










Effect of air pressure on nanofiber production in solution blowing method

Yusuf Polat^{1,2,3} , Murat Umut Yangaz² , Mehmet Durmuş Çalışır^{1,4} , Mehmet Zafer Gül² , Ali Demir¹ , Bülent Ekici² ,
Ali Kılıç^{1,5*} 

¹Istanbul Technical University, TEMAG Labs., 34437, Istanbul, Turkey

²Marmara University, Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, 34722, Istanbul, Turkey

³Erzurum Technical University, Faculty of Engineering and Architecture, Mechanical Engineering Department, 25050, Erzurum, Turkey

⁴Recep Tayyip Erdogan University, Faculty of Engineering, Electrical and Electronic Engineering Department, 53020, Rize, Turkey

⁵Areka Filtration Technologies LLC, 34467, Istanbul, Turkey

Highlights:

- Nanofiber production via novel solution blowing technique
- Analysis of air pressure on nanofiber production by Finite Volume Method
- Effect of air pressure on nanofiber diameter and morphology

Keywords:

- Solution blowing
- Nanofiber
- Finite volume method
- Air pressure
- Fluid dynamics

Article Info:

Research Article
Received: 15.10.2018
Accepted: 29.04.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.470850

Acknowledgement:

This study was supported by Areka LLC. and TUBITAK 118M035 project.

Correspondence:

Author: Ali Kılıç
e-mail: alikilic@itu.edu.tr
phone: +90 212 293 1300 / 2534

Graphical/Tabular Abstract

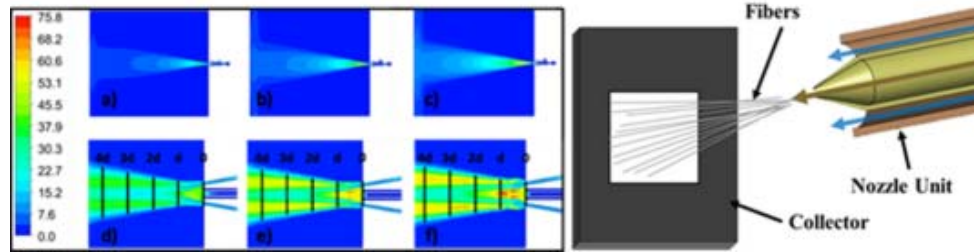


Figure A. Schematic illustration of solution blowing technique (right) and turbulence intensity distribution on the section plane (a, b, c) and around the nozzle tip (d, e, f) for air inlet pressure of 100, 300 and 600 kPa, respectively (left)

Purpose: In this study, the effect of air pressure on nanofiber diameter and morphology was studied for novel and scalable solution blowing technique via Finite Volume Methods.

Theory and Methods:

The turbulence intensity of compressed air has a significant effect on fiber diameter and morphology. It is expected that the increase in turbulence intensity (TI) will result in more agglomeration of nanofibers. In addition to this, a decrease in TI will result in droplet formation during nanofiber production. Effect of air pressure was analyzed via computational fluid dynamics (CFD) analysis by ANSYS® Fluent software and the results were compared with experimental studies.

Results:

Results of the study showed that air pressure has a significant effect on fiber diameter and morphology in solution blowing technique. For 100 kPa air inlet pressure, nanofiber formation was observed with a high amount of droplets. The reason behind that might be low driving force which is not enough to evaporate the solvent from blown polymer solution. In CFD analysis for 100 kPa, the TI was converged to zero at 8,75 cm from the nozzle tip. This distance was thought not enough for solvent evaporation. The average fiber diameter was found as 279±115 nm. With increased air inlet pressure from 100 kPa to 300 kPa, finer nanofibers (170±112 nm) were produced almost without droplets. In CFD analysis, the zero point of TI was calculated as 14.2 cm for 300 kPa. However, when the air inlet pressure increases above 300 kPa, both nanofiber diameter and the amount of agglomerated fibers increased. The average fiber diameter for 600 kPa was measured as 257±166 nm. This effect was attributed to higher TI which was also found as maximum (27.03 %) in CFD analysis. The TI became zero at 20.6 cm for 600 kPa. Additionally, as a result of high turbulence intensity, fiber collection efficiency was decreased in experimental studies.

Conclusion:

An increase in air pressure causes an increase on turbulence intensity based on the distance from nozzle to collector. It is found that there is a critical value of pressure and hence TI for obtaining the finest fiber diameter without droplets. Lower TI was found not sufficient to fiber formation because of inadequate solvent evaporation as a result of shorter zero-point distance of TI. On the other hand, air flow with higher TI breaks polymer solution into smaller volumes that are not able to produce nanofiber formation.



Çözeltiden üfleme ile nanolif üretim yönteminde hava basıncının nanolif üretimine etkisi

Yusuf Polat^{1,2,3}, Murat Umut Yangaz², Mehmet Durmuş Çalısır^{1,4}, Mehmet Zafer Gül², Ali Demir¹, Bülent Ekici², Ali Kılıç^{1,5*}

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, TEMAG Laboratuvarı, 34437, İstanbul, Türkiye

²Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 34722, İstanbul, Türkiye

³Erzurum Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

⁴Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, 53020, Rize, Türkiye

⁵Areka Filtrasyon Teknolojileri Ltd. Şti., 34467, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Yeni çözelti üfleme tekniği ile nanofiber üretimi
- Nanofiber üretimi üzerindeki hava basıncının Sonlu Hacim Metodu ile analizi
- Hava basıncının nanofiber çap ve morfoloji üzerindeki etkisi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 15.10.2018
Kabul: 29.04.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.470850

Anahtar Kelimeler:

Çözeltiden üfleme,
nanolif,
sonlu hacimler analizi,
hava basıncı,
akışkanlar dinamiği

ÖZET

Bu çalışmada çözeltiden üfleme tekniği (Solution Blowing Technique) ile üretilen nanoliflerin lif çapı ve morfolojisi üzerine uygulanan hava basıncının etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi ANSYS® Fluent yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Elde edilen HAD analizi sonuçları daha önce gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlara göre hava giriş basıncı 100 kPa'dan 300 kPa değerine çıkınca lif çapı azalmakta ve lif morfolojisi daha düzgün olmaktadır. Ancak, 300 kPa'dan 600 kPa değerine çıkınca hem lif çapı artmaktadır, hem de türbülans yoğunluğu (TY) arttığı için lif morfolojisinde topaklanmaların olduğu görülmektedir. 100 kPa değerinde ise havanın polimer çözeltilisini tahrik kuvvetinin yetersizliğinden dolayı damlacıklı yapıların olduğu görülmüştür. Aynı şekilde bu çalışmada hava basıncının etkisi sonlu hacimler metodu (SHM) ile incelenmiştir ve deneysel veriler ile kıyaslanmıştır.

Effect of air pressure on nanofiber production in solution blowing method

H I G H L I G H T S

- Nanofiber production via novel solution blowing technique
- Analysis of air pressure on nanofiber production by Finite Volume Method
- Effect of air pressure on nanofiber diameter and morphology

Article Info

Research Article
Received: 15.10.2018
Accepted: 29.04.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.470850

Keywords:

Solution blowing,
nanofiber,
finite volume method,
air pressure,
fluid dynamics

ABSTRACT

In this study, effect of air pressure on nanofiber diameter and morphology was studied for solution blowing technique. A computational fluid dynamics (CFD) analysis was realized via ANSYS® Fluent software, and the results were compared with experimental solutions. The results showed that an increase in air inlet pressure from 100 kPa to 300 kPa has significant effect on nanofiber diameter and morphology. In contrast, as the air inlet pressure increases above 300 kPa to 600 kPa, both nanofiber diameter increases, and the fiber agglomerations are observed due to high turbulence intensity. The droplets were observed at 100 kPa air inlet pressure due to low driving force applied to the polymer solution. The effects of air pressure on nanofiber diameter and morphology have been investigated by using finite volume method, and the results are compared with the experimental results.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nanolifler, çapları nanometre ölçeğinde olan (1µm altı) ve birim kütle için çok yüksek yüzey alanı sağlayan lif yapılarıdır. Bu yapılar kullanılan başlangıç malzemeleri, üretim yöntemleri ve üretim sonrası işlemler ile farklı fiziksel ve kimyasal özellikler kazanabilmektedir. Bu avantajlarından ötürü nanolifler filtrasyon-seperasyon [1], enerji depolama [2], biyomedikal [3], sensörler ve kompozitlerde takviye malzemeleri gibi farklı uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır [4-7].

Elektroüretim (electrospinning) nanolif üretiminde bilinen en eski yöntem olmasına rağmen sistemin üretim kapasitesinin düşüklüğü, çalışma ortamında yüksek voltajlı elektrik alan kullanımı gibi sebeplerden ötürü hem daha yüksek üretim kapasitelerine sahip (verimli) hem de daha güvenli yeni üretim yöntemleri araştırılmaktadır [8]. Santrifüj ile üretim [9], çözülden üfleme ile üretim (Şekil 1) [10] yöntemleri polimer çözültisinden nanolif üretimi yapılan yeni nesil üretim tekniklerinden bazıları olarak karşımıza çıkmaktadır. Özellikle hem yüksek üretim kapasitesi, hem de güvenlik zafiyeti olmaması sebebiyle çözülden üfleme ile üretim yöntemi gelecek çalışmaları için umut verici bir nanolif üretim yöntemi olarak görülmektedir.

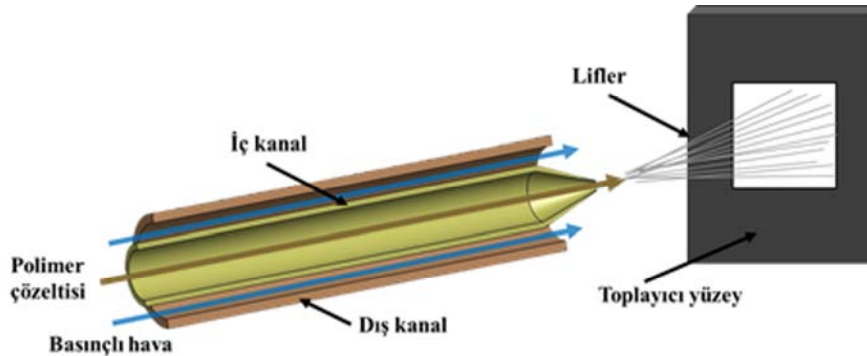
Çözülden üfleme ile nanolif üretim tekniğinde hazırlanan polimer çözültisi özel tasarlanan düze uçlarından basınçlı hava ile püskürtülmekte ve çözücü maddenin uzaklaşmasıyla bir toplayıcı yüzey üzerinde nanolif olarak toplanmaktadır (Şekil 1) Üretim esnasında lif yapısını ve morfolojisini etkileyen parametreler; genel olarak malzeme (çözelti viskozitesi ve konsantrasyonu), proses (hava basıncı, çözelti besleme debisi ve düze ile toplayıcı arasındaki mesafe) ve sistem parametreleri (düze geometrisi) olarak üç başlıkta incelenebilir. Bu parametrelerin içerisinde hava basıncı ana tahrik kuvvetini oluşturduğu için proses esnasında lif çapına ve morfolojisine ciddi etki etmektedir. Basınç değerinin beslenen malzeme miktarına göre optimum olması gerekmektedir; optimum değerden yüksek olunca damlacıklı lif morfolojisi oluşmakta, düşük olduğunda ise sürekli beslemeyi engellemektedir [10].

Bu çalışma temel olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonlarını içermektedir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, akışkan, ısı transferi ya da kimyasal reaksiyonlar, çok fazlı akışlar gibi daha özelleşmiş olguları içeren sistemlerin analizlerinin belirli hesaplama teknikleri kullanılarak bilgisayar destekli olarak simüle edilmesidir. HAD metodu, aerodinamik, hidrodinamik, ısıtma, soğutma, içten yanmalı motorlar ve gaz türbinlerindeki yanma ile karışma, ayrışma ve polimer akışları gibi birçok farklı alana uyarlanabilen esnek ve tutarlı bir araçtır [11].

Çalışma kapsamında yapılan HAD simülasyonları sonlu hacimler metoduna (SHM) dayanmaktadır. SHM kısaca, korunum ilkelerinin (kütle korunumu, momentum korunumu vb.) üç boyutlu bir sistemde belirli bir hacim kaplayan ve kontrol hacmi olarak nitelendirilen hacme uygulanmasıdır. SHM'de korunum denklemlerinin matematiksel karşılığı sonlu farklar yönteminden farklı olarak kısmi diferansiyeller yerine integraller içermektedir [12]. Çözümsel stabiliteyi korumak ve tutarlılığı sağlamak adına belirli ayrıştırma teknikleri kullanılarak korunum denklemleri iteratif metodlar yardımıyla çözülerek simülasyon tamamlanmaktadır.

Akışkan sistemler için, laminer akış ve türbülanslı akış olmak üzere iki tip akış karakteristiği mevcuttur. Bir de bunların arasında kalan geçiş bölgesi vardır. Bir akışın laminer veya türbülanslı olup olmadığı "Reynolds sayısı (Re)" ile belirlenir [13]. Farklı tip akışlar (açık kanal akışı, boru içi akış gibi) için farklı sınırlar söz konusu olur. Laminer akışta düzenli bir yapı vardır ve sınır şartları zamanla değişmediği sürece akış sabit bir şekilde devam eder. Re-sayısı kritik değeri aştığında, akışın yapısında radikal değişiklikler olur. Sabit sınır şartları geçerli olsa bile, akış davranışı kaotik ve rastgele olmaktadır. Hız ve diğer akış özellikleri belirsiz bir şekilde ve ölçekte değişim gösterir. Bu akış tipine türbülanslı akış denir [11].

Bu çalışmada, daha önceden yayınladığımız bir makale [10] referans alınarak hava basıncının nanolif üretimine ve çapına etkisi sonlu hacimler metodu ile incelenmiştir. Referans yayında belirtildiği üzere termoplastik poliüretan (TPU) filtrasyon, membran yapıları, koruyucu kıyafetler gibi çeşitli



Şekil 1. Çözülden üfleme ile nanolif üretim metodunun şematik gösterimi (AeroSpinner L1.0)

(Schematic representation of nanofiber production method by solution blowing) [10]

uygulamalarda kullanıldığından çözümlenmiş üfleme yöntemi ile nanolif üretilebilmesi için parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çözelti hazırlanırken TPU ağırlıkça % 10 olacak şekilde dimetilformamid (DMF) çözeltisi içerisinde 80°C’de manyetik karıştırıcı ile karıştırılarak çözülmüştür. Farklı hava basınçları (100, 300, 600 kPa) uygulayarak üretilen nanoliflerin lif çapları, bu çalışmadaki hava akış hızı ve türbülans yoğunluğu parametrelerinin incelendiği sonlu hacimler metodu sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. TEORİK METOT (THEORETICAL METHOD)

Simülasyonda sonlu hacimler metodu (FVM, Finite Volume Methods) kullanan bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan ANSYS® Fluent 17.2 kullanılmıştır. Yapılan sayısal analiz için gerekli bünye denklemleri ise aşağıda belirtilmiştir.

- Kütle Korunumu [11] (Eş. 1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Burada ρ yoğunluğu, \vec{v} hız vektörünü temsil etmektedir. Denklem kütle korumunun genel halidir ve sıkıştırılabilir akışlar için de geçerlidir.

- Momentumun Korunumu [11] (Eş. 2):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho v \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) + \rho \vec{g} + \vec{S}_M \quad (2)$$

Momentumun korunumu denkleminde $\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v})$ yoğunluk ve hızın zamana göre değişimini, $\nabla \cdot (\rho v \vec{v})$ terimi konveksiyonu, ∇p basınç değişimini, $\nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v})$ ise difüzyonu ifade etmektedir. Ayrıca μ dinamik viskoziteyi, $\rho \vec{g}$ yer çekimsel kuvveti, \vec{S}_M ise bunların dışında kalan momentum kaynaklarını temsil etmektedir. Bünye kuvvetleri de (sıvı üzerine etki eden dış kuvvetleri), elektromanyetik kuvvetler, santrifüj kuvvetler, koryolis (coriolis) kuvvetlerinden oluşup, bu kategoriye girmektedir.

- Enerji Denklemi [11] (Eş. 3):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho i) - \nabla \cdot (\rho i \vec{v}) = p(\nabla \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (k \nabla T) + \varphi + S_i \quad (3)$$

Ayrıca, hal denklemleri de aşağıdaki gibidir.

- Hal Denklemleri [11] (Eş. 4):

$$p = p(\rho, T) \text{ ve } i = i(\rho, T) \quad (4)$$

Enerji denkleminde $\frac{\partial}{\partial t} (\rho i)$, zamana bağlı lokal enerji değişimini, $\nabla \cdot (\rho i \vec{v})$ terimi ise konveksiyonu ifade etmektedir. Burada i , iç enerjiyi, $p(\nabla \cdot \vec{v})$ terimi basınçtan kaynaklanan işi, $\nabla \cdot (k \nabla T)$ ısı akısını (difüzyon) ve

φ dağılma fonksiyonunu gösterir. Son olarak S_i terimi de bir kaynak terimidir.

- k- ω SST (Shear Stress Transport) Türbülans Modeli [11, 14]:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \nabla \cdot (\rho k \vec{v}) = P_k - \beta^* \rho \omega k + \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \nabla \cdot (\rho \omega \vec{v}) = P_\omega - \beta_i \rho \omega^2 + \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega,1}} \right) \nabla \omega \right) + 2(1 - F_1) \frac{\rho}{\omega \sigma_{\omega,2}} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} \quad (6)$$

Eş. 5, k ya da türbülans kinetik enerji denklemdir. Eş. 6 ise, ω veya türbülansın spesifik dağılma oranına ait denklemdir. Eş. 5 ve 6'ya ait bazı değişkenler aşağıda verilmiştir:

$$P = \left(2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) \quad (7)$$

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max\left(\frac{1}{a^*}, a_1 \omega\right)} \quad (8)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \quad (9)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

Yukarıdaki k- ω modeline ait denklemlerde (Eş. 5 ve Eş. 6), k denklemi (Eş. 5) içinde yer alan k türbülans kinetik enerjisini, ve ω denklemindeki (Eş. 6) ω spesifik dağılma oranını, ve her iki denklemdede yer alan μ dinamik viskoziteyi, μ_t türbülans viskozitesini sembolize etmektedir. Son olarak F_1, F_2 karışım fonksiyonunu ifade etmektedir. k ve ω denklemlerini genel olarak açıklamak gerekirse:

k ya da ω 'nın değişim oranı + k veya ω 'nın konveksiyonla taşınımı = k ya da ω 'nın oluşum oranı - k veya ω 'nın dağılma oranı + k ya da ω 'nın türbülanslı difüzyonla taşınımı Eş. 6'da, denklemin sağ tarafındaki sonuncu terim, ekstra bir kaynağı ifade etmektedir. Bu terim, karşı difüzyon terimi olarak nitelendirilmekte olup, ε denklemindeki difüzyon teriminde $\varepsilon = k\omega$ dönüşümü yapılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Denklemlere ait bazı katsayılar ise Tablo 1'deki gibidir. Diğer katsayılar standart k- ω modeliyle aynıdır.

Tablo 1. k ve ω denklemlerine ait bazı katsayılar (Coefficients for k and ω equations)

$\sigma_{k,1} = 1,176$	$\sigma_{\omega,1} = 2$	$\beta_{i,1} = 0,075$	$\beta^* = 0,09$
$\sigma_{k,2} = 1$	$\sigma_{\omega,2} = 1,168$	$a_1 = 0,31$	$\beta_{i,2} = 0,083$

2.1. Çözümde Kullanılan Geometriye Ait Detaylar (Details of the Geometry Used in the Analysis)

Oluşturulan geometri simetrik olduğundan sadece çözüm hacminin yarısı alınarak, element sayısı azaltılmış ve çözüm süresinde belirgin bir düşüş sağlanmıştır. Şekil 2'de analizi

gerçekleştirilen düzenin tam kesit düzlemindeki görüntüsü verilmiştir. Düzeye hava girişi ve toplayıcı yüzey şeklinde belirtilmiştir. Basıncı hava düzeden çıkar çıkmaz atmosfer ortamına açılmaktadır.

2.2. Ağ Yapısı (Mesh Structure)

Ağ yapısı simülasyonun verdiği sonucu hem stabilite hem de tutarlılık açısından önemli oranda etkilediği için dikkat edilmesi gereken bir unsurdur. Bu aşamada gradyanların yüksek olduğu ve sınır tabaka ile ona yakın bölgelerdeki ağ yapısı daha küçük hücrelerle ya da başka bir deyişle daha yoğun bir yapıda oluşturulmalıdır. Ağ yapısı iyileştikçe sonuçlardaki değişim azalacaktır ve belirli bir değere yakınsayacaktır. Buna çözümün ağ yapısından bağımsız olma durumu denmektedir. Çözümün ağ yapısından (grid structure) bağımsız olmasını sağlamak amacıyla 4 farklı yoğunlukta ağ denenmiştir. Geometri, diğer tip hücrelere göre iyi bir en-boy oranına sahip ve düşük sayıda asimetrik hücreler meydana getiren polihedra tipi 1261886 hücreden oluşan bir yapıyla sonlu hacimlere ayrılmıştır. Tablo 2’de bu detaylar 100 kPa hava basıncı için verilmiştir. Şekil 3’te detaylı olarak ağ yapısı görülebilmektedir.

Tablo 2’den de anlaşılacağı gibi denemesi yapılan 3. ile 4. ağ yoğunluğu arasındaki farklar ihmal edilebilecek

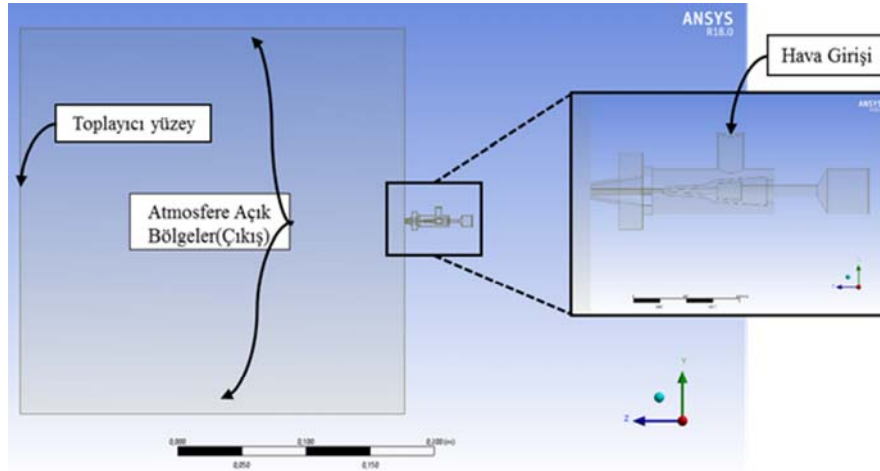
seviyelerdedir. Dolayısıyla, 3. ağ ile yapılacak çözümlerden alınacak sonuçların yeterli olabileceği ve çözümün ağ yapısından bağımsız olduğu kararlaştırılmıştır.

Tablo 2. 100 kPa için dört farklı ağ yapısına ait birincil sonuçlar (Primary results of four different mesh structures for 100 kPa)

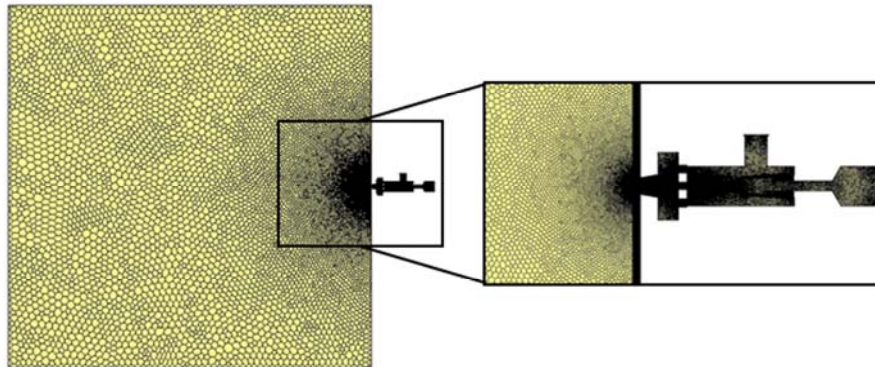
Deneme numarası	Hücre Sayısı	Maksimum Hava Çıkış Hızı (m/s)	Çıkıştaki Ortalama TKE (m ² /s ²)
1	871695	292,4	0,3063
2	1106963	283,1	0,2594
3	1261886	279,6	0,2332
4	1736844	278,7	0,2301

2.3. Çözüm Ait Parametreler ve Sınır Şartları (Parameters Used in Solution and Boundary Conditions)

Bu çalışmada kullanılan çalışma şartları ve sınır şartları Tablo 3’te verilmiştir. Hava akışı geometrinin dar kısımlarında uygulanan çalışma basınçları nedeniyle yüksek hızlara çıkmaktadır. Bu nedenle hava sıkıştırılabilir ideal gaz olarak kabul edilmiş ve kinetik teoriye bağlı olarak özgül ısı kapasitesi, ısıl iletkenlik ve viskozite değerleri üzerindeki değişimler çözüm boyunca hesaplanmıştır.



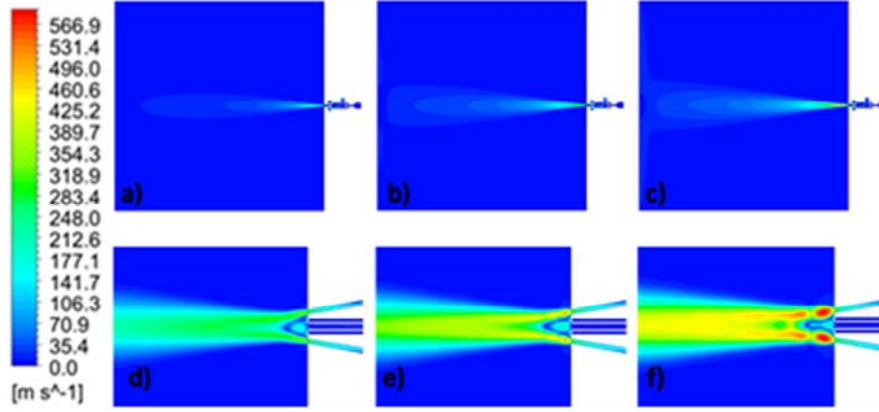
Şekil 2. Simülasyonu yapılan hacime ait geometri (The geometry used in the simulation)



Şekil 3. Çözümüne ait ağ yapısı (Mesh structure of the analysis)

Tablo 3. Çalışma ve sınır şartları (Process and boundary conditions)

Çalışma Şartları	Sınır Şartları		
Atmosferik Basınç	101,325 kPa	Hava Besleme Basıncı (gösterge basıncı)	100, 300 & 600 kPa
Sıcaklık (Çıkış)	300 K	Hava Besleme Sıcaklığı	300 K

**Şekil 4.** Kesit düzleminde (a, b, c) ve düze ucunun (d, e, f) etrafında sırasıyla 100, 300 ve 600 kPa hava giriş basıncı için hız dağılımı

(Velocity distribution on the section plane (a, b, c) and around the nozzle tip (d, e, f) for air inlet pressure of 100, 300 and 600 kPa, respectively)

Türbülans modeli olarak sınır tabaka içinde $k-\omega$, dış bölge ile sınır tabaka dışındaki bölgelerde ise $k-\varepsilon$ denklemlerinin kullanıldığı, denklemleri yukarıda verilen $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) modeli [15] tercih edilmiştir. Bu modelin kullanılmasındaki amaç, $k-\varepsilon$ denkleminin duvara yakın bölgelerde ve özellikle ters basınç gradyanları oluşan sınır tabakalarda yetersiz kalan çözümüleme performansını iyileştirmektir. Reynolds gerilmeleri hesabı ve k denklemi, Wilcox'un orijinal $k-\omega$ modeliyle [16] aynı olup, tek fark olarak, ω -denklemini, ε -denkleminde, $\varepsilon = k\omega$ dönüşümünü yaparak elde etmiştir. Modelin kullandığı, revize edilmiş model sabitleri ile birlikte, sayısal stabilite sorunlarını çözüme amaçlı karışım fonksiyonları (duvara yakın ve uzak bölgelerde hesaplanan eddy viskozite değerlerindeki farkların yol açtığı sayısal kararsızlıkları aşmak için) ve ters basınç bölgeleri ile durgunluk noktalarında çözüm performansını artırma amaçlı limitleyicileri (eddy viskozitesi ve türbülans kinetik enerjisi limitleyicileri) gibi belirli yaklaşımları vardır. Bu çalışmada, kullanılan $k-\omega$ SST modeli'ne ait standart sabitler (Tablo 1) kullanılmış herhangi bir modifikasyon yapılmamıştır.

Çözümler zamandan bağımsız olup, ayrıştırma (discretization) için 2. mertebe upwind algoritmalar kullanılmıştır. Hız ve basınç arasındaki düzeltmeler "Coupled" algoritması yardımıyla çözülmüştür. Çözümlerdeki stabilite problemlerini aşmak amacıyla uygun röleksasyon katsayıları verilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Tüm simülasyonlar zamandan bağımsız olarak çözülmüş ve sadece havanın akış karakteristiği incelenmiştir. Sayısal analiz sonuçları ele alındığında hız dağılımları, Şekil 4'te

görülebilmektedir. Oluşan hız dağılımı tahmini olarak olması gereken davranışları göstermektedir. Düzenin çıkış çapı sabit tutulduğu sürece, beslenen hava debisi arttıkça daha çok havanın çıkması beklenmektedir. Çıkış kesit alanı giriş kesit alanından küçük olduğu için hava basınç kaybetmektedir ve hız kazanmaktadır. Giriş basınç değeri arttıkça düzeye beslenen hava miktarı artacağı için hava düzeden artan hızla çıkacaktır. Simülasyon sonuçlarına da bakılınca artan hava giriş basıncı ile hava çıkış hızının arttığı görülmüştür. Maksimum hızlar kanalın en dar olduğu bölgelerde gözlemlenmiş olup, maksimum değerler düşük basınçtan yüksek hava giriş basıncına göre sırasıyla, 280, 356 ve 566 m/s civarlarında oluşmaktadır. Düze çıkışındaki ortalama hızlar ise sırasıyla, 231,1, 304,8 ve 361,8 m/s olarak elde edilmiştir. Şekil 4a, Şekil 4b ve Şekil 4c' de düze ucu ile 300 mm uzaklıktaki toplayıcı yüzey arasında havanın hızındaki değişim görülmektedir. Şekil 4d, Şekil 4e ve Şekil 4f'de ise düze ucunda hava akışının görüntüsüne yaklaştırılarak akış hız dağılımı gözlemlenmiştir.

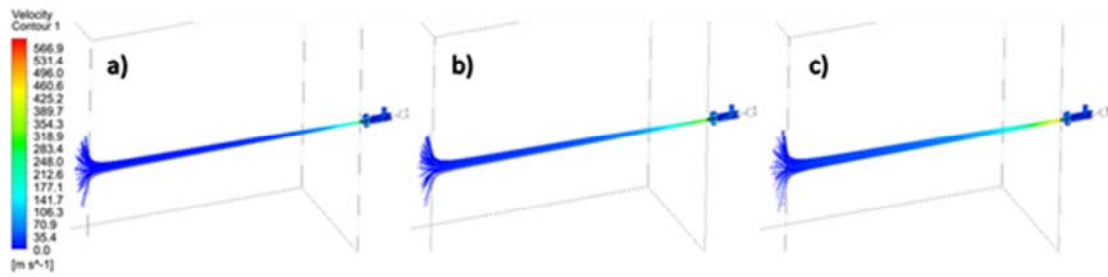
Şekil 4a, Şekil 4b ve Şekil 4c'de görüldüğü üzere çıkıştaki havanın hızı 100, 300 ve 600 kPa hava giriş basınçları için sırasıyla yaklaşık 90 mm, 140 mm ve 205 mm mesafelerde sıfıra yaklaşmaktadır. Düze ucu ile toplayıcı arası 300 mm olarak analizler yapılmıştır ve Şekil 5'te görüldüğü üzere hava toplayıcı yüzeyine çarptıktan sonra etrafa yayılmaktadır ve toplanan nanolifleri dağıtabilmektedir. Bu yüzden çalışma mesafesi basınç değerine göre belirli bir minimum mertebede olmalıdır. Bu çalışma için mesafe 300 mm değerinden büyük olursa üretilen nanoliflerin hızı sıfıra yaklaşacağı için nanolifler toplayıcı yüzeyine ulaşamayacaktır ve lif toplama verimi azalacaktır. Sonuç olarak hava giriş basıncına göre düze çıkışında oluşan hız değerleri nanolif ağı oluşumu için gerekli mesafeyi ve morfolojiyi etkilemektedir.

Türbülans yoğunluğu (TY) sonuçları ele alındığında genel trende göre, beklenildiği gibi daha yüksek basınçta hava beslemesi ile sistemde daha yüksek seviyelerde oluşmaktadır. Buna rağmen, düzenin tam çıkış noktasındaki ortalama türbülans yoğunluğu 100, 300 ve 600 kPa basınçlar için sırasıyla, %12,85, %12,48 ve %11,67 olarak elde edilmiştir. Basınç değeri 600 kPa değerine ulaştığında diğer durumlarla kıyasla düze çıkışında en düşük TY gözlemlenmektedir. Tablo 4'te görüldüğü üzere düze ucu ile toplayıcı arasında (300 mm) 600 kPa için türbülans yoğunluğunun ortalama ve toplam değeri daha yüksektir. Çünkü yüksek basınçta sistemde oluşan enerji daha yüksektir. Yine 100, 300 ve 600 kPa için her birinin türbülans yoğunluğunun yaklaşık sıfırlandığı mesafeye göre ortalamaya bakıldığında zaman hava giriş basıncı artınca ortalama TY'da artmaktadır (Tablo 4).

Şekil 6f'de belirtilen d mesafesi düzeden hava çıkış çapıdır ve düze çıkışından 0, d, 2d, 3d ve 4d uzaklıklardaki TY değerleri analiz edilerek düze çıkışına yakın bölgede hava akış karakteristiğinin lif çapına ve morfolojisine etkisi incelenmiştir. Belirli mesafelerde hesaplanan TY değerleri buldukları mesafedeki etkili akış olan dikey uzunluk boyunca incelenmiştir (Şekil 6a, Şekil 6b, Şekil 6c, Şekil 6d ve Şekil 6e). Şekil 6'da görüldüğü üzere düze çıkışında 100 kPa ve 300 kPa hava giriş basıncı değerleri için TY daha yüksek olmasına rağmen d mesafesinden sonra 600 kPa için TY daha yüksektir. 100 kPa için ise düze çıkışında TY yüksek olsa da sonrasında ani bir azalmadan sonra diğer değerlere göre daha yavaş artış göstermektedir. 300 kPa hava giriş basıncına göre türbülans yoğunluğu değerlendirildiği zaman ise d mesafede diğer basınç değerlerine göre daha düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Sonrasındaki mesafelerde ise 100 kPa ve 600 kPa değerlerinin TY'lerinin arasında değerlere sahiptir. Düze çıkışından d mesafe uzaklıkta 300 kPa hava giriş basıncı için TY'nin düşük

olması polimer çözeltisi içindeki çözücünün aniden uzaklaşması diğerlerine göre daha az olduğu için polimer daha uzun süre yük altında şekillenerek incelmektedir. 600 kPa değerinde ise türbülans yoğunluğu çok olduğu için nanolifler topaklanmaktadır ve morfolojik olarak kusurlu olmaktadır. Buna ek olarak 600 kPa hava giriş basıncı için türbülansın sıfırlandığı mesafe (205,9 mm, Tablo 4) uzun olduğu için ve TY değerleri yüksek olduğu için polimer çözeltisi parçalanmaktadır ve lif yapısının oluşması zorlanmaktadır. Bu durumun sebebi polimer çözeltisi türbülansın etkisiyle daha küçük damlacıklar haline geldiğinde, her bir damlacıktaki polimer miktarı lif oluşumu için yeterli olmamaktadır. Böylece 600 kPa değerinde daha az miktarda ve topaklanmış yapıda nanolifler üretilmektedir. Deneysel verilere bakıldığında 600 kPa değerinde daha az lif toplandığı gözlemlenmiştir [10].

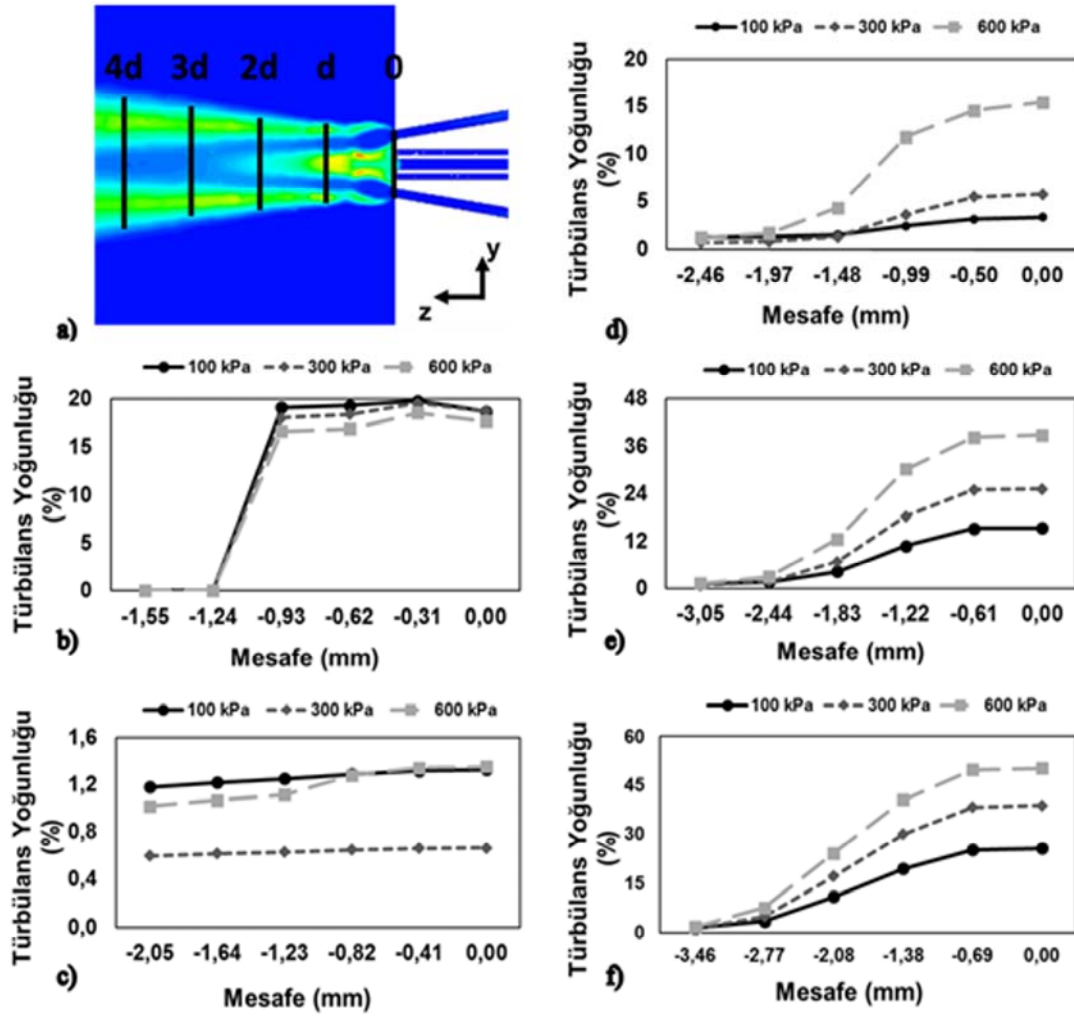
Sistemin orta kesitindeki türbülans yoğunluğu dağılımı Şekil 7'den görülebilmektedir. Fakat türbülansın dağılımı veya yok oluşu 600 kPa'lık sistemde Şekil 7c'de görüldüğü üzere diğerlerine göre daha geç olmaktadır. Hava giriş basıncı 100 kPa için TY değeri 87,5 mm'de yaklaşık sıfır olurken, 300 kPa için 141,9 mm'de ve 600 kPa için ise 205,9 mm de yaklaşık sıfır olmaktadır (Tablo 4). TY'nin sıfırlandığı mesafelerde görüldüğü üzere basınç arttıkça TY artmaktadır. Şekil 7a, Şekil 7b ve Şekil 7c'de görüldüğü üzere hava akışı kesit düzlem üzerinde 600 kPa'da daha geniş bir alanda ilerlemektedir. Hava düzeden çıktıktan sonra 600 kPa düze giriş basıncına göre 300 kPa'da düze çıkışında daha yüksek TY'ye sahiptir. Fakat d mesafe sonra 300 kPa için bu değer diğer basınç değerlerine göre daha çok azalmaktadır ve sonraki mesafelerde 600 kPa değerinde en yüksek seviyelerde olmaktadır. Bunlara ek olarak 300 kPa ve 600 kPa hava giriş basıncı durumlarında düzenin hemen çıkışı ile düze çıkışından d mesafe uzaklıkta şok dalgaları oluşmaktadır (Şekil 4e, Şekil 4f).



Şekil 5. a)100, b) 300 ve c) 600 kPa hava giriş basıncı için 3 boyutlu hız akış çizgileri
(3D velocity flow lines for a) 100, b) 300 and c) 600 kPa air inlet pressure)

Tablo 4. Farklı hava giriş basınçları için TY'nin ortalama değerleri
(Average TI (turbulence Intesity) values for different air inlet pressures)

Ortalama TY (%)				
Hava giriş basıncı (kPa)	Düze ucu – toplayıcı arası (300 mm)	Düze – ≈0 TKE arası (100 kPa için) (87,5 mm)	Düze – ≈0 TKE arası (300 kPa için) (141,9 mm)	Düze – ≈0 TKE arası (600 kPa için) (205,9 mm)
100	9,85	19,56		
300	15,54		24,31	
600	21,54			27,03



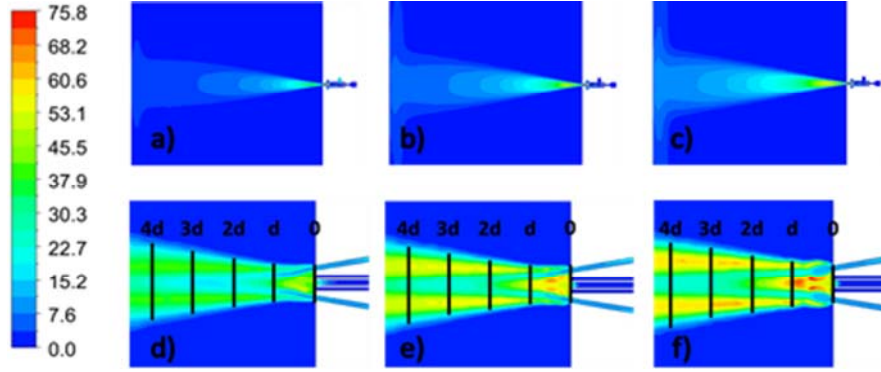
Şekil 6. a) Düze çıkışındaki d'ye bağlı mesafelerin temsili gösterimi ve farklı mesafelerdeki türbülans yoğunluğunun y yönüne bağlı olarak değişimi: b) düzenin hemen çıkışında, düze çıkışından c) d, d) 2d, e) 3d, ve f) 4d
(a) Schematic representation of the distances from the nozzle tip and variation of turbulence intensity at different distances depending on the direction y: b) on the nozzle tip and at distance c) d, d) 2d, e) 3d and f) 4d)

Türbülans yoğunluğu arttıkça liflerin birbirine tutunarak topaklanması da artmaktadır. 600 kPa hava giriş basıncı için düze çıkışında lifler daha geniş bir alanda hareket etmektedir. Bu durumun sonucu olarak da lif topaklanması ve lif toplama verimliliği azalmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere deneysel çalışmada da aynı şekilde lif çapının arttığı ve lif morfolojisinde topaklanmalar olduğu gözlemlenmiştir [10]. Hava giriş basıncının 100 kPa gibi az olduğu durumlarda belirli mesafeden sonra türbülans yoğunluğu değerleri düşük seviyelerde (Şekil 6c, Şekil 6d, Şekil 6e) kaldığı için çözelti uzaklaşması zorlaşmaktadır ve damlacıklı bir yapı oluşmaktadır. TY yaklaşık 90 mm gibi kısa bir mesafede sifira yaklaştığı için üretilen lif daha kısa sürede incelmeye maruz kalmaktadır. Hava basıncı bu kısa mesafede çözücüyü uzaklaştırmak için yeterli olmadığı için lif morfolojisi ve çapı olumsuz etkilenmektedir.

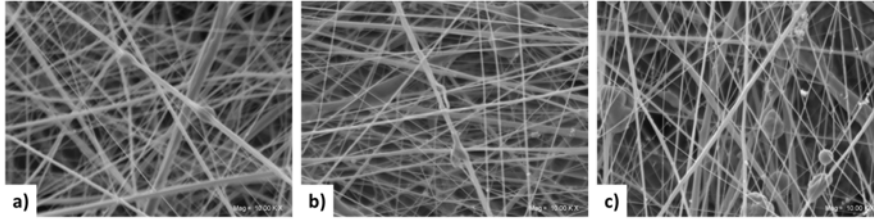
Daha önce gerçekleştirilen çalışmada [10] elde edilen 100, 300 ve 600 kPa basınç değerleri için sırasıyla 279 ± 115 nm, 1726

170 ± 112 nm ve 257 ± 166 nm ortalama lif çapında dokusuz kumaşlar üretilmiştir [10]. Bu çalışmada ise hava giriş basıncının deneysel sonuçlar ile ilgili olduğu görülmüştür. Üretilen liflerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri Şekil 8'de verilmiştir. Görüntüler 10kX büyütmede alınmıştır ve Şekil 8'de görüldüğü üzere 600 kPa hava basıncında üretilen liflerde topaklanmaların arttığı gözlemlenmiştir.

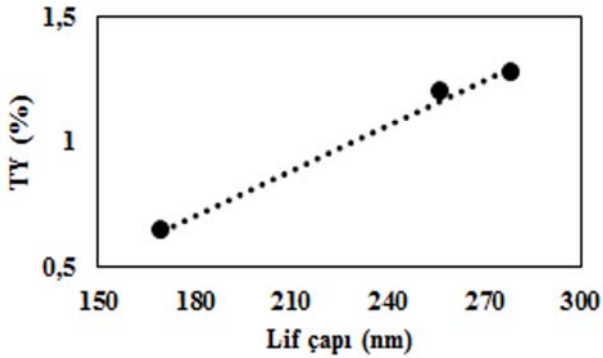
Hava hızının değişmesi çalışma mesafesini ve lif morfolojisini etkilerken TY'nin değişmesi lif çapını ve morfolojisini etkilemektedir. Şekil 9'da görüldüğü üzere düze çıkışından d mesafe uzaklıktaki TY ile lif çapı arasında doğrusal bir ilişki vardır. TY arttıkça lif çapı artmaktadır. Tablo 4'te ise hava giriş basıncı ile TY arasındaki ilişki görülmektedir. Düzenin hemen çıkışında TY değerleri hemen hemen aynıyken d mesafede ani bir düşüş olmaktadır ve sonrasında belirli bir denge ile artmaktadır. Bu duruma göre düze çıkışı ve d mesafe arasında oluşan şok dalgaları lif çapına etki etmektedir.



Şekil 7. Kesit düzleminde (a, b, c) ve düze ucunun (d, e, f) etrafında sırasıyla 100, 300 ve 600 kPa hava giriş basıncı için türbülans yoğunluğu değişimi (Turbulence intensity distribution on the section plane (a, b, c) and around the nozzle tip (d, e, f) for air inlet pressure of 100, 300 and 600 kPa, respectively)



Şekil 8. a) 100 kPa b) 300 kPa ve c) 600 kPa hava basıncında üretilen nanoliflerin taramalı elektron mikroskop görüntüleri (SEM images of nanofibers produced at a) 100 kPa b) 300 kPa, and c) 600 kPa air pressure)



Şekil 9. Düze çıkışından d mesafe uzaklıktaki TY-lif çapı ilişkisi (The relationship of TY-fiber diameter at the distance of d)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Hava basıncı, çözültiden üfleme ile nanolif üretim tekniğinde ana tahrik kuvvetini oluşturmaktadır. Düze girişindeki basınç, çıkışta hıza dönüşmektedir. Hava hızı polimer çözültisi üzerinde ana tahrik kuvvetini oluşturmaktadır. Bu sebepten elektroüretim tekniğine [17] alternatif olan yenilikçi nanolif üretim tekniği olan çözültiden üfleme ile nanolif üretim tekniğinde havanın akış karakteristiği en önemli parametredir. Yenilikçi bir yöntem olduğu için literatürde sayısal ve analitik çalışmalar çok kısıtlıdır. Endüstriyel olarak nanolif üretimine uygun olan bu yöntemin sayısal analizi, yöntemi detaylıca anlamak için önemlidir [18]. Hava basıncının artışı TY değerini artırdığı için nanolif üretiminde oluşan tahrik kuvveti de artmaktadır. Bu sebepten

basınç değeri 100 kPa'dan 300 kPa'a çıkınca lif üzerine gelen çekim kuvveti de arttığı için lif çapı 279 ± 115 nm'den 170 ± 112 nm'ye düşmektedir. Bu durumun aksine hava basıncı 300 kPa'dan 600 kPa'a çıkınca ortalama lif çapı da 170 ± 112 nm den 257 ± 166 nm değerine çıkmaktadır. 600 kPa gibi yüksek hava giriş basıncı değerlerinde TY hem liflerin topaklanmasına (Şekil 8c) hem de daha geniş alana yayılarak toplayıcı yüzeyde birikmelerini engellemesi sebebiyle dezavantaj oluşturmaktadır. TY 300 kPa'ın üzerine çıkınca hava düze çıkışındaki damlacık halindeki polimer çözültisini parçalayarak daha küçük damlacıklara ayırmaktadır. Bu durumda yeterli polimer olmadığı için nanolif üretiminde azalmalar olmaktadır. Basınç değeri 100 kPa olduğunda ise hava basıncı çözücüye uzaklaştırmak için yeterli olmamaktadır ve damlacıklı yapı elde edilmektedir. Fakat 600 kPa değerinde TY diğerlerine göre daha uzun mesafede etki ve daha yüksek değerlerde olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum da polimerin nanolif haline dönüştükten sonrada nanoliflerin topaklanmasına sebep olmaktadır. 300 kPa değerinde ise havanın TY'si hem çözücüye uzaklaştıracak hem de topaklanmasına sebep olmayacak seviyededir. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde çözültiden üfleme ile nanolif üretim tekniğinde basıncın artması belirli bir değere kadar nanolif çapı ve morfolojisini olumlu yönde etkilerken, belirli bir değerden sonra olumsuz etki göstermektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Düze tasarımında yardımlarından ötürü Areka Filtrasyon Teknolojileri'ne teşekkürü borç biliriz. Bu çalışma TÜBİTAK 118M035 nolu proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Akgül Y., Polat Y., Canbay E., Demir A., ve Kilic A., Nanofibrous composite air filters, Editör: Jawaid M. ve Khan M.M., *Polymer-based Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, Woodhead Publishing, 553-567, 2018.
2. Stojanovska E., Ozturk N. D., Polat Y., Akbulut H., ve Kilic A., Solution blown polymer/biowaste derived carbon particles nanofibers: An optimization study and energy storage applications, *Journal of Energy Storage*, 26, 100962, 2019.
3. Gökçe E.C., Akgül Y., Kiliç A., ve Açma E., Antibakteriyel Nanolif Yapılarının Çözeltiden Üfleme Sistemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu, *Tekstil ve Mühendis*, 25 (110), 78-85, 2018.
4. Stojanovska E. vd., A review on non-electro nanofibre spinning techniques, *RSC advances*, 6 (87), 83783–83801, 2016.
5. Teo W.E., ve Ramakrishna S., A review on electrospinning design and nanofibre assemblies, *Nanotechnology*, 17 (14), R89, 2006.
6. Thenmozhi S., Dharmaraj N., Kadirvelu K., ve Kim H. Y., Electrospun nanofibers: New generation materials for advanced applications, *Materials Science and Engineering: B*, 217, 36-48, 2017.
7. Kenry, ve Lim C. T., Nanofiber technology: current status and emerging developments, *Progress in Polymer Science*, 70, 1-17, 2017.
8. Akgül Y., ve Kilic A., Polivinil Alkol (PVA) Nanoliflerin Üretiminde Yenilikçi Bir Yaklaşım: Santrifüjlü Lif Üretimi, *Tekstil ve Mühendis*, 25 (109), 30-36, 2018.
9. Gundogdu N.S., Akgul Y., ve Kilic A., Optimization of centrifugally spun thermoplastic polyurethane nanofibers for air filtration applications, *Aerosol Science and Technology*, 52 (5), 515–523, 2018.
10. Polat Y., vd., Solution blowing of thermoplastic polyurethane nanofibers: A facile method to produce flexible porous materials, *Journal of Applied Polymer Science*, 133 (9), 43025, 2016.
11. Versteeg H. K. ve Malalasekera W., *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, 2007.
12. Anderson D., Tannehill J.C., ve Pletcher R. H., *Computational fluid mechanics and heat transfer*. Taylor & Francis, 2016.
13. Reynolds O., An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels, *Philosophical Transactions of the Royal society of London*, 174, 935–982, 1883.
14. Menter F.R., Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, *AIAA journal*, 32 (8), 1598–1605, 1994.
15. Menter F. R., Kuntz M., ve Langtry R., Ten years of industrial experience with the SST turbulence model, *Turbulence, heat and mass transfer*, 4 (1), 625–632, 2003.
16. Wilcox D.C., Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models, *AIAA journal*, 26 (11), 1299–1310, 1988.
17. Köysüren H.N. ve Köysüren Ö., Preparation of polyvinyl alcohol composite nanofibers and solid-phase photocatalytic degradation of polyvinyl alcohol, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1411–1418, 2018.
18. Lou H., Han W., ve Wang X., Numerical Study on the Solution Blowing Annular Jet and Its Correlation with Fiber Morphology, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 53 (7), 2830-2838, 2014.