göz önünde bulundurulduğunda, 1 ve 2 nolu maskeye ait lif çaplarının 2-6,5 μm arasında olduğu, 3 nolu maskenin lif çaplarının ise 2-11 μm arasında olduğu belirlenmiştir (Şekil 2-4 e, f). Han ve ark. (2023) polipropilenden oluşan meltblown maske katmanının ortalama lif çapını 3.06 μm olarak hesaplamıştır. Literatürde de belirtildiği üzere, SEM görüntülerinde cerrahi maskelerin orta katmanlarını oluşturan lif çaplarının daha ince olduğu belirlenmiştir.

SEM cihazı kamerası ile alınan görüntülerden görüldüğü üzere, SMS yapıda olan her üç maskenin spunbond tabakasına ait bağlantı noktaları tasarımları farklıdır (Şekil 2-4 a, g). 1 nolu maskede bağlantı noktası elips şeklinde iken, 2 ve 3 nolu maskelerde sırasıyla kare ve karo şeklinde bağlantı noktaları bulunmaktadır. Ayrıca bu bağlantı noktalarının üst katmanlarda boyutları 2 ve 3 nolu maske için sırasıyla $588 \pm 22 \mu\text{m}$ ve $634 \pm 24 \mu\text{m}$ 'dir. Elips formunda bağlantı noktası olan 1 nolu maske için kısa çap ortalaması $501 \pm 30 \mu\text{m}$ ve uzun çap ortalaması $847 \pm 35 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.

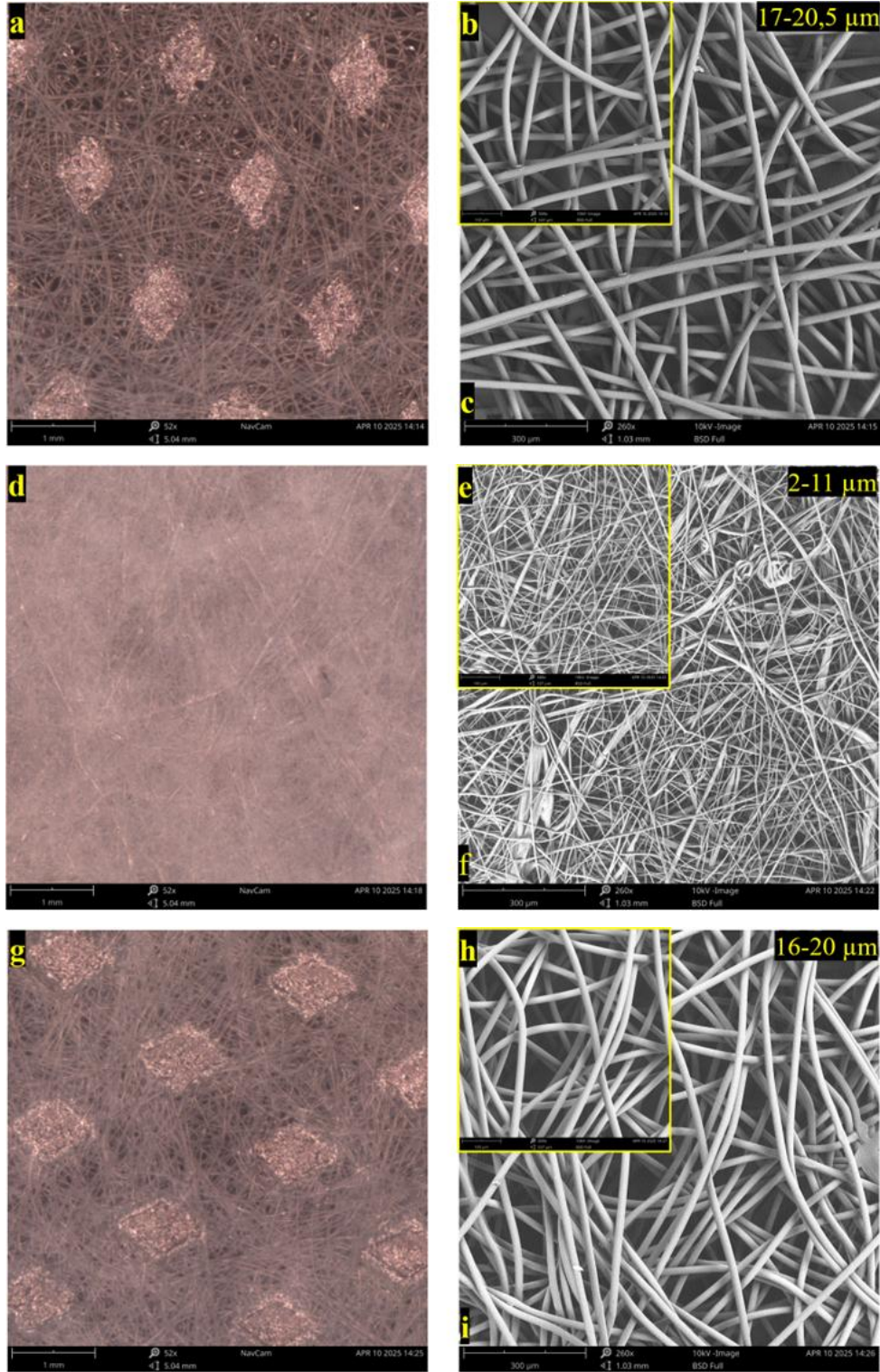
Maske alt katmanları için de benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca bağlantı noktaları arasındaki en yakın dikey mesafe tüm maskelerde yaklaşık $1000\ \mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 2. 1 numaralı maskenin sırasıyla üst, orta ve alt katmanlarına ait (a), (d), (g) kamera görüntüleri (52X); (b), (e), (h) 500X ve (c), (f), (i) 260X'te alınmış SEM görüntüleri



Şekil 3. 2 numaralı maskenin sırasıyla üst, orta ve alt katmanlarına ait (a), (d), (g) kamera görüntüleri (52X); (b), (e), (h) 500X ve (c), (f), (i) 260X'te alınmış SEM görüntüleri

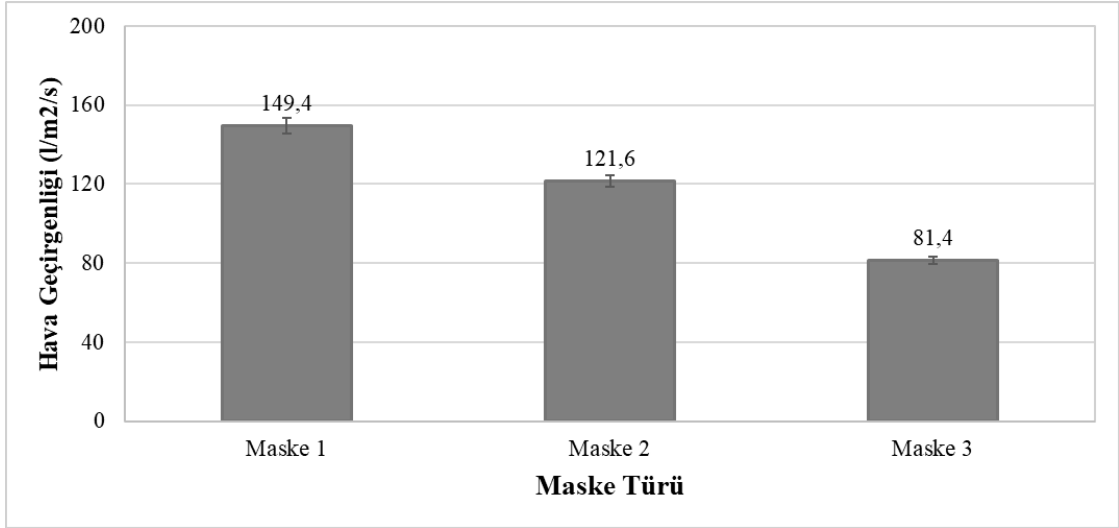


Şekil 4. 3 numaralı maskenin sırasıyla üst, orta ve alt katmanlarına ait (a), (d), (g) kamera görüntüleri (52X); (b), (e), (h) 500X ve (c), (f), (i) 260X'te alınmış SEM görüntüleri

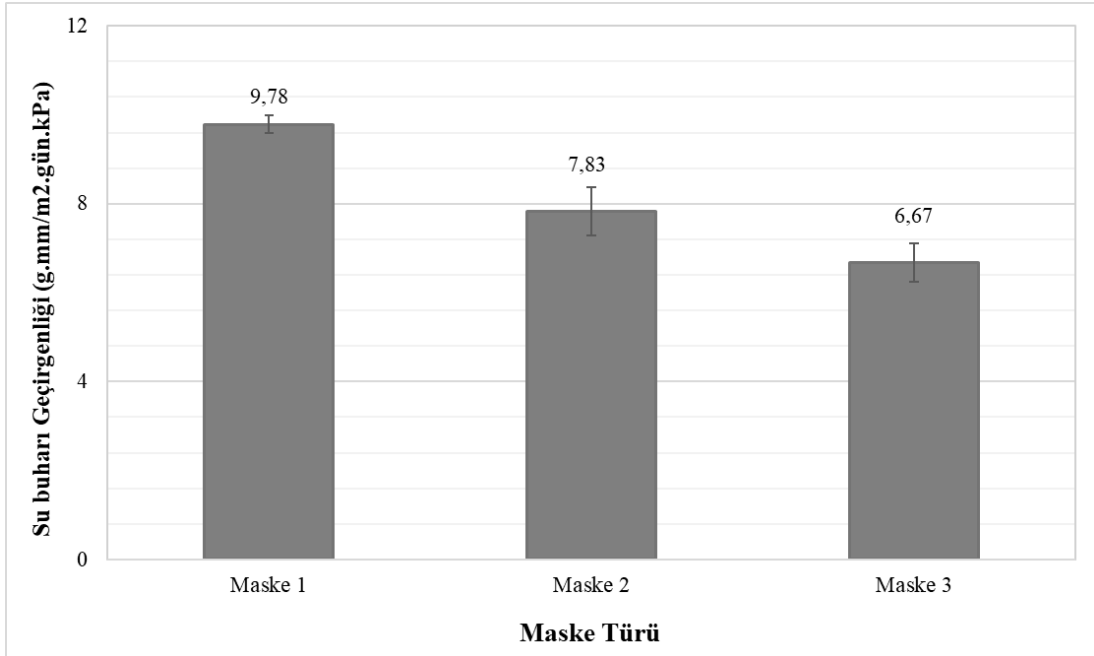
Şekil 5'te maske türüne göre hava geçirgenliği değerleri verilmektedir. Denklem 2'ye göre hesaplanan maskelerin su buharı geçirgenlik değerleri ise Şekil 6'da sunulmaktadır.

Maske türleri incelendiğinde, gramaj ve kalınlık değerleri arttıkça hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerlerinin azaldığı, gözenekliliğin artmasıyla hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğinin arttığı belirlenmiştir. Gramajdaki artış genel olarak birim alanda daha fazla lif-lif

kesişmesi anlamına gelmekte olup, hava ve su buharı geçişi bu nedenle zorlaşmakta ve geçirgenlik azalmaktadır. SMS maskelerin orta katmanında bulunan meltblown tabaka geçirgenlik üzerinde spunbond katmanlara göre daha belirleyici bir etkiye sahiptir (Han ve ark., 2023). En kalın orta katmana sahip olan 3 numaralı maskenin (orta katman kalınlığı=0,14 mm) hava ve su buharı geçirgenliğinin en düşük olmasında bu durum etkili olmuştur. Gözeneklilikteki artış ise su buharı ve hava akışına karşı direncin azalmasına, dolayısıyla yüksek geçirgenliğe yol açmaktadır.



Şekil 5. Maskelerin hava geçirgenliği değerleri



Şekil 6. Maskelerin su buharı geçirgenliği değerleri

Tablo 2. Maskelerin hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğine ait ANOVA test sonuçları

Ölçülen Özellik		Kareler Toplamı	Sd	Kareler Ortalaması	F	Sig.
Hava Geçirgenliği	Gruplar	23376,267	2	11688,133	1256,288	,000
	Arası					
	Gruplar İçİ Toplam	251,200 23627,467	27 29	9,304		
Su Buharı Geçirgenliği	Gruplar	49,315	2	24,657	245,866	,000
	Arası					
	Gruplar İçİ Toplam	2,708 52,022	27 29	,100		

Deneysel çalışmalarda elde edilen bulguların maskeler arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığını tespit etmek için gerçekleştirilen ANOVA testine göre, maskelerin sahip oldukları yapısal-fiziksel özellikler, hava ve su buharı geçirgenliklerini istatistiksel açıdan anlamlı farklı kılmaktadır ($p<0,05$) (Tablo 2).

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, bulguların literatürle uyumlu olduğu görülmüştür. Konu ile ilgili çalışmalarda hava geçirgenliği ve kalınlık değeri arasında ters orantılı bir ilişki olduğu (Tharewal ve ark., 2013; Angelova ve ark., 2023); gramaj arttıkça geçirgenliğin azaldığı (Korkmaz ve ark., 2023; Epps ve Leonas, 2000) vurgulanmıştır.

Çalışmanın son aşamasında bağımsız değişkenler olarak belirlenen gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerlerinin, bağımlı değişkenler hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerleri ile ilişkileri regresyon denklemleri ile açıklanmaya çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre maskelerin hava geçirgenliği değerleri gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerlerinden etkilenmekte olup, gramaj ve kalınlıktaki artışla azalmakta, gözeneklilikteki artışla artmaktadır.

Hava geçirgenliği değeri için yapılan regresyon analizinde model başlığı altında yer alan sabit değerin hava geçirgenliğine olan etkisi anlamlı olmadığından ($p=0,560$), regresyon analizi sabiti içermeyecek şekilde yeniden yapılmıştır (Tablo 3).

Su buharı geçirgenliği için yapılan regresyon analizinde ise, gramajın su buharı geçirgenliği üzerindeki etkisi anlamlı bulunmamış olup ($p=0,085$), modelden gramaj değişkeni çıkarılarak regresyon analizi yeniden yapılmıştır (Tablo 3).

Tablo 3. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği doğrusal regresyon katsayıları

Hava Geçirgenliği					
Model	B	Standart Hata	Beta	t	Sig.
Gözeneklilik	4,434	,157	2,856	28,186	,000
Kalınlık	-238,979	65,232	-,682	-3,664	,001
Gramaj	-1,844	,422	-1,213	-4,371	,000
Su Buharı Geçirgenliği					
Model	B	Standart Hata	Beta	t	Sig.
(Sabit)	-20,462	8,158		-2,508	,018
Gözeneklilik	,451	,099	,334	4,574	,000
Kalınlık	-19,149	1,994	-,700	-9,601	,000

Hava geçirgenliği ile istatistiksel açıdan anlamlı etkiye sahip model ögeleri olan kumaş gramajı, kalınlık ve gözeneklilik arasındaki ilişki 3 numaralı regresyon denkleminde verilmektedir:

$$HG = 4,434 * G - 238,979 * K - 1,844 * Gr \quad (3)$$

Denklemden HG hava geçirgenliğini, G gözenekliliği, K kalınlığı ve Gr gramajı simgelemektedir. Regresyon denkleminde göre; hava geçirgenliği değeri ile gözeneklilik arasında pozitif yönlü bir ilişki vardır. Yani maskelerin gözeneklilik değerleri arttıkça hava geçirgenliği değeri de artmaktadır. Bununla birlikte hava geçirgenliği ile kalınlık ve gramaj arasında ise negatif yönlü bir ilişki bulunmaktadır (Denklemler 3). Maske kalınlığı ve gramaj değerleri arttıkça hava geçirgenliği değeri azalmaktadır.

Su buharı geçirgenliği ile istatistiksel açıdan anlamlı etkiye sahip model ögeleri olan kalınlık ve gözeneklilik değerleri arasındaki ilişki 4 numaralı regresyon denkleminde verilmektedir:

$$SBG = -20,462 + 0,451 * G - 19,149 * K \quad (4)$$

Denklemden SBG su buharı geçirgenliğini, G gözenekliliği, K kalınlığı simgelemektedir. Regresyon denklemi incelendiğinde, su buharı geçirgenliği değeri ile gözeneklilik değeri arasında pozitif yönlü bir ilişki; kalınlıkla ise negatif yönlü bir ilişki olduğu görülmektedir (Denklemler 4). Maskelerde gözeneklilik değerinin artmasıyla su buharı geçirgenliği değeri de artmaktadır. Maske kalınlığı arttıkça ise su buharı geçirgenliği değeri azalmaktadır.

Tablo 4. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği doğrusal regresyon modeli özetleri

Hava Geçirgenliği			
Model	R	R²	Düzeltilmiş R²
1	0,999 ^a	0,999	0,996
^a : Tahminleyiciler: K, G, Gr			
Su Buharı Geçirgenliği			
Model	R	R²	Düzeltilmiş R²
1	0,962 ^b	0,925	0,919
^b : Tahminleyiciler: Sabit, K, G			

Regresyon modeli özetlerine göre (Tablo 4) cerrahi maskelerin hava geçirgenliklerinin; gramaj, kalınlık ve gözeneklilik değerleri ile %99,6 oranında, su buharı geçirgenliğinin ise gözeneklilik ve kalınlık parametreleri ile %91,9 oranında açıklanabildiği görülmüştür.

4. Sonuçlar ve Öneriler

COVID19 pandemisi ile yaşamımızda yeri oldukça kritik hale gelen cerrahi maskeler bireyleri hem zararlı partiküllerden hem de hastalık oluşturma riski olan çeşitli bakteri ve virüs benzeri mikroorganizmalardan koruma amaçlı kullanılan tekstil ürünleri olarak son yıllarda üzerlerinde odaklanılan bir malzeme ve ürün grubunu oluşturmaktadır. Bu çalışmada üç katlı, SMS yapıda ticari cerrahi maskelerin kullanıcının konforu ve korunması açısından önemli olan hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği özellikleri incelenmiştir. Kullanıcının kolay nefes alıp vermesinin bir parametresi olan hava geçirgenliği ve maskenin iç kısmında mikroorganizma gelişmesine neden olan nem birikimi ile ilgili bir karakteristik olan su buharı geçirgenlik değerlerinin cerrahi maskelerin kalınlık, gramaj ve gözeneklilik değerleri ile ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır. SEM analizi ile maskelerin morfolojik özellikleri incelenmiştir. Maskelerin üst katmanlarındaki lif çapları 17-31 µm, orta katmanlarındaki lif çapları 2-11 µm ve alt katmanlarındaki lif çapları ise 16-23 µm arasında değişmektedir. Buna göre, üç katmandan oluşan cerrahi maskelerin orta katmanındaki lif çaplarının, üst ve alt katmanlardaki lif çaplarına kıyasla daha ince olduğu söylenebilir. Hem üst hem de alt katmanda en ince lif çapı, 3 nolu maskede ölçülmüştür. SMS maskelerin spunbond tabakalarında bulunan bağlantı noktalarının tasarımının birbirinden farklı olduğu tespit edilmiştir. 1, 2 ve 3 nolu maskelerde bağlantı noktaları sırasıyla elips, kare ve karo şeklindedir.

Araştırmada incelenen cerrahi maske numunelerin hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği değerlerinin istatistiksel açıdan anlamlı düzeyde birbirinden farklı olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, cerrahi maskelerin hava ve su buharı geçirgenliğinin gözeneklilik, kalınlık ve gramaj gibi yapısal-fiziksel özelliklerden önemli ölçüde etkilendiğini göstermektedir. Hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliği açısından en düşük değere sahip maske 3 nolu maske iken, en yüksek geçirgenliğe sahip maske 1 nolu maske olarak belirlenmiştir. Maskelerin kalınlık ölçüm sonuçlarına göre, 3 nolu maskenin tüm katmanları, 1 ve 2 nolu maskelere göre daha yüksek kalınlık değerine sahiptir ve bu durum 3 nolu maskenin hava ve su buharı geçirgenlik değerlerinin daha düşük olmasında etkilidir. Maskelerin gramajlarını karşılaştırdığımızda en yüksek gramaj değerine 3 nolu maske, en düşük gramaj değerine ise 1 nolu maske sahiptir. Maskelerin gramaj değerleri arttıkça geçirgenlik değerleri de azalmıştır. Gözeneklilik genel olarak malzeme yapısındaki boşluğu ifade etmekte olup, maskelerin geçirgenlik özelliğini belirleyen bir faktördür. Maskelerin gözeneklilik değerleri sırasıyla %78,97, %77,34 ve %77,07 olarak ölçülmüştür. Maskelerin gözeneklilik değerleri arttıkça geçirgenlik özellikleri artmış ve en yüksek hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenliğine sahip maske, 1 nolu maske olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak; cerrahi maskelerin kalınlık ve gramaj değerlerindeki artış hem hava hem de su buharı geçirgenliğini azaltırken; gözeneklilikteki artış, hava ve su buharı geçirgenliğini arttırmaktadır.

Çalışmada maskelerin yapısal-fiziksel özelliklerinden hava geçirgenliği ve su buharı geçirgenlik özelliklerini tahminlemek için doğrusal regresyon analizleri yapılmıştır. Kalınlık, gramaj ve gözeneklilik bağımsız değişkenleri ile oluşturulan doğrusal regresyon modeli maskelerin hava geçirgenliğini %99,6 oranında açıklamakta olup, regresyon denklemi şu şekilde gösterilmektedir: $HG=4,434 \cdot G-238,979 \cdot K-1,844 \cdot Gr$. Kalınlık ve gözeneklilik bağımsız değişkenleri ile oluşturulan doğrusal regresyon modeli maskelerin su buharı geçirgenliğini %91,9 oranında açıklamaktadır. Su buharı geçirgenliği için regresyon modeli şu şekildedir: $SBG=-20,462+0,451 \cdot G-19,149 \cdot K$.

Üretim öncesi özellik tahminlemeye yönelik oluşturulan denklemler, üretim süreçlerinde hem malzeme hem de zamandan tasarruf sağlayarak maliyetlerin azaltılmasına ve malzeme özelliklerinin geliştirilmesine katkı sunar. Hava ve su buharı geçirgenliği gibi kullanıcı açısından önemli olan cerrahi maske özelliklerinin kalınlık, gramaj ve gözeneklilik gibi yapısal-fiziksel karakteristiklerle tahminlenmesi bu bağlamda kritik bir öneme sahiptir. Bununla birlikte maske performansı ve koruyuculuğu açısından bakteriyel veya viral filtrasyon verimliliği ve partikül tutma kapasitesinin önemi tartışılmaz olup, ileriki çalışmalar maskelerin konfor özellikleri, nefes alabilirlik ve nefes alma direnci gibi filtrasyon özelliklerinin birlikte incelenerek tahminlenmesini ve maskelerin uzun süre kullanımının maske performansı ve koruyuculuğu üzerindeki etkilerinin analizini, optimum kullanım süresinin belirlenmesini içerebilir. Gelecekte sürdürülebilir maske üretim yöntemleriyle, enerji tasarrufu ve çevresel etkiler göz önünde bulundurularak; geri dönüşüm, biyobozunur liflerin

kullanımına yönelik çalışmalar yapılabilir. Bakteriyel filtrasyonun yanı sıra ergonomik ve duyuşal özelliklerin geliştirildiğı, maske katmanlarına çeşitli nanopartiküllerin katkılандığı, yeni geliştirilen lif çeşitlerinin kullanıldığı inovatif maskeler üretilebilir. Bakteri ve virüs maruziyet durumunun takibine yönelik yapay zekâ sistemleriyle entegre edilmiş maskeler üzerine de çalışmalar gerçekleştirileceğı öngörülmektedir. Bu sayede hem sürdürülebilir hem kullanıcılara üst seviyede koruma ve konfor özellikleri sağlayan multifonksiyonel tıbbi tekstil ürünlerinin geliştirileceğı tahmin edilmektedir.

Yazarların Katkısı

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiğı Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Akça, B. (2023). *COVID 19 Pandemi Sürecinde Kullanımı Artan Tıbbi Maskelerin Yapısal Olarak İncelenmesi ve Karşılaştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Akca, C., and Katı, M. İ. (2023). Investigation of the relationship between the structural properties and air, water drop and particle permeability of different masks available in the market. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 19(4), 373-380.
- Al-Hassan, A. A. and Norziah, M. H. (2012). Starch–gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 108-117.
- Angelova, R. A., Mijorski, S., Stankov, P., Sofronova, D., Velichkova, R., Simova, I., and Markov, D. (2024a). Numerical simulation of the air permeability of protective face masks. *AIP Conference Proceedings*, 3034(1), 020016.
- Angelova, R. A., Sofronova, D., Dimova, M., Sofronov, Y., Velichkova, R., Stankov, P., and Simova, I. (2024b). Heat transfer through protective face masks and respirators. *AIP Conference Proceedings*, 3034(1), 080003.
- Angelova, R. A., Velichkova, R., Sofronova, D., Markov, D., Dimova, M. and Simova, I., (2023, September). Air permeability of protective face masks. *2023 XXXIII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)* (pp. 1-5). Sozopol, Bulgaria.
- Arora, S., and Majumdar, A. (2022). Face masks to fight against COVID-19 pandemics: A comprehensive review of materials, design, technology and product development. *Journal of Industrial Textiles*, 51(3_suppl), 3613S-3647S.
- ASTM E96/E96M-24a (2024). *Malzemelerin su buharı iletim oranının gravimetrik tayini için standart test yöntemleri*.

- ASTM UOP578-11 (2011). *Civa porozimetresi ile gözenekli malzemelerin otomatik gözenek hacmi ve gözenek boyutu dağılımı*.
- Aziz, U., Nor Affandi, N., Harun, A., Rahman, M., Indrie, L., and Bonnia, N. (2024). Facemask comfort enhancement with graphene oxide from recovered carbon waste tyres. *AUTEX Research Journal*, 24(1), 20230013.
- Bertuzzi, M. A., Vidaurre, E. C., Armada, M., and Gottifredi, J. C. (2007). Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 972-978.
- Bhattacharjee, S., Bahl, P., Chughtai, A. A., and MacIntyre, C. R. (2020). Last-resort strategies during mask shortages: Optimal design features of cloth masks and decontamination of disposable masks during the COVID-19 pandemic. *BMJ Open Respiratory Research*, 7(1), e000698.
- Celebioglu, A., Lawson, C. W., Hsiung, E. Z., Chowdhury, R., Altier, C., and Uyar, T. (2023). Antibacterial nanofibrous mat of pullulan/cinnamaldehyde-cyclodextrin inclusion complexes as a potential cloth mask layer with long-term storage stability and facile disposal property. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(30), 11269-11280.
- Celep, G., Yilmaz, F., and Tetik, G. D. (2022). Evaluation of some physical and tensile properties of commercial surgical masks. *Indian Journal of Fibre & Textile Research (IJFTR)*, 47(1), 125-130.
- Choudhury, A. K. R. (2017). 7-Repellent finishes, In A. K. R. Choudhury (Ed.), *Principles of Textile Finishing* (pp. 149-194). Woodhead Publishing Series in Textiles, United Kingdom: Woodhead Publishing.
- Chua, M. H., Cheng, W., Goh, S. S., Kong, J., Li, B., Lim, J. Y., and Loh, X. J. (2020). Face masks in the new COVID-19 normal: Materials, testing, and perspectives. *Research*, 7286735.
- Djeghdir, S., Peyron, A., Sarry, G., Leclerc, L., Kaouane, G., Verhoeven, P. O., and Pourchez, J. (2023). Filtration efficiency of medical and community face masks using viral and bacterial bioaerosols. *Scientific Reports*, 13, 7115.
- Epps, H. H., and Leonas, K. K. (2000). Pore size and air permeability of four nonwoven fabrics. *International Nonwovens Journal*, os-9(2), 1558925000OS-900215.
- Fadil, F., Affandi, N. D. N., Harun, A. M., and Alam, M. K. (2022). Improvement of moisture management properties of face masks using electrospun nanofiber filter insert. *Adsorption Science & Technology*, 2022, 9351778.
- Hamouda, T., Kafafy, H., Mashaly, H. M., and Aly, N. M. (2022). Breathability performance of antiviral cloth masks treated with silver nanoparticles for protection against COVID-19. *Journal of Industrial Textiles*, 51(9), 1494-1523.
- Han, Z., Wang, L., Liu, Y., Chan, T., Shi, Z., and Yu, M. (2023). How do three-layer surgical masks prevent SARS-CoV-2 aerosol transmission?. *Separation and Purification Technology*, 314, 123574.
- Kar, F., Fan, J., and Yu, W. (2007). Comparison of different test methods for the measurement of fabric or garment moisture transfer properties. *Measurement Science and Technology*, 18(7), 2033.
- Korkmaz, G., Kılınç, M., Razak, S. A., Ocak, M., Korkmaz, S., and Kut, Y. D. T. (2023). Comparison of the performance properties of spunlaid non-woven fabrics used as face mask, *The Journal of The Textile Institute*, 114(2), 250-256.
- Kulichenko, A. V. (2005). Theoretical analysis, calculation, and prediction of the air permeability of textiles. *Fibre Chemistry*, 37(5), 371-380.
- Lee, K. P., Yip, J., Kan, C. W., Chiou, J. C., and Yung, K. F. (2020). Reusable face masks as alternative for disposable medical masks: factors that affect their wear-comfort. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(18), 6623.
- Leonas, K. K., Jones, C. R., and Hall, D. (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.
- Li, Y., Wong, T., Chung, J., Guo, Y. P., Hu, J. Y., Guan, Y. T., Yao, L., Song, Q. W., and Newton, E. (2006), In vivo protective performance of N95 respirator and surgical facemask. *American Journal of Industrial Medicine*, 49(12), 1056-1065.
- McCullough, E. A., Kwon, M., and Shim, H. (2003). A comparison of standard methods for measuring water vapour permeability of fabrics. *Measurement Science and Technology*, 14(8), 1402-1408.
- Memon, H., Liao, S., Maryam, R., Patrucco, A., and Riccardi, C. (2024). Development of medical masks: performance, properties, and prospects. *Materials Advances*, 5(21), 8333-8350.
- Sekhar, S. C., Pabba, M., Tallam, A., Fatima, S., Butti, S. K., Vani, B., Sahu, N., and Sundergopal, S. (2023). Development of a reusable low-cost facemask with a recycled hydrophobic layer for preventive health care. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(13), 36325-36336.

- Sisodia, D., and Mittal, M. (2023). Optical microscopic methods for testing face mask efficacy for COVID-19. *Materials Today: Proceedings* (Article in press).
- Şevkan Macit, A. (2024). A study on multi-layered surgical masks performance: permeability, filtration efficiency and breathability. *Industria Textila*, 75(1), 57-65.
- Tarhan, Ö., and Şen R. (2022). Heat-denatured and alcalase-hydrolyzed protein films/coatings containing marjoram essential oil and thyme extract. *Food Bioscience*, 45, 101466.
- Tcharkhtchi, A., Abbasnezhad, N., Seydani, M. Z., Zirak, N., Farzaneh, S., and Shirinbayan, M. (2021). An overview of filtration efficiency through the masks: Mechanisms of the aerosols penetration. *Bioactive Materials*, 6(1), 106-122.
- Tharewal P. G., Landage S. M., and Wasif A. I. (2013). Application of nonwovens for air filtration. *International Journal of Advanced Research in IT and Engineering*, 2(2), 14-36.
- TS 391 EN ISO 9237 (1999). *Tekstil- Kumaşlarda hava geçirgenliğinin tayini*.
- Yang, A., Cai, L., Zhang, R., Wang, J., Hsu, P. C., Wang, H., Zhou, G., Xu, J. and Cui, Y. (2017). Thermal management in nanofiber-based face mask. *Nano Letters*, 17(6), 3506-3510.
- Wang, D., Sun, B. C., Wang, J. X., Zhou, Y. Y., Chen, Z. W., Fang, Y., and Chen, J. F. (2020). Can masks be reused after hot water decontamination during the COVID-19 pandemic?. *Engineering*, 6(10), 1115-1121.
- Zhang, Z., Ji, D., He, H., and Ramakrishna, S. (2021). Electrospun ultrafine fibers for advanced face masks. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 143, 100594.