

## Nano Elyaf Takviyeli Nanokompozit Üretimi ve Karakterizasyonu

Mesut UYANER<sup>1\*</sup> , Adem YAR<sup>2</sup> 

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Mühendisliği Bölümü, 42090, Meram, Konya, Türkiye

<sup>2</sup> Bingöl Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 12000, Bingöl, Türkiye

ARAŞTIRMA MAKALESİ/RESEARCH ARTICLE

(Geliş/Received: 28.01.2019; Kabul/Accepted: 05.02.2019; Online baskı/Published online:18.04.2019)

### ÖZET

Bu çalışma polivinilalkol (PVA) ve polivinilpirolidon (PVP) den elde edilen nano liflerin kompozitin tabakalar arasında olan etkisini incelemektedir. E-camı/epoksi kompozit malzemelerin arasında PVA ve PVP elektro eğirme nano elyaf yerleştirilerek Vakum Destekli Reçine Transferi Kalıplama (VARTM) yöntemi ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Nano elyaf ile modifiye edilmiş kompozit malzemelerin çekme testleri yapılmıştır. Ayrıca çekme testinden sonra kompozit malzemelerin kırılma yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Bu çalışma, PVA ve PVP nano elyafların epoksi ile yeteri kadar ıslanmadığını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektro eğirme, Nano elyaf, Tabakalararası bölge, E-camı/Epoksi

### Nano Fiber Reinforced Nanocomposite Production and Characterization

### ABSTRACT

The present study investigates the effect of various fabricated nanofiber such as poly-vinyl-alcohol (PVA) ile poly-vinyl-pyrrolidone (PVP) nanofibers mat to interlaminar features. E-glass/epoxy composite materials are produced by Vacuum Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) method, interleaving PVA and PVP electrospun nanofiber mat in each laminate consisted of eight ply. Tensile tests are carried out for nanomodified composite materials. Also, after tensile tests, the fracture surfaces area of both composite materials are studied using scanning electron microscope (SEM). Results reveal that PVA and PVP nanofiber mat was not adequately impregnated with epoxy.

**Key Words:** Electrospinning, Nanofiber, Interlaminar zone, E-glass/epoxy

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Parçacıklarda mikro boyuttan nano boyuta geçildiğinde fiziksel özelliklerde çarpıcı değişimler görülür. Birçok önemli kimyasal ve fiziksel etkileşimlerin yüzey ve yüzey özellikleri tarafından kontrol edildiği bilindiğine göre, nano yapıdaki bir parçacık aynı bileşime sahip olduğu daha büyük boyutlardaki parçacıklardan farklı özelliklere sahip olacaktır. Bu duruma parçacıklar ve lifler boyutundan bakıldığında, birim hacim için yüzey alanı malzemenin çapı ile ters orantılıdır. Bu nedenle, küçük çaplardaki malzemeler birim hacim için büyük yüzey alanlarına sahiptir [1]. Tipik nanomalzemeler özellikle nanoparçacıklar, nanotüpler, nanolifler, fullerenler ve grafen, halen detaylı bir şekilde araştırılmaktadır.

Genel olarak bu malzemeler geometrilerine göre sınıflandırılır ve en genel halde parçacıklar, lifler ve tabaka yapılar olarak ayrılırlar [2]. Örneğin karbon siyahı ve silika nanoparçacıkları parçacıklar grubunda sayılabilirken nanolifler ve karbon nanotüpler lif malzemeler grubundadır.

Polimer matrislerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için nanoparçacıkların dolgu malzemesi olarak kullanılması fikri yakın zamanda bilim adamları tarafından çokça araştırılmaktadır. Nanometre boyutundaki bu parçacıkların yüzey alanları 1000 m<sup>2</sup>/g bulabilmektedir [3]. Bu büyük yüzey alanları nedeni ile yükün matristen nanoparçacığa aktarımı kolaylaşacak ve sonuçta matrisin mekanik özellikleri arttırılmış olacaktır [4]. Bu yük aktarımını gerçekleştirmeye en uygun adaylar karbon nanolifler, nanokiller ve nanotüplerdir.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding Author: muyaner@erbakan.edu.tr / Tel: +90 332 325 2024

Nanopartiküller, fiber takviyeli polimer kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılabilir en uygun dolgu maddeleri olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, nanoparçacıkların türlerine ve uygulanma şekillerine bağlı olarak üretilen nanokompozit malzemelerin elektriksel ve ısıl özellikleri de iyileştirilebilir.

Geleneksel kompozitlerde, mekanik özellikler açısından yapılan malzeme tasarımında elyaf doğrultuları değiştirilerek istenilen mekanik özellikler elde edilir. Elyaf takviyeli plastik (FRP) kompozitlerin takviye edilmesi konusu kapsamlı bir şekilde düşünüldüğünde, FRP kompozitlerin *zayıf halkası* olarak bilinen tabakalar arası bölgenin takviye edilmesi önem kazanmaktadır. FRP kompozitlerde tabakalar arası bölge elyaf takviyesinin olmadığı bölge olup, kompozit malzemenin servis ömrü sırasında tabaka ayrılması veya matris çatlaması gibi çeşitli mekanizmalar ile hasara uğrayarak kompozit malzemenin görev yapamamasına neden olabilir [5].

Nispeten zayıf tabakalar arası bölge özellikleri, tabakalı kompozit sistemlerin genel performansını sınırlandırır. Tabakalar arası dayanımının artırılması için bazı yöntemler geliştirilmiştir: Üç-boyutlu elyaf kumaş kullanımı, dikme ve Z-pinleme [6–14]. Bu yöntemlerin hepsi tabakalı kompozitlerde kalınlık yönündeki mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılır. Ancak bu yöntemlerin tamamında, uygulamada tabakalı kompozitler hasar gördüğü için henüz tabaka yönündeki mekanik özelliklerin düşmesindeki etkileri tam olarak ortaya koyulamamıştır [15,16]. Bu bağlamda nano elyaflar, tabakalı kompozit malzemelerin *zayıf halkası* olarak adlandırılan tabakalar arası dayanımının iyileştirilmesi ve tabakalı kompozit malzemeleri hasar görmeden servis süresinin artırılması hususunda önemli bir katkı malzemesi olarak karşımıza çıkmaktadır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Polimer matrisli kompozitler, polimer bir matris ile takviye elemanı olan liflerden meydana gelir. Polimer reçine termoplastik veya termoset malzeme olabilir. Takviye elemanı olarak kullanılan lifler ise genellikle cam, karbon veya polimerlerden üretilir.

Kompozit malzemenin üretim yönteminin belirlenmesinde kullanılan polimer reçine önemli bir rol oynar. Polimer reçineler genellikle kompozit malzemelerin matris fazını oluştururlar ve malzemeyi bir arada tutarken yapısal olarak ta basma ve kayma dayanımı gibi mekanik özelliklerde belirleyici rol oynarlar. Epoksi reçineler diğer reçinelere göre daha dayanıklı ve daha rijit olduğu için kompozit yapıların imalatı ve yapıştırıcılarda kullanılır. Epoksi reçineler genellikle iyi termomekanik, elektrikî ve kimyevî direnç özelliklerine sahiptir [17].

Bu çalışmada epoksi matrisli kompozitler incelenmiştir. Epoksi reçineler elyaf takviyeli kompozitler üretmenin yanında genel amaçlı olarak yapıştırıcı veya kaplama olarak ta kullanılabilir. Epoksi reçineleri diğer polimerlerden ayıran en önemli yanları, mekanik özelliklerinin yüksek oluşu ve çevresel bozunmaya karşı olan yüksek dirençleridir. Özellikle birçok çözücü ve kimyasala karşı olan dirençleri ve çok çeşitli yüzeylere kolaylıkla bağlanabilmesi epoksi reçineleri önemli bir yapıştırıcı sınıfına sokar. Polimerleşmeden önce hem epoksid monomerleri hem de setleştirici olarak kullanılan poliamidler yüksek viskoziteye sahip olmalarına rağmen, epoksi reçineler vakum infüzyon tekniği kullanılarak kompozit malzeme üretiminde en çok kullanılan reçine türüdür. Bunlara ek olarak epoksi reçineler kütleme esnasında düşük büzülme eğiliminde olduklarından iç gerilme oluşumu en aza indirilir [18].

Bu çalışmada doymamış bir epoksi türü olan Diglisidil Ether Bisfenol A kullanılmıştır.

Lifler takviye elemanları olup kompozit malzemelerin çekme dayanımı ve rijitlik gibi özelliklerinin belirlenmesinde etkin rol oynarlar. Bu çalışmada örgü E-camı lifler takviye elemanı olarak kullanılmıştır.

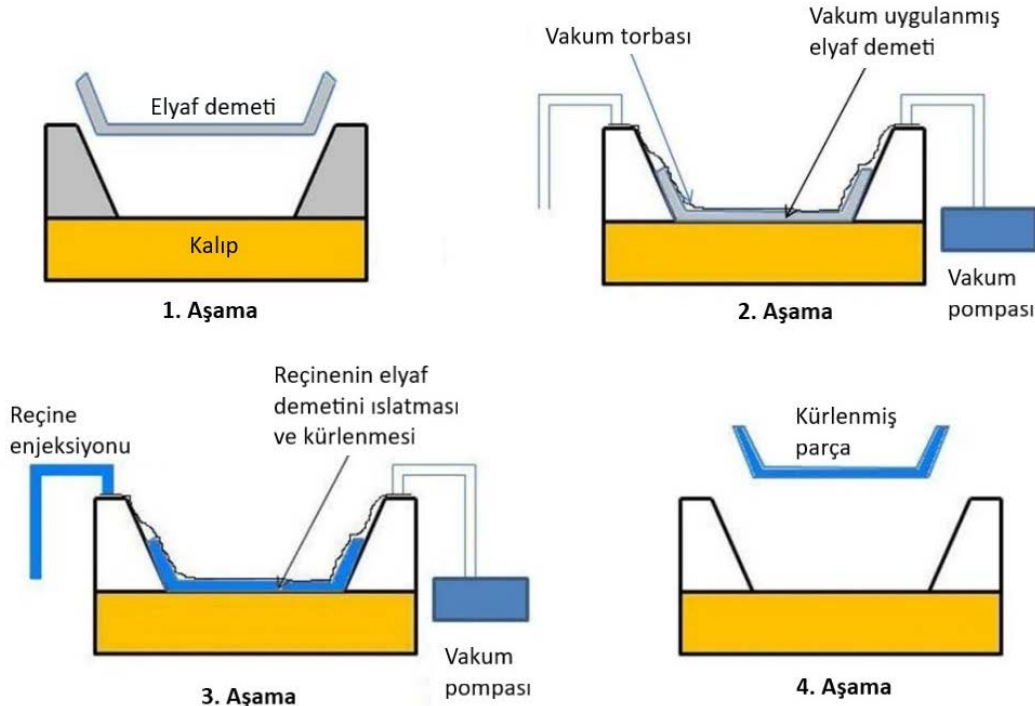
Nano elyaf üretimi için ise polivinilalkol (PVA) ve polivinilpirolidon (PVP) polimerleri kullanılmıştır.

### 2.1. Tabakalı Kompozitin Üretimi (Production of Laminated Composite)

Kompozit malzemelerin üretiminde, imalat yöntemi kullanılan liflerin türüne, uzun veya kısa oluşuna, sürekli veya süreksiz oluşuna, yönlü olup olmamasına bağlı olarak değişebilir. Ayrıca kullanılan reçinenin termoset veya termoplastik oluşu da üretimi etkiler. Parçanın geometrisi ve üretim adedi de ayrıca imalat parametreleri arasındadır.

VARTM sıvı kalıplama yöntemi olup (bu yöntem vakum infüzyon yöntemi de denir), reçinenin elyaf demetlerine aşılması ilkesine dayanır. Bu yöntemde, reçine kalıp içerisinde yaratılan vakum sayesinde kalıp içersine çekilir. Düşük maliyetli, zaman tasarrufu sağlayan, tek yüzeyli bir kalıp ile gerçekleştirilebilen ve oda sıcaklığında da üretim yapılmasına imkân veren bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı, lifler arasındaki boşlukların sıvı reçine katılmasından önce reçine ile doldurulmasıdır Şekil 1.'de VARTM yönteminin aşamaları şematik olarak verilmiştir. Bu aşamalar;

- Liflerin kalıp üzerine serilmesi,
- Kalıbın vakum torbası ile kaplanması ve vakum oluşturulması,
- Reçinenin kalıp içine aktarımı ve
- Kompozit parçanın kürlenmesidir.

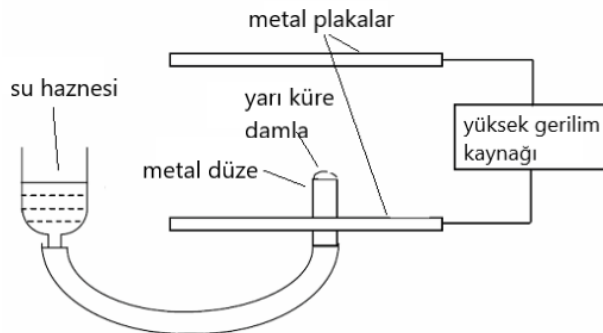


Şekil 1. VARTM ile kompozit parça üretiminin şematik olarak gösterimi [19]  
(Figure 1. Schematic representation of composite parts production with VARTM [19])

## 2.2. Elektro-Eğirme (Electrospinning)

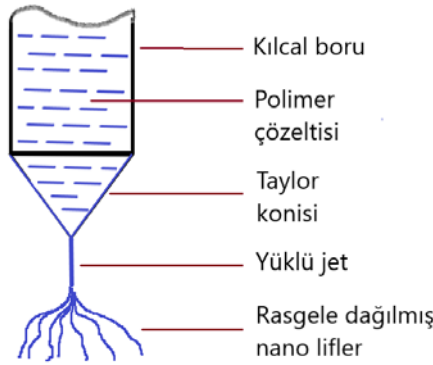
Formhals tarafından 1934 yılında ilk defa elektrostatik kuvvetler kullanılarak polimerlerden filament lif üretilmesi işleminin patenti alınmıştır [20]. Kullanılan bu yöntem *elektro eğirme* adı verilmiştir.

1960'larda, elektrikli akışkanların temel teorik prensipleri Taylor tarafından çeşitli çalışmalarda açıklanmıştır. Bu çalışmalar ayrıca, iki sıvı arasındaki koni arayüzünün elektrik alanı içinde dengede olduğunu göstermiştir. Elektrik alanın etkisi altında, sıvı yüzey yüklenir ve karşılıklı yükler birbirini iten bir dış kuvvet üretir. Eşik değeri geçtikten sonra elektrostatik kuvvetle, sıvı damlacık bir koninin şeklini alır ve aşırı yükler yüklü jetten koninin ucundaki kollektöre doğru hareket eder. Koninin elektrik kuvvetinin yüzey gerilimine eşit olduğu bu kritik noktada koni yarım açısı  $49,3^\circ$  dir. Taylor'un deney düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Taylor deney düzeneği (Figure 2. Taylor experiment set-up)

Taylor tarafından geliştirilen kuramda, bir elektrik alan içindeki viskoz katreden ince liflerin oluşumu, elektrik kuvvetleri tarafından yüklenen sıvı yüzeyinin maksimum kararsızlığından kaynaklanmaktadır (Şekil 3).



Şekil 3. Taylor konisi oluşumu ve liflerin dağılımı (Figure 3. Taylor cone formation and distribution of fibers)

Sıvı jetindeki akış alanı, jet eksenı boyunca uzunlamasına bağlantı ile bir hız değişimi (gradyan) gibi olacaktır. Boyuna hız değişimi çok ince liflerin oluşmasında ve polimer zincirlerinin uzatılmasında çok faydalıdır. Uygulanan gerilim (voltaj) arttıkça elyaf çapı azalır [21].

### 2.3. Elektroğirme ile Nano Liflerinin Üretimi (Production of Nano Fibers by Electrospinning)

#### 2.3.1 Eğirme öncesi işlemler (Pre-spinning operations)

- Çözeltinin polimer yoğunluğu, viskozitesi, iletkenliği, yüzey gerilimi ve moleköl uzunluğu lif çapını önemli derecede etkileyen faktörlerdir. İstenilen özelliklere göre çözelti hazırlanmalıdır.
- Çözeltiyi hazırlarken çözücü ve çözünen maddeler belirlenir. Çözücü ve çözünen maddelerin yüzdelik oranları belirlendikten sonra belli bir sıcaklık ve hızla viskoz bir solüsyon elde edilene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırılır.
- Oluşturulan çözelti, homojen bir yapıya gelmesi için (içerisindeki kabarcıkların giderilmesi için) 8-12 saat arası bekletilir.

#### 2.3.2 Eğirme sırasındaki işlemler (Operations during spinning)

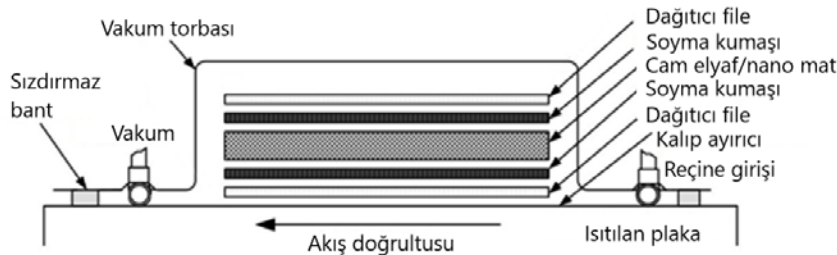
- Hazırlanan çözeltiye göre, kollektör ve iğne arası uzaklık (12,5 cm – 25 cm), pompalama hızı (0,1 ml/h – 1,5 ml/h) , uygulanan voltaj (8 kV – 50 kV) kollektörün türü, pompalama sisteminin türü, iğne iç çapı belirlenir.
- Ortamın nemi ve sıcaklığı, lif çapını etkiler.

#### 2.3.3 Eğirme sonrası işlemler (Post-spinning operations)

- Kollektörde toplanan lifler, oda şartlarında veya vakumlu ortamda bekletilir.(Vakumlu ortamda 2 saatte 70 °C de, oda şartlarında 12 saatte kurutulur.)
- Gerekirse ısı işleme tabi tutulur.
- Lifler kurutulduktan sonra cımbız vasıtasıyla kollektörden ayrılır.
- Oluşan liflerin karakterizasyonu yapmak amacıyla görüntüleri alınabilir.

### 2.4. VARTM Yöntemi ile Nanolif Takviyeli Kompozit Levhaların Üretimi (Production of Nanofiber Reinforced Composite Laminates by VARTM Method)

Vakum infüzyon ünitesi paslanmaz çelik sac ve vakum pompasından oluşmaktadır. Bu tabakalama işlemi şematik olarak Şekil 4'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Vakum infüzyon yönteminde bileşenler (Figure 4. Components in vacuum infusion method)

Öncelikle nanolif kaplı cam elyaf kumaşların yerleştirileceği yer kalıp temizleyicisiyle temizlendi. Ardından kalıp ayırıcı sürülerek katılaşması için belirli bir süre beklendi. Katılaşma tamamlandıktan sonra üzerine dağıtıcı file ve soyma kumaşı yerleştirildi. Bu tabakaların üzerine önceden hazırlanan nanolif takviyeli cam elyaf kumaşlar yerleştirildi. Kumaşların üzerine tekrar soyma kumaşı ve dağıtıcı file serildi. Reçine enjeksiyonun yapılabilmesi için giriş ve çıkış spiralleri cam elyaf kumaşlarının boyutlarına göre hazırlandı. Son olarak tüm katmanların üzerine vakum torbası geçirildi ve sızdırmaz bant çekilerek sızdırmazlık sağlandı. Epoksi cam/nanolif katmanından oluşan yığına gönderilmeden önce küreleştiricisi katılarak homojen oluncaya kadar karıştırıldı. Vakum torbası içerisindeki hava 0,7 bar uygulanarak çekildikten sonra paslanmaz çelik sac 50 °C'ye kadar ısıtıldı. Nanolif takviyeli kompozit malzemelerin içerisindeki hava tamamen çekilene kadar bir müddet bekletildi. Daha sonra basınç 0,3 bara düşürülüp ardından katkısız epoksi reçine nanolif takviyeli kompozit malzemelere gönderildi. Epoksinin tabakalar arasına kolay bir şekilde dağıtılması veya cam/nanolif demetlerin düzgün ıslatılabilmesi için basınç 0,15 bara düşürüldü. Epoksi tamamen kompozit levhalardan geçirilerek bir süre bekletildi. Üretilen nanolif takviyeli kompozit levhalar kademeli olarak 70°C'de 1 saat ve 120°C'de 4 saat kürlendi.

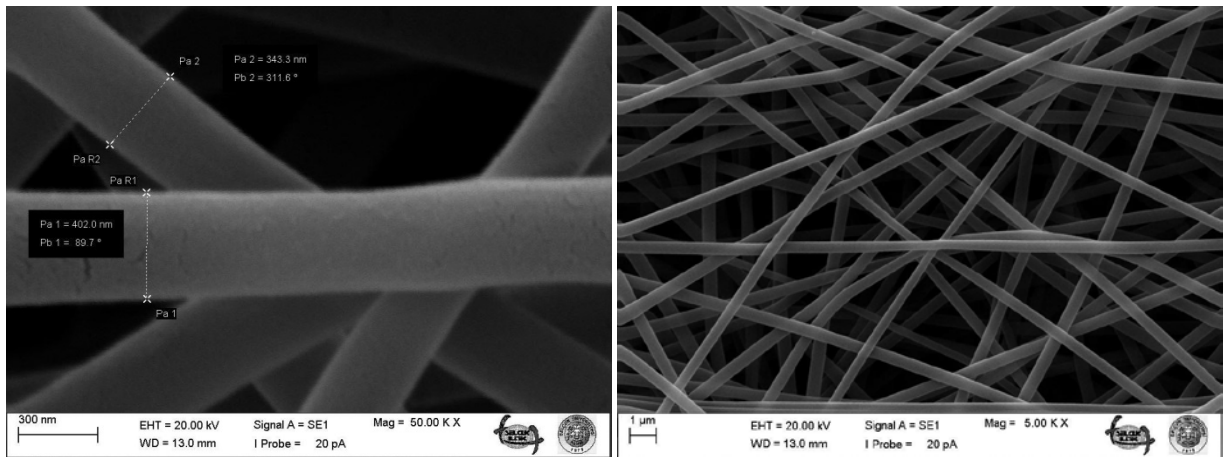
### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1 PVA SEM Görüntüsü (SEM Images of PVA)



**Şekil 5. a) Manyetik karıştırıcı ve b) Elektro eğirme cihazı**  
(Figure 5. a) Magnetic stirrer and b) Electro spinning device)

Ağırlıkça %7 MW 88000 PVA, Deiyonize su ile manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 50°C'de 3,5 saat karıştırıldı ve 24 saat oda sıcaklığında bekletildi (Şekil 5a). Hazırlanan çözelti, elektro eğirme cihazı ile iğne-kolektör arası uzaklık 12,5 cm, 13 kV voltaj ve pompalama hızı ise 0, 2 ml/h değeriyle eğrildi (Şekil 5b). Birkaç saat deney devam ettirilerek nanolif oluşumu gerçekleştirildi.

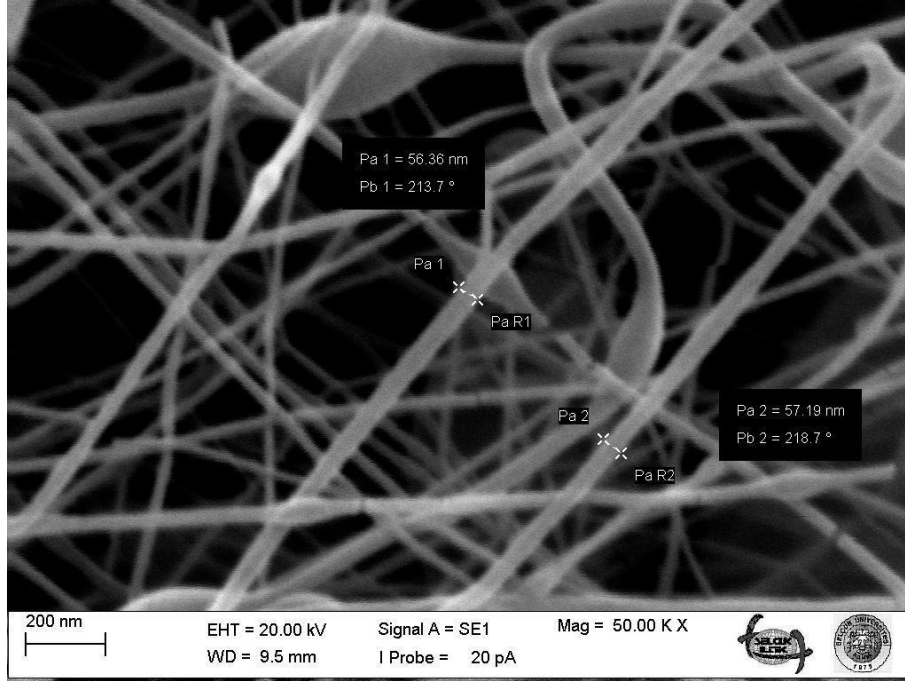


**Şekil 6 PVA nanolifinin SEM görüntüsü a) 50000 büyütme, b) 5000 büyütme**  
(Figure 6. SEM image of PVA nanofiber a) 50000X, b) 5000X)

Elde edilen SEM görüntülerinden nanoliflerin çapları 300-400 nm boyutları arasında homojen bir dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır (Şekil 6).

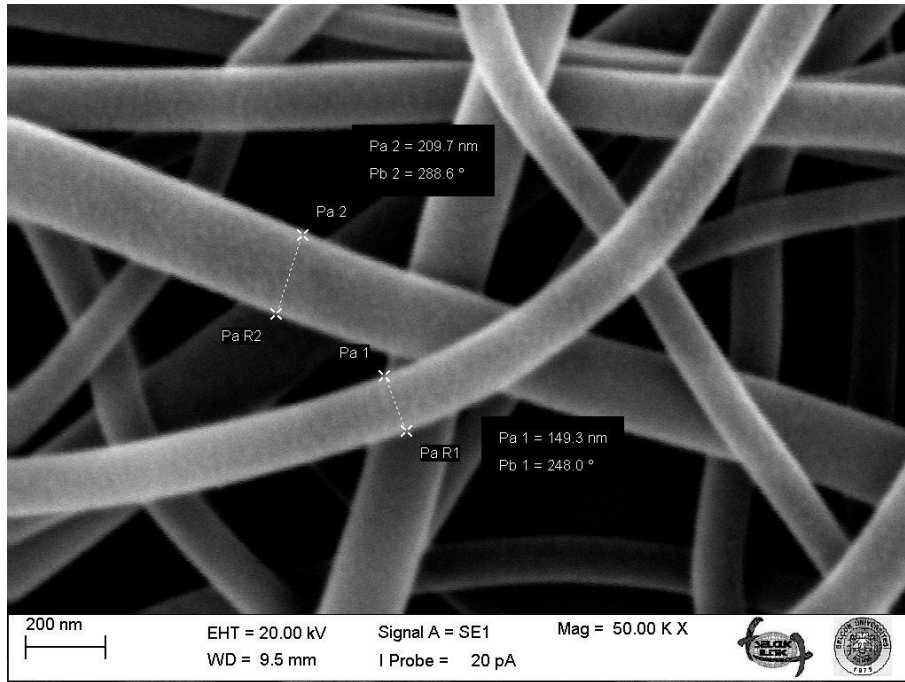
### 3.2. %7 PVP SEM Görüntüsü (SEM Images of 7% PVP)

Ağırlıkça %7 MW 1300000 PVP, deiyonize su ile manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 60°C'de 4 saat homojen hale gelene kadar karıştırıldı ve 24 saat oda sıcaklığında bekletildi. Hazırlanan çözelti, elektro eğirme cihazı ile iğne-kolektör arası uzaklık 12,5 cm, 10 kV voltaj ve pompalama hızı ise 0,2 ml/h değeriyle eğrildi. Birkaç saat deney devam ettirilerek nanolif oluşumu gerçekleştirildi. Elde edilen SEM görüntülerin de (Şekil 7) nanoliflerin çapları 50-75 nm boyutları arasında homojen bir dağılım göstermektedir.



Şekil 7. %7 PVP nanolifinin SEM görüntüsü (50000 büyütme)  
(Figure 7. SEM image of 7% PVP nanofiber 50000X)

### 3.3. %10 PVP SEM Görüntüsü (SEM Images of 10% PVP)



Şekil 8. %10 PVP nanoliflerinin SEM görüntüsü (50000 büyütme)  
(Figure 8. SEM image of 10% PVP nanofiber 50000X)

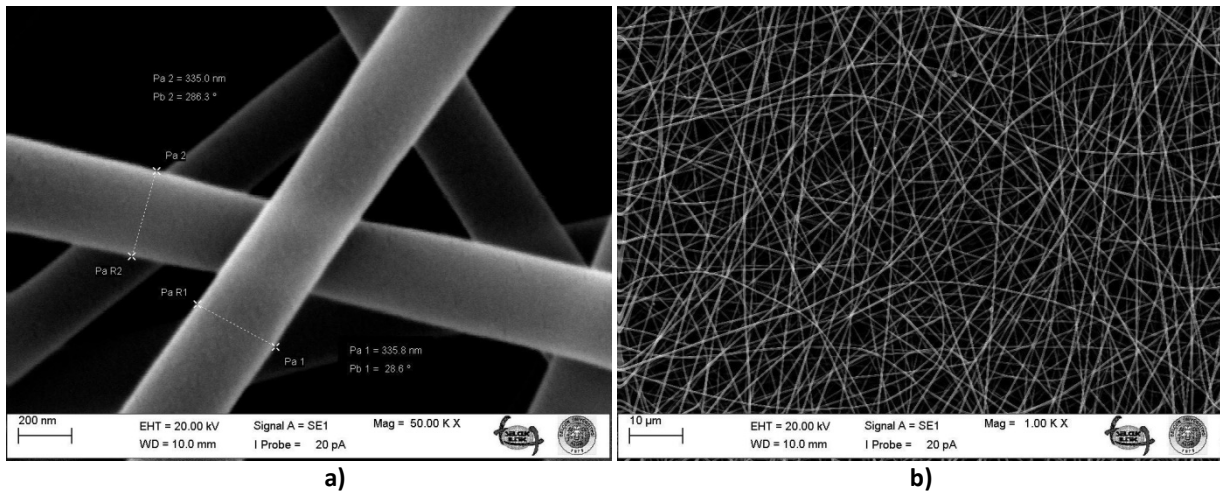


Ağırlıkça %10 MW 1300000 PVP, deiyonize su ile manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 50°C'de 4 saat homojen hale gelene kadar karıştırıldı ve 24 saat oda sıcaklığında bekletildi. Hazırlanan çözelti, elektro eğirme cihazı ile iğne-kolektör arası uzaklık 12,5 cm, 12,5 kV voltaj ve pompalama hızı ise 0,2 ml/h değeriyle eğrildi. Birkaç saat deney devam ettirilerek nanolif oluşumu gerçekleştirildi. Elde edilen SEM görüntülerin de (Şekil 8) nanoliflerin çapları 150-250 nm boyutları arasında homojen bir dağılım göstermektedir.

%10'luk PVP ile %7'lik PVP çözeltisi ile elde edilen nanolifleri karşılaştırılırsa %7'lik çözelti daha küçük çapa sahip ancak düzensizliklerde %7'lik çözeltide daha fazladır.

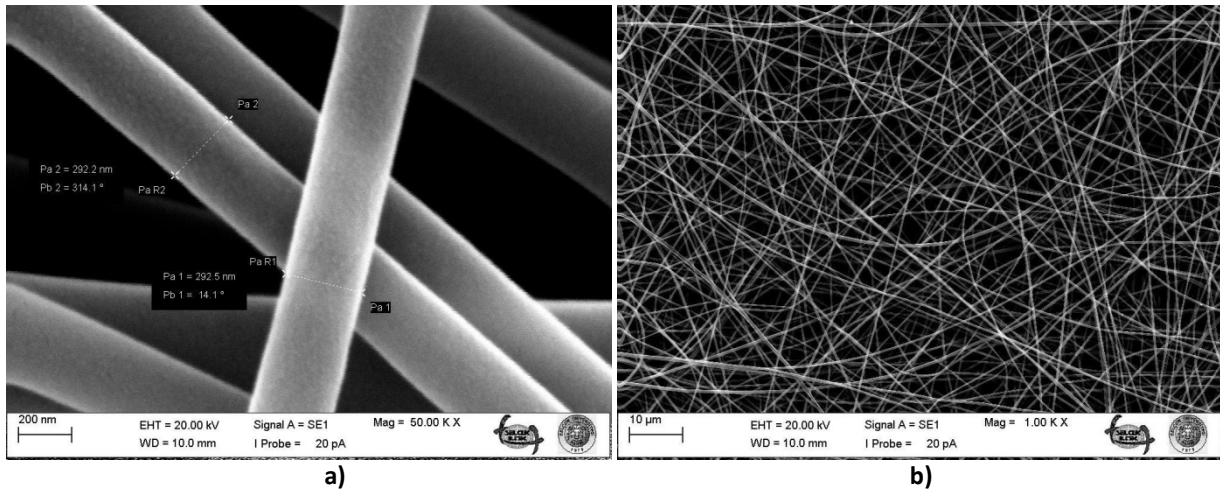
### 3.4. PVA/PVP SEM Görüntüleri (SEM Images of PVA/PVP)

Ağırlıkça %6 MW 88000 PVA ve %6 MW 1300000 PVP, deiyonize su ile manyetik karıştırıcı vasıtasıyla 60°C'de 4 saat homojen hale gelene kadar karıştırıldı ve 24 saat oda sıcaklığında bekletildi. Hazırlanan çözelti şırıngaya çekilerek, pompaya yerleştirildi. Elektro eğirme cihazı ile iğne-kolektör arası uzaklık 12 cm, **12 kV ve 16 kV** voltaj uygulandı ve pompalama hızı ise 0,2 ml/h değeriyle eğrildi. Birkaç saat deney devam ettirilerek nanolif oluşumu gerçekleştirildi.



**Şekil 9** PVP/PVA nanoliflerinin SEM görüntüleri (uzaklık 12 cm ve uygulanan voltaj 12 kV) **a)** 50000 büyütme, **b)** 1000 büyütme

(Figure 9. SEM images of PVP/PVA nanofiber (distance 12 cm and applied voltage 12 kV) **a)** 50000X, **b)** 1000X)

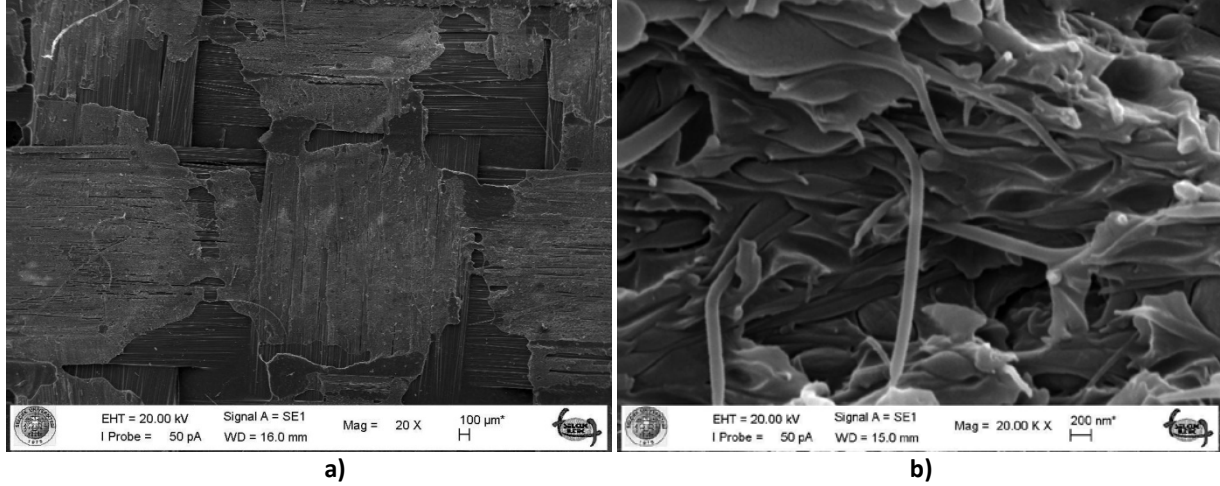


**Şekil 10** PVP/PVA nanoliflerinin SEM görüntüleri (uzaklık 16 cm ve uygulanan voltaj 16 kV) **a)** 50000 büyütme, **b)** 1000 büyütme

(Figure 10. SEM images of PVP/PVA nanofiber (distance 16 cm and applied voltage 16 kV) **a)** 50000X, **b)** 1000X)

16 kV ve 12 kV uygulayarak elde ettiğimiz hibrit PVA-PVP nanoliflerinde Referans [21] deki bilgiyle uyuşan bir sonuç elde edildi. 16 kV uygulayarak elde edilen nanolifler 290 nm civarı çapa sahipken (Şekil 9), 12 kV uygulayarak elde edilen nanolifler 335 nm civarında çapa sahiptir (Şekil 10). Ancak bu değerlerde boncuksu yapıya rastlanmamıştır. Belli bir uzaklık değerinin üzerinde ve belli bir voltaj değerinin üzerinde üretilen nanoliflerde boncuksu yapı ve düzensizlikler olabilmektedir [22]

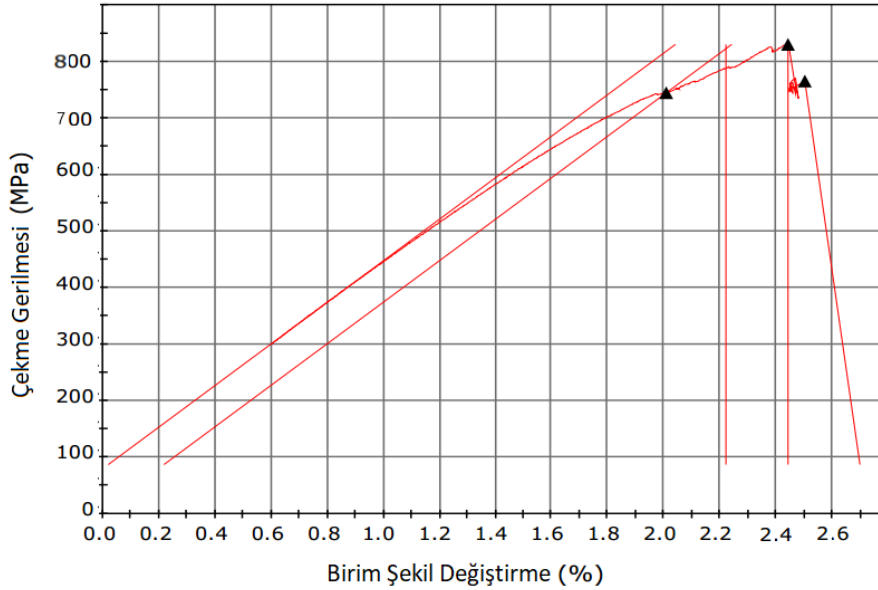
## 3.5. Nano Lif Katmanlı Kompozitin Mekanik Davranışı (Mechanical Behavior of Nano Fiber Layered Composite)



**Şekil 11.** PVA-PVP nanoliflerin kompozit malzemelere yerleştirilip çekme testine tabi tutulduktan sonra yüzeylerinin SEM görüntüleri **a)** 20 büyütme **b)**20000 büyütme

(Figure 11. SEM images of composite materials that the PVA-PVP nanofibers are placed in, after the tensile test, **a)** 20X **b)** 20000X)

Nano liflerin kompozit malzemelerin katmanına yerleştirildikten sonraki SEM görüntüleri Şekil 11'te verilmiştir. Nano liflerin yüzeyde yer aldığı görülmektedir (Şekil 11b). Bazı nano liflerin vakum infüzyon yöntemi esnasında kürlenme işlemi yapılırken epoksi ile birlikte eridiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca bazı yerlerin epoksi ile tam olarak ıslanmamış olması çekme testi esnasında malzemelerin delaminasyona uğramasına neden olmuştur (Şekil 11a). Nano liflerin yüzey alanının yüksek olması epoksi ve elyaf arasında tutunmayı sağlarken aynı zamanda yük taşınımında da önemli bir rol oynamaktadır. Ancak, tam bir ıslanma sağlamadığından dolayı nano lifler bu işlevi yerine getirememiştir.



**Şekil 12.** PVA-PVP nanolif katmanlı kompozit malzemenin gerilme- birim şekil değişirme grafiği  
(Figure 12. PVA-PVP nanostructured composite material's stress-strain graph)

Şekil 12'te nano elyaf takviyeli kompozit malzemenin gerilme-birim şekil değişirme grafiği verilmiştir. E-camı/epoksi kompozit malzemelerle kıyaslandığında [23] çekme gerilmesinde bir düşüş meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise PVA-PVP nano liflerin yeteri kadar ıslanmamasıdır. Üretilen tabakalı nanokompozit malzemeler için kopma dayanımları ve şekil değişirme miktarındaki değişimler, malzemenin kopana kadar yuttuğu toplam enerjiyi yani tabakalı nanokompozitlerin tokluğunu nasıl etkilediğini göstermektedir.

Tabakalar arası kırılma direncini arttıran mekanizmalardan çatlak ucunun gerisinde oluşan lif veya tabaka köprülenmesi mekanizmaları numunenin kesitinden gözlemlenebilir [24]. Bu çatlak köprülenmesi mekanizması kararsız, büyük yük düşüşlerine neden olarak yük-yer değişirme eğrisinin testere ağzına benzemesine sebep olur.



Başlangıç çatlağını oluşturduğu anda numunelerde yük değerinde küçük azalmalar belirlenmiştir. Bu durum, çatlağın ayırıcı filminden itibaren matris içerisinde yayılmaya başladığının göstergesidir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada PVA, PVP ve hibrit PVA-PVP nanolifleri başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bu nanoliflerin çapları PVA için 300-400 nm, PVP için nanoliflerin çapları 50-75 nm arasında oluşmuş iken PVA-PVP Hibrit nanolifler için ise 350 nm olarak gerçekleşmiştir. Nanoliflerin tabakalar arası katmanda yerleştirilmek suretiyle VARTM yöntemi ile üretilen tabakalı kompozitin mekanik deneyi ve fraktografi neticesinde Epoksi reçinenin nano lifleri yeteri kadar ıslatmadığı gözlemlenmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Selçuk Üniversitesi BAP koordinatörlüğü tarafından 11401056 numaralı proje ile desteklenmiştir. Mesut Uyaner, bu projenin yürütücüsüdür. Adem YAR, projedeki deneyleri gerçekleştirmiş ve projenin raporlanmasında katkı sunmuştur.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J.-J. Luo, I.M. Daniel, Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites, *Composites Science and Technology*. 63 (2003) 1607–1616. doi:10.1016/S0266-3538(03)00060-5
- [2] D. Schmidt, D. Shah, E.P. Giannelis, New advances in polymer/layered silicate nanocomposites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. 6 (2002) 205–212. doi:10.1016/S1359-0286(02)00049-9
- [3] F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, B. Fiedler, W. Bauhofer, K. Schulte, Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 36 (2005) 1525–1535. doi:10.1016/J.COMPOSITESA.2005.02.007
- [4] J. Njuguna, K. Pielichowski, J. Alcock, Epoxy-based fibre reinforced nanocomposites, *Wiley Online Library*. 9 (2007) 835–847. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adem.200700118> (erişim 27 Ocak 2019).
- [5] S.S. Wicks, R.G. de Villoria, B.L. Wardle, Interlaminar and intralaminar reinforcement of composite laminates with aligned carbon nanotubes, *Composites Science and Technology*. 70 (2010) 20–28. doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2009.09.001
- [6] L. Tong, A.P. Mouritz, M.K. Bannister, 3D fibre reinforced polymer composites, *Elsevier*, 2002. doi:10.1016/B978-0-08-043938-9.X5012-1
- [7] T.K. Tsotsis, A. Markus, AST composite wing program work Unit IV-design, analysis, and manufacturing studies, 1999
- [8] F. Larsson, Damage tolerance of a stitched carbon/epoxy laminate, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 28 (1997) 923–934. doi:10.1016/S1359-835X(97)00063-8
- [9] K.A. Dransfield, L.K. Jain, Y.-W. Mai, On the effects of stitching in CFRPs—I. mode I delamination toughness, *Composites Science and Technology*. 58 (1998) 815–827. doi:10.1016/S0266-3538(97)00229-7
- [10] I.K. Partridge, D.D.R. Cartié, Delamination resistant laminates by Z-Fiber® pinning: Part I manufacture and fracture performance, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 36 (2005) 55–64. doi:10.1016/J.COMPOSITESA.2004.06.029
- [11] S.K. Sharma, B. V. Sankar, Effect of Stitching on Impact and Interlaminar Properties of Graphite/Epoxy Laminates, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 10 (1997) 241–253. doi:10.1177/089270579701000302
- [12] A.. Mouritz, C. Baines, I. Herszberg, Mode I interlaminar fracture toughness properties of advanced textile fibreglass composites, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 30 (1999) 859–870. doi:10.1016/S1359-835X(98)00197-3
- [13] J.R. Reeder, Stitching vs. a Toughened Matrix: Compression Strength Effects, *Journal of Composite Materials*. 29 (1995) 2464–2487. doi:10.1177/002199839502901805
- [14] X. Zhang, L. Hounslow, M. Grassi, Improvement of low-velocity impact and compression-after-impact performance by z-fibre pinning, *Composites Science and Technology*. 66 (2006) 2785–2794. doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2006.02.029
- [15] C.A. Steeves, N.A. Fleck, In-plane properties of composite laminates with through-thickness pin reinforcement, *International Journal of Solids and Structures*. 43 (2006) 3197–3212. doi:10.1016/J.IJSOLSTR.2005.05.017

- [16] A.P. Mouritz, Review of z-pinned composite laminates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 38 (2007) 2383–2397. doi:10.1016/J.COMPOSITESA.2007.08.016
- [17] P.K. Sinha, Composite materials and structures, *Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering IIT Kharagpur*. (2006).
- [18] M. Biron, Thermosets and composites: technical information for plastics users, (2004). [https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak\\_download&id\\_clanak\\_jezik=9288](https://hrcak.srce.hr/index.php?show=clanak_download&id_clanak_jezik=9288) (erişim 27 Ocak 2019).
- [19] V.C.S. Chandrasekaran, M.H. Santare, P. Krishnan, S.G. Advani, Amino Functionalization of MWNTs and Their Effect on ILSS of Hybrid Nanocomposites, *Composite Interfaces*. 18 (2011) 339–355. doi:10.1163/092764411X584478
- [20] A. Formhals, Process and apparatus for preparing artificial threads, 1934. <https://ci.nii.ac.jp/naid/10029238153/> (erişim 27 Ocak 2019).
- [21] G.S. Kozanoğlu, Elektrospinning yöntemiyle nanolif üretim teknolojisi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2006. <http://polen.itu.edu.tr/bitstream/11527/4631/1/3923.pdf>
- [22] A. Süslü, M. Özdemir, Ç. Tekmen, E. Çelik, Ü. Cöcen, Gümüş katkılı TiO<sub>2</sub> nanofiberlerin elektro-eğirme yöntemi ile üretilmesi ve karakterizasyonu, *Anadolu University Journal of Sciences & Technology*. 10 (2009) 277–284. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=44455220&site=eds-live&authtype=ip,uid>
- [23] M. Uyaner, M. Kara, Dynamic response of laminated composites subjected to low-velocity impact, *Journal of Composite Materials*. 41 (2007) 2877–2896. doi:10.1177/0021998307079971
- [24] V. Eskizeybek, A. Yar, A. Avci, CNT-PAN hybrid nanofibrous mat interleaved carbon/epoxy laminates with improved Mode I interlaminar fracture toughness, *Composites Science and Technology*. 157 (2018) 30–39. doi:10.1016/J.COMPSCITECH.2018.01.021