



**T.C.**  
**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NAYLON 6,6 NANOFİBER ve CAM KUMAŞ TAKVİYELİ  
KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**MURAT YILDIZ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**  
**HAZİRAN-2017**

**T.C.**  
**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NAYLON 6,6 NANOFİBER ve CAM KUMAŞ TAKVİYELİ  
KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**MURAT YILDIZ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**HATAY**  
**HAZİRAN-2017**

**T.C.**  
**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NAYLON 6,6 NANOFİBER ve CAM KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT  
MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**MURAT YILDIZ**

**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Prof. Dr. Ahmet YAPICI** danışmanlığında hazırlanan bu tez **28/06/2017** tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **OYBİRLİĞİ** ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Ahmet YAPICI  
Başkan

Doç. Dr. Yusuf CUNEDİOĞLU  
Üye

Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KANCA  
Üye

**Kod No: 54**

.....  
**Enstitü Müdürü**

**Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.**

28.06.2017

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını ve tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu beyan ederim.

**Murat YILDIZ**

## ÖZET

### **NAYLON 6,6 NANOFİBER ve CAM KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEMELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Kompozit malzemelerin sahip oldukları üstünlükler sayesinde son yüzyılda bu malzemelere olan ilgi artmıştır. Kompozit malzemelerin her daim geliştirilmeye müsait olmaları dikkat çeken bir özelliktir. Bu malzemelerin geliştirilmesi için birçok yol vardır ve yine son yıllarda kendisiyle ilgili önemli çalışmaların yapıldığı nanofiberlerin kompozitlere takviye olarak eklenmesi de bu yollardan bir tanesidir.

Nanofiberlerin üretiminde farklı yollar bulunmaktadır ve son yıllarda elektrospin yöntemi ucuz ve hızlı bir şekilde nanofiber üretimine izin verdiği için popüler bir nanofiber üretim tekniği olarak karşılaşılmaktadır. Bu teknikle nano boyutta küçük çaplı düzgün fiber yapıların elde edilmesi mümkündür.

Naylonlar nanofiber üretimi için aktif olarak kullanılan bir polimer malzemedir. Bu polimer ailesinin bir üyesi olan naylon 6,6 malzemesi de nanofiber üretiminde sık kullanılmaktadır.

Bu çalışmada naylon 6,6 polimer malzemesinden elektrospin yöntemi ile nanofiber tabakalar üretilip, bu tabakaların epoksi/cam kumaş kompozitlere takviye edilmesi ile bu kompozit malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişimler incelenmiştir. Üretilen nanofiber tabakalar, iki cam kumaş tabakanın arasına bir adet ve bu cam kumaş tabakaların hem arasına hem de boşta kalan diğer iki yüzeyine de birer adet gelecek şekilde yerleştirilerek nanofiber takviyeli kompozit grupları oluşturulmuştur. Ayrıca sadece iki adet cam kumaş ve sadece dört adet cam kumaş tabakanın bulunduğu saf kompozitler de üretilmiştir. Tüm tabakalı kompozitler elle yatırma yöntemi ile üretilmiştir. Bu dört numune grubuna düşük hızlı darbe ve çekme testleri yapılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve irdelenmiştir.

Nanofiber tabakaların, kompozitlerin yük kapasitelerindeki azalmalara karşın enerji absorpsiyon kapasitelerini arttırdığı gözlemlenmiştir.

2017, 76 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Düşük hızlı darbe, naylon 6,6, elektrospin, cam kumaş, epoksi, tabakalı kompozit

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE GLASSFIBER and NYLON 6,6 NANOFIBER REINFORCED COMPOSITE MATERIALS

Due to the superiority of composite materials, interest in these materials has increased in the past century. It is possible for composite materials to be improved all the time and this is an important feature of them. There are many ways to improve those materials and interleaving nanofiber mats which are studied constantly and many important papers were released on, in composite materials is one of them.

There are many ways to generate nanofibers and electrospinning is a popular nanofiber generating method, capable of providing a way to generate nanofibers in a quick and cheap manner.

Nylons are a kind of polymer and they are used for the electrospinning process actively. Nylon 6,6 is a member of this polymer family and is used for electrospinning frequently.

In this work, nylon 6,6 nanofibers were electrospun and used as reinforcement material by being interleaved in epoxy/glass fiber composite material. For one group of nanofiber reinforced specimens, one nanofiber mat was interleaved in two glass fiber laminae and then placed into epoxy. For another group of nanofiber mat reinforced specimens, three nylon 6,6 nanofiber mats were interleaved in two glass fiber laminae and then placed into epoxy. Neat specimens where only two and four glass fiber laminae had been placed into epoxy were produced as well. All of the laminated composite materials were produced by using the lay-up method. The four group of specimens were tested by low velocity impact and tensile tests. The results were compared and examined.

It's been concluded that even though there was a decrease in the load capacity of the composite materials, nylon 6,6 nanofiber mats improved the energy absorption capabilities of them.

2017, 76 pages

**Key Words:** Low velocity impact, nylon 6,6, electrospinning, glass fiber, epoxy, laminated composite

## TEŞEKKÜR

Doktora tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması ve yazımı sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen saygıdeğer danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet YAPICI'ya sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Test numunelerinin hazırlanmasında yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Vildan ÖZKAN'a teşekkür ederim.

Testlerin yapılmasında yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez süresince yardımlarını esirgemeyen Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali GÜNEN ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Erdoğan KANCA'ya teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalar boyunca her daim destek olan değerli meslektaşlarım Arş. Gör. Mehmet DEMİR, Arş. Gör. Raif KENANOĞLU, Arş. Gör. Hasan Hüseyin BİLGİÇ, Arş. Gör. Hüseyin YAĞLI, Arş. Gör. Bahattin TANÇ'a ve daha ismini sayamadığım bölümümüzdeki tüm değerli öğretim üyelerine ve elemanlarına teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan değerli annem Senem YILDIZ ve kardeşim Hasan YILDIZ'a teşekkür ederim.

Murat YILDIZ

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER .....	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	VIII
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	IX
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozitler .....	3
1.1.1. Seramik Matrisli Kompozitler .....	3
1.1.2. Metal Matrisli Kompozitler .....	3
1.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler.....	3
1.2. Takviye Malzemelerine Göre Kompozitler.....	5
1.2.1. Fiber Takviyeli Kompozitler .....	5
1.2.2. Parçacıklı Kompozitler .....	6
1.2.3. Tabakalı Kompozitler .....	6
1.2.4. Karma Yapılı Kompozitler .....	6
1.3. Fiber Çeşitleri .....	6
1.3.1. Cam Fiberler .....	7
1.3.2. Karbon Fiberler.....	8
1.3.3. Aramid (Kevlar) Fiberler .....	8
1.3.4. Bor Fiberler.....	9
1.4. Tez Çalışması .....	9
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	11
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	14
3.1. Materyal.....	14
3.2. Yöntem .....	18
3.3. Nanofiber Üretim Yöntemleri .....	18
3.4. Elektrospin Yöntemi.....	19
3.4.1. Elektrospin Yöntemini Etkileyen Parametreler .....	25
3.5. Tabakalı Kompozitlerin Darbe Davranışı .....	34
3.5.1. Düşük Hızlı Darbe .....	35



3.5.2. Hasar Mekanizmaları.....	38
3.6. Düşük Hızlı Darbe Testleri.....	48
3.7. Çekme Testleri .....	49
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....	51
4.1. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonuçları .....	52
4.2. Çekme Testleri Sonuçları .....	65
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	70
5.1. Sonuçlar.....	70
5.2. Öneriler.....	71
KAYNAKLAR .....	72
ÖZGEÇMİŞ .....	76



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Naylon 6,6 taneleri ve kullanılan çözücüler .....	15
Şekil 3.2. Ultrasonik banyo cihazı .....	15
Şekil 3.3. Naylon 6,6 solüsyonu .....	16
Şekil 3.4. Cam kumaş tabaka .....	16
Şekil 3.5. Kullanılan epoksi ve sertleştiricisi .....	17
Şekil 3.6. Elektrospın cihazı .....	20
Şekil 3.7. Elektrospın cihazının elemanları.....	21
Şekil 3.8. Polimer damlasının elektrik alan altındaki değişimleri .....	21
Şekil 3.9. Taylor Konisinin aşamaları.....	22
Şekil 3.10. Jet akışın aşamaları .....	24
Şekil 3.11. Elektrospın işleminde kullanılan toplaç çeşitleri .....	30
Şekil 3.12. Naylon 6,6 nanofiber tabaka .....	33
Şekil 3.13. Naylon 6,6 nanofiberlerin SEM görüntüleri .....	33
Şekil 3.14. Darbe etkileri .....	35
Şekil 3.15. Ağırlık düşürme test cihazı .....	36
Şekil 3.16. Hasar mekanizmaları .....	39
Şekil 3.17. Kalın tabaka hasarı.....	40
Şekil 3.18. İnce tabaka hasarı.....	40
Şekil 3.19. Saf numunelerin kesitleri .....	42
Şekil 3.20. Naylon 6,6 nanofiber tabaka takviyeli numunelerin kesitleri.....	42
Şekil 3.21. Düşük hızlı darbe testleri için hazırlanan numune örnekleri .....	45
Şekil 3.22. Çekme testleri için hazırlanan numune örnekleri .....	47
Şekil 3.23. Ağırlık düşürme test cihazı .....	48
Şekil 3.24. Çekme testi cihazı .....	49
Şekil 3.25. Çekme testi sonrası numune .....	50
Şekil 4.1. 2CK tabakalı numuneler .....	52
Şekil 4.2. 4CK tabakalı numuneler .....	53
Şekil 4.3. 1NF/2CK tabakalı numuneler .....	53
Şekil 4.4. 3NF/2CK tabakalı numuneler .....	54
Şekil 4.5. Hız-zaman grafiği .....	56
Şekil 4.6. Yer değiştirme-zaman grafiği .....	56
Şekil 4.7. Kuvvet-zaman grafiği .....	58

Şekil 4.8. Kuvvet-yer değiştirme grafiği.....	58
Şekil 4.9. Enerji-zaman grafiği .....	60
Şekil 4.10. Enerji-yer değiştirme grafiği.....	60
Şekil 4.11. Numunelerin enerji absorpsiyonlarının kıyaslanması.....	61
Şekil 4.12. Numunelerin impuls değerleri .....	62
Şekil 4.13. 2CK numunenin testlerden sonra yzeylerinde oluşan hasarlar .....	63
Şekil 4.14. 4CK numunenin testlerden sonra yzeylerinde oluşan hasarlar .....	63
Şekil 4.15. 1NF/2CK numunenin testlerden sonra yzeylerinde oluşan hasarlar.....	64
Şekil 4.16. 3NF/2CK numunenin testlerden sonra yzeylerinde oluşan hasarlar.....	64
Şekil 4.17. 2CK tabakalı numuneler .....	65
Şekil 4.18. 4CK tabakalı numuneler .....	66
Şekil 4.19. 1NF/2CK tabakalı numuneler .....	66
Şekil 4.20. 3NF/2CK tabakalı numuneler .....	67
Şekil 4.21. Gerilme-birim Şekil değiştirme .....	68
Şekil 4.22. Çekme testleri sonrası numuneler.....	69

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Cam fiber özellikleri .....	8
Çizelge 1.2. Takviye fiber malzemelerin fiyat kıyaslaması .....	9
Çizelge 3.1. Naylon 6,6'nın mekanik özellikleri .....	14
Çizelge 3.2. Hexion epoksi mekanik özellikleri .....	17
Çizelge 3.3. Düşük hızlı darbe testi için numunelerin ağırlık değerleri.....	44
Çizelge 3.4. Çekme testi için numunelerin ağırlık değerleri.....	46
Çizelge 4.1. Numunelerdeki enerji absorpsiyon ve geri tepme değerleri .....	61
Çizelge 4.2. Numunelerinin çekme testi sonuçları.....	68



## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

<i>E</i>	: Enerji
<i>J</i>	: Joule
<i>F</i>	: Kuvvet
<i>N</i>	: Newton
<i>V</i>	: Hız
<i>t</i>	: Zaman
<i>s</i>	: Saniye
<i>m</i>	: Kütle
$\delta$	: Yer değiştirme
<i>kg</i>	: Kilogram
<i>h</i>	: Yükseklik

### KISALTMALAR

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
PVC	: Polivinil Klorür
GLARE	: Cam Lamine Alüminyum Takviyeli Epoksi
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme

## 1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında tasarlanan yapıların, bu yapılar üzerine etkiyecek kuvvetlere dayanabilmesi önemlidir. Bu açıdan kullanılacak malzemeler de büyük öneme sahiptir. Bu malzemelerin kullanım yerlerine göre farklı özellikteki kuvvetlerin etkisi altında kalması ve bu kuvvetlerin etkisi sebebiyle malzemelerin darbelere mazur kalması mümkündür. Tek bir tür malzeme kullanarak tavizsiz ve üstün özelliklere sahip bir yapı oluşturmak çoğu zaman mümkün değildir. Bu sorunun çözümü için farklı malzemelerin bir araya getirilmesi ile yeni malzemeler elde edilmiştir. Bu malzemelere kompozit malzemeler denilmektedir.

En geniş tanımı ile iki ya da daha fazla malzemenin bir araya gelmesi sonucu elde edilen kompozit malzemeler, üstün özellikleri sayesinde günümüzde metallerin yerini almaya başlamıştır. Metalik alaşımlardan farklı olarak bir araya getirilen her malzeme kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerini korumaya devam etmektedir.

Genelde, takviye malzemesi olarak adlandırılan yardımcı bir malzemenin, matris olarak adlandırılan bir ana malzemenin içerisine yerleştirilmesi ile elde edilirler. Organik ve inorganik temelli malzemeler de bir araya gelerek kompozit malzemeler oluşturabilirler. Fiberler, partiküller, tabakalar veya bu malzemelerin kombinasyonları kompozitlerde takviye malzemeleri olarak kullanılabilir. Kompozit malzemelerde bir araya getirilen malzemelerin birbiri ile uyumu ve dizilişleri bu malzemelerin özelliklerini belirlemektedir. Tek başlarına olduklarında yüksek rijitliğe sahip olmayan matrisler, takviye elemanlarını bir arada tutup onlara yükü dağıtarak mukavemetli kompozit malzemelerin oluşmasını sağlarlar.

Kompozit malzemeler;

- yüksek mukavemet,
- hafiflik,
- yüksek aşınma direnci,
- yüksek sıcaklık kapasitesi
- kaliteli görünüm,
- yüksek kimyasal dayanım
- ucuza işlenebilme

gibi göze çarpan önemli avantajlara sahiptir. Bu sayede kompozit malzemeler kendilerine

geniş bir kullanım alanı bulmuşlardır. Uzay ve havacılık sektörü başta olmak üzere savunma, otomotiv, inşaat, denizcilik, sağlık, enerji, vb. endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Yine de,

- işlenmelere karşı olan zayıflıkları,
- yönlenmelerine göre değişen mukavemet özellikleri,
- hammaddelerinin nispeten pahalı olabilmesi

gibi durumlar da kompozit malzemelerde karşılaşılabilen olumsuzluklar arasındadır.

Kullanılacak matris ile takviye elemanının uyumlu olması da dikkat edilmesi gereken bir konudur. Uyumsuz olan kompozitlerde üretim hataları, delaminasyonlar vb. hatalar meydana gelerek kompozitin düşük yük kapasitesine sahip olmasına sebep olabilmektedir.

Ayrıca kullanılacak takviye elemanının türüne göre bu elemanların yönlendirilmesi de kompozit malzemenin amaçlanan işlevleri yerine getirebilmesi bakımından önem taşımaktadır. Anizotropik olmaları sebebiyle kompozitlerde kullanılacak uzun boylu fiberlerin yönlenmelerinin mukavemet üzerinde önemli etkileri vardır.

Kompozit malzemeler makroskobik ya da mikroskobik olarak oluşturulabilirler. Makroskobik kompozit çıplak gözle görülebilir seviyede iken mikroskobik kompozit gözle görülemeyecek seviyede oluşmaktadır.

Kompozit malzemeler sadece oluştukları seviyelere göre değil kendilerini oluşturan malzemelerin türlerine göre de sınıflandırılabilirler. Kompozit malzemeler, kullanılan takviye malzemeleri ve kullanılan matris malzemelerine göre 2 ana başlıkta sınıflandırılabilir.

i. Kullanılan matris malzemelerine göre:

- Seramik Matrisli Kompozitler
- Metal Matrisli Kompozitler
- Polimer Matrisli Kompozitler

ii. Kullanılan takviye malzemelerine göre:

- Fiber Takviyeli Kompozitler
- Partikül Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozitler
- Karma Yapılı Kompozitler

## **1.1. Matris Malzemelerine Göre Kompozitler**

### **1.1.1. Seramik Matrisli Kompozitler**

Seramik malzemeler sahip olduğu yüksek sıcaklık dayanımları başta olmak üzere hafiflik, aşınma direnci gibi önemli özelliklere sahiplerdir. Yine de düşük çekme mukavemeti ve ani ısı dalgalarına karşı zayıflıkları bulunmaktadır.

### **1.1.2. Metal Matrisli Kompozitler**

Matrisin metal malzemeden olduğu kompozit türüdür. Yüksek tokluk ve dayanımın beklenildiği malzemelerde matris olarak işlem görürler. Aynı zamanda yüksek sıcaklık ve korozyon dayanımları da vardır. Kolayca şekillendirilebilirler ve geniş uygulama alanı edinebilirler.

### **1.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler**

Polimer matrisli kompozitler günümüzde sıklıkla kullanılan ve endüstrilerde kendisine geniş bir uygulama alanı bulan bir kompozit türüdür. Hafiflerdir ve işlenmeleri de kolaydır. Özellikle epoksi/cam fiber kumaş kompoziti çok sık kullanılan polimer matrisli kompozit türüdür.

Polimer matrisler termoplastik matrisler ve termoset matrisler olarak ikiye ayrılabilir.

**Termoplastik Matrisler:** Termoplastikler ya da daha genel ismiyle plastikler termoset malzemelerden farklı olarak tekrardan eritilebilir ve şekil verilebilen malzemelerdir. Termoplastik malzemeler düzgün bir kristal yapı oluşturamadığından genelde hem amorf hem de kristal yapıyı bir arada bulunduran yarı-kristal yapıda olmaktadır. Elastiklikleri amorf yapıdan, mukavemetleri ise kristal yapıdan gelmektedir. Tekrar eriyebilmeleri sebebiyle çapraz bağlar görülmez. Genelde yüksek viskoziteye sahiplerdir. Polietilen, polistiren, polikarbonat ve poliamid bu tür malzemelere örnek verilebilir.



**Termoset Matrisler:** Termoset malzemeler ise bir kere k rleşmeleri tamamlandıktan sonra tekrardan Şekil değiştirmeleri mümkün olmayan malzemeleri ifade etmektedir. Kompozit malzemelerde çok sık kullanılan bir matris türüdür. K rleşmeleri ısıtılarak ya da kimyasal tepkimelere girmeleri sağlanarak elde edilir. Başlangıçta düşük viskoziteye sahiplerdir. Çapraz bağlar oluştururlar ve bu sebeple tekrardan Őekillendirilemezler. Rjitlikleri termoplastiklere kıyasla yüksektir. Ayrıca yüksek ısı dayanımı, boyutsal olarak düzgünlük, kimyasal dayanım, yüksek korozyon ve akma direnci de termosetlerin üstün özellikleri arasında bulunmaktadır. Epoksi, polyester, vinilester ve poliüretan popüler termoset malzemeler arasında bulunmaktadır.

Epoksiler, termosetler arasında sıklıkla tercih edilen bir malzemedir. Diğer alternatiflerine göre daha pahalı olsa da üstün mukavemet özellikleri, ısı ve boyut konusundaki stabilitesi, yüksek kimyasal ve korozyon direnci sayesinde havacılık ve uzay teknolojileri, denizcilik, otomobil ve inşaat sektörlerinde yaygın olarak kullanılmakta, aynı zamanda yapıştırmalarda, boyama ve kaplamalarda, elektrik sistemlerinde de kendine uygulama alanı bulabilmektedir.

Epoksiler, epoksit olarak adlandırılan yapıların polimerizasyonu ile elde edilen bir malzemedir. Epoksi matrislerin cam fiber kumaş ve karbon fiber kumaş uyumu sayesinde üstün mukavemet özellikleri vardır.

Epoksi genel olarak reçine ve sertleştirici olarak iki kısımdan meydana gelmektedir. Bu iki kısım istenilen özelliklere, kullanılacak yere ve k rleşme zamanı dikkate alınarak ağırlıkça ya da hacimsel olarak belirli oranlarda karıştırılır. Yüksek sıcaklıkta hızlı bir k rleşme elde edilmektedir. Sıvı halinde ya da katı halinde bulunabilen  eşitleri vardır. Kendisini oluşturan maddelere göre farklı özelliklere sahip olabilmektedir. Bisfenol A, bisfenol F, novolak, alifatik bazlı olmak üzere  eşitleri bulunmaktadır (Anonim, 2017a).

Polyesterler ise ucuz olmaları çokça kullanılan bir polimer matris malzemesidir. Esterlerin polimerizasyonu ile elde edilmektedir. 100 derece altındaki ortamlarda fiziksel ve kimyasal dayanımları iyidir. İnşaat sektörü ve denizcilikte kullanılırlar. Kolay kullanım ve düşük viskozite gibi avantajları olmasına rağmen sertleşme sırasında %5-%12 arasında geri çekilmesi ve dolayısı ile takviye elemanı olan fiberlere zarar vermesi, düzgün yüzey elde edebilmesini zor olması, bazik ortamlardaki korozyon zayıflığı ve bünyesine alabildiği su ile bozulması gibi dezavantajları da bulunmaktadır.

## 1.2. Takviye Malzemelerine Göre Kompozitler

### 1.2.1. Fiber Takviyeli Kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler çap/boy oranı üçten büyük olan malzemelerin takviye elemanı olarak kullanılmasıyla elde edilirler ve günümüzde en çok kullanılan kompozit türü olma özelliğine sahiptirler. Fiberlerin boyları kısa veya uzun olabilmektedir. Uzun boylu fiberlerin yük taşıma kapasitesi daha yüksektir. Bu kompozit türünde fiberlerin yönlenmesi kompozit malzemenin kullanılabilirliğini kritik seviyede etkilemektedir. Fiberlerin boy doğrultusunda kompozit malzemenin dayanımı yüksek iken fiberlerin enine doğru olabilecek bir kuvvet kompozitin düşük yük kapasitesine sahip olmasına neden olmaktadır. Örgülü diye tabir edilen her iki doğrultuda da fiberlerin uzadığı yapılar da bulunmaktadır.

Kullanılan fiber ile matrisin etkileşimi önem arz etmekte ve nem emilimi fiberlerin matris ile yaptığı kompozit yapıyı bozabilmektedir.

Fiberlerin matrislere eklenme yöntemlerine göre örgülü fiberler tabaka şeklinde eklenebilirken, kısa boylu fiberler ise düzenli veya düzensiz olarak rastgele bir dağılım ile kompozit yapıya katılabilmektedir. Kırpılmış fiberler dağınık bir yapı oluşturabilmektedir. Bu durum kompozitin izotropik bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır.

Fiber takviyeli kompozitler için son yıllarda polimer olarak polyster, vinilester ve epoksi kullanılmaktadır. Bu polimer malzemelere yine son yıllarda en çok kullanılan cam, karbon ve kelvar fiber kumaşları takviye malzemeler olarak eklenip fiber takviyeli polimer kompozitler elde edilmektedir.

Fiber takviyeli polimer kompozitlerin en belirgin özellikleri yüksek mukavemet, hafiflik ve kolay şekillendirilebilme ve korozyona karşı dirençli olmalarıdır. Bu sayede zorlu çevresel koşullara dayanıklılık gösterebilirler. Uçak ve uzay sanayisi başta olmak üzere birçok farklı endüstrilerde aktif olarak kullanılmaktadırlar.

Cam fiber kumaş takviyeli polimerler, fiber takviyeli kompozitler arasında çok sık kullanılmaktadır. Epoksi polimer içerisine cam malzeme kırılmış olarak katılabilmekte veya kumaş tabaka şeklinde yerleştirilerek kompozit elde edilebilmektedir. Cam malzeme karbon, kevlar ve diğer alternatiflere kıyasla daha zayıf mekanik özelliklere

sahip olsa da ucuz olması ve çoğu zaman yeterli mukavemete sahip olması sayesinde uygulama alanı geniştir.

Fiber takviyeli kompozitleri parçacıklı kompozitler, tabakalı kompozitler ve karma yapıllı kompozitler olarak incelemek mümkündür.

### **1.2.2. Parçacıklı Kompozitler**

Bu kompozit türünde matris içine takviye edilen elemanlar tanecik halinde bulunmaktadır. Bu taneciklerin matris içerisindeki dağılımı ile izotropik bir yapı elde edilebilmektedir. Kompozitin dayanımı bu taneciklerin mekanik özelliklerine bağlıdır.

### **1.2.3. Tabakalı Kompozitler**

Bu kompozit türünde matrisin içerisine takviye elemanı tabaka şeklinde yerleştirilir. Farklı özellikteki tabakaların bir araya getirilip tabakalı hibrit kompozitlerin oluşturulması da mümkündür. Kompozit malzemelerin üstün özelliklerini taşımaları sayesinde yaygın olarak kullanılırlar. Metallere kıyasla üstünlerdir.

Sandviç kompozitler de tabakalı kompozitlerin bir başka çeşidi olarak ifade edilmektedir. Bu kompozit türünde belli bir kalınlığa sahip hafif bir tabakanın iki yüzeyinin ince yüzey plakaları ile kaplanması ile elde edilmektedir.

### **1.2.4. Karma Yapılı Kompozitler**

Kompozit yapı bünyesinde iki ya da daha fazla takviye elemanının bulunması durumunda elde edilen bir kompozit türüdür. Farklı tabakaların bir araya getirilmesi ve/veya matrisin parçacıklarla takviye edilmesi gibi durumlarda elde edilebilmektedir.

## **1.3. Fiber Çeşitleri**

Takviye malzemesi olarak sıkça kullanılan fiberler, kompozit malzeme sektöründe çok önemli bir konumda bulunmaktadır. Bu malzemeler düşük yoğunluklarına rağmen yüksek mukavemet değerlerine sahiplerdir. Kırpılmış ve kısa olanlara kıyasla uzun boylu ve örgülü olan fiberler daha fazla ilgi görmektedir. Cam fiberler bulunduktan sonra

karbon fiberler, aramid fiberler, bor fiberler de üretilmeye başlanmıştır. Küçük çapları sayesinde düşük tane boyutlarına sahiplerdir. Fiber yapıları sayesinde yük dayanımları fazladır.

### 1.3.1. Cam Fiberler

Silika bileşiminin polimer hale getirilip ekstrüzyon edilmesi ile elde edilen bir fiber türüdür. Monomer halde bir silisyum atomu ile iki oksijen atomunun bir arada bulunması ile doğada bulunurken, polimerleşmesi sonrası bir silisyum atomu ile dört oksijen atomu bağ kurmaktadır. Yapısı amorf bir polimerdir. Yüksek yüzey alanı/ağırlık oranına ve yüksek çekme mukavemetine sahiptir. Nem absorpsiyonu dezavantajlardandır ve bu durum fiber yüzeyindeki hataları ve kırılmaları daha kötü bir hale getirip çekme mukavemetinde olası düşüslere sebep olabilmektedir.

Silis malzemeye katkı maddeleri ekleyerek cam fiber imalatında farklı özelliklerde fiberler elde edilebilmektedir. Yaygın türleri ise aşağıda verilmiştir.

**A-Camı:** Soda kireç silikası ile yapılmış alkali camdır. Evlerde kullanılan camlar bu cam yapısındadır. Elektrik dirençleri yoktur.

**C-Camı:** Kalsiyum borsilikatlar ile yapılmış korozyon direnci yüksek bir cam türüdür. Kimyasal çözeltilere karşı dirençlidir.

**E-Camı:** Almüna-kalsiyum borsilikat malzemelerden yapılmış alkali bulunmayan popüler bir cam türüdür. Mukavemeti ve elektrik direnci yüksektir. Endüstrilerde genel amaçlı cam malzeme olarak kullanılır. Cam fiberler çoğunlukla bu cam türünden üretilmektedir.

**S-Camı:** Magnezyum almünasilikat malzemelerden üretilmiş oldukça yüksek mukavemet değerlerine sahip bir cam türüdür. Yüksek sertlik, mukavemet, ısı ve korozyon direnci beklenen yerlerde kullanılır.

Çizelge 1.1’de cam fiberlerin türlerine göre mekanik özellikleri sıralanmıştır.

Çizelge 1.1. Cam fiber özellikleri (Anonim, 2017b)

Cam Fiber Türü	Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]	Akma Mukavemeti [MPa]	Elastik Modülü [GPa]	Uzama [%]
A-Camı	2,44	3300	72	4,8
C-Camı	2,56	3300	69	4,8
E-Camı	2,54	3400	72	4,7
S-Camı	2,53	4600	89	5,2

### 1.3.2. Karbon Fiberler

Karbon fiberler, karbon atomlarının fiber boyunca kristal yapıda birbirine tutunmasıyla elde edilen bir fiber türüdür. Yüksek mukavemeti ve sertliği ile öne çıkmaktadır. Aynı zamanda yüksek ısı ve kimyasal dayanımı, yüksek korozyon direnci, hafiflik gibi özellikleri sayesinde mukavemet ve hafifliğin önem taşıdığı havacılık ve uzay sektörü başta olmak üzere birçok endüstride yoğun olarak kullanılmaktadır. Nispeten gevrek ve cam fiber başta olmak üzere diğer fiberlere göre pahalı olması da dezavantajları arasındadır. Ziftten üretilen karbon fiberler 2000 MPa civarı çekme mukavemeti gösterirken PAN malzemedен elde edilen karbon fiberler 2500-3000 MPa civarı çekme mukavemeti gösterebilmektedir.

### 1.3.3. Aramid (Kevlar) Fiberler

Aromatik poliamid kelimelerinin birleştirilmiş hali olan aramid kelimesinin tanımladığı bu malzemelerin monomer yapısı amid gruplarından oluşur ve bu monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilirler. Du Pont firması tarafından geliştirilmişlerdir. Aramid fiberler de cam fiberlerde olduğu gibi fiber yönünde yüksek mukavemet, fiberin enine olan kuvvetlerde ise zayıf bir davranış göstermektedir. Piyasada en çok Kevlar 49 isimli türü bulunmaktadır. Kevlar 29 ile Kevlar 49 2300-2500 MPa değerinde çekme mukavemeti gösterebilmektedir.

Aramid fiberler mukavemet, hafiflik, ısı direnç ve düşük maliyet gibi özelliklere sahiptirler. Darbe dirençleri de yüksektir. Kimyasallara karşı genelde iyi bir direnç gösterebilirler de güçlü asitlere karşı zayıflıkları bulunmaktadır.

### 1.3.4. Bor Fiberler

Bor fiberler tungsten malzemenin ince bir bor tabakası ile kaplanması şeklinde oluşan fiberlerdir. Bu hali kendisinin başlı başına bir kompozit yapı olduğunu göstermektedir. Mikron boyutunda çapa sahip olup oldukça gevrek malzemelerdir. Yüksek çekme ve basma mukavemetine sahiplerdir. Çekme mukavemet değerleri bor fiberler için 2500-3500 MPa arasında bulunmaktadır. Bor fiberler kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemi ile üretilmektedir.

Fiberlerin maliyetlerini kıyaslanması çizelge 1.2’de verilmiştir.

Çizelge 1.2. Takviye fiber malzemelerin fiyat kıyaslaması (Yıldırım, 2009)

Kompozit	Maliyet
Epoksi/E Camı	1
Epoksi/S Camı	4-8
Epoksi/Kevlar	15-40
Epoksi/Karbon(Yüksek Kararlı)	30-60
Epoksi/Karbon(Yüksek Modüllü)	80-120

### 1.4. Tez Çalışması

Cam kumaş takviyeli tabakalı kompozitler, bulunduğu sınıfın üstün özelliklerine sahip olsa da üretim sırasında tabakalar arasındaki uyumsuzluk, düzensizlik ve gerilme yığılmaları delaminasyona ve farklı türde hasarlara neden olabilir. Delaminasyon tabakalar arası ayrılma anlamına gelmektedir. Üretim hatalarının yanında kompozitlerin, farklı yönlerde farklı mukavemet gösteren anizotropik yapısı da dikkate alındığında, dışarıdan gelen zayıf bir darbe bile kompozit malzemenin işlevini yapamayacak kadar hasarlanmasına sebep olabilir. Kompozitin hasar toleransının artırılması için birçok çalışma yapılmış ve yöntemler elde edilmiştir. Bu yöntemler arasında matris ile fiber arasına nanofiber tabakaların yerleştirilmesi de bulunmaktadır (Zucchelli ve ark., 2010; Saghafi ve ark., 2014; Saghafi ve ark., 2015).

Nanofiber tabaka üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Elektrospın yöntemi de bu yöntemlerden bir tanesi olup nanofiber üretimi için ucuz ve hızlı olması ile dikkat çekmektedir. Bu yöntemde bir pompa, elektrik alan için bir güç kaynağı ve bir de toplaç

olarak sıralanabilecek üç ana eleman vardır.

İlk olarak bir çözücü içerisinde polimer malzeme çözünür ve elde edilen solüsyon belirli bir hızda belirli bir elektrik alan içerisinde, küçük çaplı enjektöre sahip bir şırınga kullanılarak beslenir. Solüsyon damlasının üzerinde toplanan elektrik yükleri ve elektrik alan şiddeti etkileşerek damlanın yüzey gerilmesi bozulmaya başlar. Belli elektrik alan şiddeti değerine ulaşıldığında damla uzamaya başlar ve bu damladan bir jet akışı meydana gelir. Jet akışının olduğu kısımda damla koni biçimini almıştır ve bu koni Taylor Konisi olarak adlandırılır. Damlanın uzaması ile oluşan jet akış, elektrik alan içerisinde ilerlediği sırada üzerinde bulunan çözücüler buharlaşır ve elektrik alan polimere etki etmeye başlar. Polimer incelerek nanofiber olarak toplaç üzerinde toplanır. Taylor konisinden çıkan jet akışın belli bir noktadan sonra gittikçe genişleyen helisel bir yapıyı andıran düzensiz bir hal alması da fiber çapının küçülmesinde etkili olmaktadır. Elektrospin yönteminde solüsyonların hazırlanması çoğu zaman polimerlerin çözücülerle çözünmesi ile elde edilirken, polimerlerin eritilerek elektrik alan içerisinde beslenmesi ile de nanofiber üretiminin yapılabilmesi mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada elektrospin yöntemi ile üretilen naylon 6,6 nanofiber tabakaların epoksi/cam kumaş kompozit malzemelere düzenli aralıklarla takviye edilmesi ve nanofiber eklenmemiş, saf epoksi/cam kumaş malzemeler ile mekanik özelliklerinin kıyaslanması yapılmıştır.

Nanofiber tabaka eklenen numunelerde epoksi içerisinde iki adet cam kumaş tabaka bulunmaktadır. Bu cam kumaş tabakaların arasına yerleştirilen bir adet nanofiber tabaka ile birinci nanofiber takviyeli numune grubu, iki cam kumaş tabakanın hem arasına hem de bu iki cam tabakanın boşta kalan diğer iki yüzeyine gelecek şekilde konumlandırılan üç adet nanofiber tabaka ile de ikinci nanofiber takviyeli numune grubu oluşturulmuştur.

Nanofiber tabaka eklenmemiş numuneler için ise epoksi içerisinde sadece iki adet cam kumaş tabakanın konulması ile birinci saf numune grubu ve epoksi içerisinde sadece dört adet cam kumaş tabakanın koyulması ile de ikinci saf numune grubu oluşturulmuştur.

Her numune grubundan üçer adet üretilmiş olup bu dört numune grubu düşük hızlı darbe ve çekme testlerine maruz bırakılarak gruplar arasındaki ilişki ile nanofiberlerin epoksi/cam kumaş numuneler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Grafikler hazırlanmış ve numunelerin nanofiber tabakalar ile etkileşimi incelenmiştir. Elde edilen veriler yorumlanarak değerlendirilmeler yapılmıştır.

## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Tabakalı kompozit malzemeler ile ilgili literatürde önemli çalışmalar bulunmaktadır. Nanofiberlerin de son yıllarda popülerliğinin artmasıyla kompozit malzemeler ile ilgili çeşitlilik artmıştır.

Belingardi ve ark., (2002) epoksi/cam fiber kumaş tabakalı kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulması ve elde edilen değerler ile bu kompozit malzeme türünün karakterizasyonu ile ilgilenmişlerdir. Cam tabakalar için 3 farklı yönlendirme kullanılmıştır. Malzemenin enerji absorbe özellikleri, kuvvet karşısında gösterdiği davranışlar ve malzemenin akma durumu da göz önüne alınarak kompozit malzemenin karakterizasyonu elde edilmiştir.

Uyaner ve ark. (2007) epoksi/cam fiber kumaş tabakalı kompozit malzemelerin boylarının düşük hızlı darbe testlerine karşı gösterdiği etkileri incelemek için  $[0^\circ, -45^\circ, +45^\circ, 0^\circ, 90^\circ, 0^\circ, +45^\circ, -45^\circ, 0^\circ]$  oryantasyonlu cam tabakaları kullanarak  $180 \times 50 \text{ mm}^2$ ,  $180 \times 100 \text{ mm}^2$ ,  $180 \times 150 \text{ mm}^2$  boyutlarında numuneler hazırlamışlardır. Numune boyutunun büyüdükçe malzemenin yük kapasitesinin arttığını ve yer değiştirmenin azaldığını bildirmişlerdir.

Sihn ve ark. (2008) polikarbonat, polifenilensülfid ve polistiren termoplastikleri, karbon nanotüp takviyeli ve takviyesiz olarak elektrospin işlemine tabi tutarak nanofiber elde etmişlerdir. Sonrasında polikarbonat nanofiber tabakaları epoksi/karbon fiber kompozit malzemeye takviye ederek mekanik testler gerçekleştirmişlerdir. Kıyaslama yapabilmek için saf numuneler de üretmişlerdir. Elde ettikleri verilerle nanofiber takviyesinin, tabakalı kompozitlerin serbest uçlarındaki tabakalar arası gerilme yığılmalarını düşürerek delaminasyon ve mikro kırılmaları azalttığını ya da bastırdığını belirtmişlerdir. Nanofiber takviyesi ile malzemelerin kazandıkları multi fonksiyonel (ısı ve elektrik iletimi) özelliklere de dikkat çekmişlerdir.

Fidan ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada  $[0^\circ, 90^\circ]$  oryantasyonlu cam takviyeli polyester malzemeye düşük hızlı darbe testleri uyguladıktan sonra oluşan hasar hacim geometrisini incelemişler ve hasar mekanizması ile hasar koni hacmi arasında bağlantı kurmuşlardır. Kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme, enerji-zaman grafikleri hazırlamışlardır ve tomografi çekimleri yaparak 3 boyutlu katı modellemeler geliştirmişler ve hasar konisi üzerine incelemeler yapmışlardır.



Akangah ve ark. (2009)  $[0^\circ, +45^\circ, 90^\circ, 45^\circ]$  oryantasyonlu epoksi/karbon fiber kompozit malzemelere naylon 6,6 malzemesinden üretilmiş nanofiber tabakaları takviye etmişlerdir ve saf numuneler de üreterek darbe testleri uygulamışlardır. Testler sonunda elde edilen veriler ışığında nanofiber takviyesinin, malzemenin hasar eşiği için gereken kuvveti %60 oranında yukarıya çektiğini belirlemişlerdir.

Palazzetti ve ark. (2012) epoksi/karbon fiber kompozit malzemesine elektrospin yöntemi ile üretilmiş naylon 6,6 nanofiber tabakaların takviyesinin etkilerini incelemişlerdir. Nanofiber eklenmiş ve eklenmemiş epoksi/karbon fiber malzemelerin Mod I ve Mod II kırılma mekaniklerini incelemişlerdir. Çalışmalar sonucunda nanofiber takviyeli numunelerin delaminasyon ve hasarlanma direncinde artışlar sağlandığını belirtmişlerdir.

Palazzetti ve ark. (2013) elektrospin işlemi ile üretilmiş naylon 6,6 nanofiberleri epoksi/karbon fiber kompozit malzemesine takviye ederek kompozit malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Nanofiberlerin, kompozit yapıların baş ve son kısımlarına ve sadece son kısımlarına yığılmalarıyla oluşturulan iki farklı nanofiber takviyeli grup ile nanofiber takviyesiz numunelerin üretimini yapmışlardır. Numunelere düşük hızlı darbelerden önce bükülme ve titreşim testleri uygulanarak kırılma yüzeylerinin SEM görüntüleri elde edilmiştir. Nanofiberlerin, numunelerin rijitliklerinde azalmalara sebep olmasına rağmen numunelere yüksek sönüm oranı kazandırdıklarını belirtmişlerdir.

Saghafi ve ark. (2015) nanofiber tabakaların polimer kompozit malzemelerin delaminasyon davranışı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Naylon 6,6 ve polikaprolakton malzemedan elektrospin yöntemi ile elde ettikleri nanofiber tabakaları epoksi/cam kompozit malzemesine takviye etmişlerdir. Elde edilen numuneleri testlere tabi tutarak nanofiberlerin enerji salınım oranlarında önemli iyileşmelere neden olduklarını belirlemişlerdir.

Saghafi ve ark. (2015) yaptıkları başka bir çalışmada epoksi/cam fiber kompozit malzemesine elektrospin yöntemi ile üretilmiş nanofiberlerin takviyesi ve elde edilen kazanımları incelemişlerdir. Naylon 6,6 malzemesinden elde edilmiş nanofiber tabakaların takviyesi ile kompozit malzemelerin enerji salınım oranları  $G_{IC}$  ve  $G_{IIC}$  için sırasıyla %62 ve %109'luk kazanımlar sağlandığını belirtmişlerdir. Mod I ve Mod II kırılma mekaniklerinin analizini yapmışlardır. İnceledikleri SEM görüntülerinde naylon

6,6 malzemenin epoksi polimere kıyasla sahip olduğu yüksek suneekliliği sayesinde epoksi matrisin kırılmasına rağmen tabakaları bir arada tuttuğunu gormuşlerdir. Nanofiberler sayesinde delaminasyonun yayılmasının kısıtlandığını, hasarlanma için kırılmaların daha uzun yollar izlemesi gerektiğini ve bunun gercekleşebilmesi için de daha fazla enerjiye gereksinim duyacaklarını bildirmişlerdir.

Papa ve ark. (2016) vakum infüzyon yöntemi ile epoksi/cam kompozit malzeme üretimi için epoksi polimere %20 ve %30 oranında nitril lastik ekleyerek epoksi matrisi modifiye etmişler ve numuneleri 5, 10 ve 20 J enerji değerlerinde olmak üzere üç farklı düşük hızlı darbe testlerine maruz bırakmışlardır. Modifiye edilmemiş epoksi ile saf numuneler de üretilmiş ve kıyaslamalar yapmışlardır. Sonuçlarda, modifiyenin kompozit malzemenin yük kapasitesinde önemli bir değişikliğe sebep olmasa da çentik değerinde artışlara sebep olduğunu ifade etmişlerdir.

Brugo ve ark. (2016) epoksi/karbon fiber kompozit malzemeye elektrospin yöntemi ile üretilmiş naylon 6,6 nanofiber tabakaları takviye etmiş ve Mod I yorulma mekaniğini incelemişlerdir. Saf epoksi/karbon fiber numuneler de üretmişlerdir. Nanofiber takviyeli numunelerde çatlak ilerlemesinin saf numunelere kıyasla 27-36 kat daha yavaş olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca delaminasyon tokluğunun %130 daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Zarei ve ark. (2017) GLARE fiber-metal kompozit malzemesine elektrospin yöntemi ile üretilen naylon 6,6 nanofiber tabakalar takviye ederek malzemeye 6, 12, 18, ve 32 J enerji değerlerinde düşük hızlı darbe testi uygulamışlardır. Aynı zamanda saf GLARE malzemeleri de düşük hızlı darbe testlerine maruz bırakmışlardır. Dinamik yüklerde saf malzeme ile büyük farklar oluşmadığını ama nanofiber tabakaların alüminyum ve epoksi/cam fiber yapışkanlıklarına katkıda bulunduğunu ve bu sayede yapışkanlığın azalması sorununu gidermede etkili olduğunu görmüşlerdir. Hasar bölgesinde de küçülmeler olduğunu da belirtmişlerdir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Bu çalışmada nanofiberlerin elde edilmesi için saf naylon 6,6 malzeme kullanılmıştır. Naylon (poliamid) 6,6 polimer malzemesi heksametilen diamin ve adipik monomerlerin polikondenzasyonu ile üretilmektedir ve alifatik yapıdadır. Lineer kapalı formülü  $[-CO(CH_2)_4-CO-NH-(CH_2)_6-NH-]_n$  şeklindedir (İçoğlu, 2014).

Kovalent bağları sayesinde yüksek mukavemet gösterebilen bir malzeme olup halat, halı, paraşüt üretiminde, giyim ve yapı sektöründe kullanılabilir. Saf naylon 6,6'nın mekanik özellikleri çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Naylon 6,6'nın mekanik özellikleri (İçoğlu, 2014)

Mekanik Özellikler	Birim	Değer
Kopma mukavemeti	[MPa]	82
Kopma uzaması	[%]	20-50
Elastisite modülü	[GPa]	2-3,5
Isı iletim katsayısı	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	0,25
Erime sıcaklığı	[°C]	255-260
Özgül ağırlık	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,15
Nem alma	[%]	4

Elektrospın işlemi için Sigma-Aldrich şirketinden saf naylon 6,6 granüller tedarik edilmiştir.

Bu granüller ağırlıkça %10 konsantrasyonunda bir asit karışımının içerisinde çözülmüştür. Asit karışımı için formik asit ve diklorometan ağırlıkça 1:1 oranlarında kullanılmıştır.

Kullanılan formik asit, %98-100 saflığa, 25 °C'de 1,22 g/mL yoğunluğa, 46,03 g/mol moleküler ağırlığa sahip olup Sigma-Aldrich firmasından temin edilmiştir.

Kullanılan dikloromeran ise Fisher Scientific firmasından temin edilmiştir. %99,9 saflığa sahip olup, 25 °C'de 1.33g/cm<sup>3</sup> yoğunluğa ve 84,93 g/mol moleküler ağırlığa sahiptir. Şekil 3.1'de naylon 6,6 taneleri ve kullanılan formik asit ve diklorometan çözücüleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Naylon 6,6 taneleri ve kullanılan çözücüler

Solüsyonda olabildiğince homojen bir yapı elde edebilmek için solüsyon ultrasonik banyo cihazında 6 saat kadar bekletilmiştir. Ultrasonik banyo, su ortamında ürettiği ses dalgalarını solüsyona ileterek solüsyonda karışım etkisi meydana getirmiş ve solüsyonun homojenliğini arttırmıştır. Şekil 3.2’de kullanılan ultrasonik banyo gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Ultrasonik banyo cihazı



Şekil 3.3. Naylon 6,6 solüsyonu

Şekil 3.3'te görüldüğü üzere solüsyon elektrospın ile nanofiber üretimi için hazır haldedir.

Daha sonra numunelerin üretimi için E-cam kumaşlar kesilerek tabakalar hazırlanmıştır.



Şekil 3.4. Cam kumaş tabaka

Şekil 3.4'te E-cam kumaşından elde edilen tabakaların bir örneği verilmiştir. DostKimya firmasından tedarik edilen malzeme,  $200 \text{ g/m}^2$  çekme gerilmesine ve  $[0^\circ, 90^\circ]$  oryantasyonlarına sahiptir. Tabakaların kalınlıkları  $0,2 \text{ mm}$  olarak ölçülmüştür.

Epoksi olarak L160 reçine ve H160 sertleştirici kullanılmıştır. Epoksi reçinesi ve sertleştiricisi ağırlıkça %80'e %20 oranında karıştırılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Kullanılan epoksi ve sertleştiricisi

Şekil 3.5’te kullanılan epoksi reçinesi ve sertleştiricisi verilmiştir. Hexion markalı epoksi yine Dostkimya adlı firmadan tedarik edilmiştir. -60 ve +50 °C çalışma sıcaklıklarında kullanılabilir. Reçine 700-900 mPa.s ve sertleştirici ise 10-50 mPa.s viskosite değerlerine sahiptir. Epoksinin diğer mekanik özellikleri çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Hexion epoksi mekanik özellikleri (Anonim, 2017c)

Özellikler	Birim	Değer
Yoğunluk	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,18 - 1,20
Kırılma mukavemeti	[N/mm <sup>2</sup> ]	110 - 140
Elastisite modülü	[kN/mm <sup>2</sup> ]	3,2 - 3,5
Çekme mukavemeti	[N/mm <sup>2</sup> ]	70 - 80
Basma mukavemeti	[N/mm <sup>2</sup> ]	80 - 100
Uzama	[%]	5,0 - 6,5
Darbe dayanımı	[KJ/m <sup>2</sup> ]	40 - 50
Su absorpsiyonu (23°C’de)	24 saat [%] 7 gün [%]	0,10 - 0,20 0,20 - 0,50
Kürleşme: 23 °C’de 24 saat, 60 °C’de + 15 saat daha		

### 3.2. Yöntem

Nanofiber üretimi için kullanılacak birçok yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada elektrospin yönteminden yararlanılmıştır ve bu yöntem ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

Testler için çekme testi fazlasıyla yaygın olduğundan bahsedilmemiş, düşük hızlı darbe testi ile ilgili ayrıntılı olarak bilgi verilmiştir.

### 3.3. Nanofiber Üretim Yöntemleri

Nanofiberlerin sürekli ve üniform bir çap değerinde üretilmesi amaçlanan bir durumdur. Çalışmaların artması ile nanofiber elde edilmesi son yıllarda kolaylaşmıştır. Nanofiber üretimi için de birçok yol geliştirilmiştir. Aşağıda bu yöntemlerden bahsedilmiştir.

**Çizme Yöntemi:** Bu metotta polimer damlasına bir mikro pipet daldırılmakta ve nanofiberler çekilmektedir. Bir seferde bir fiber çekilebilmektedir. Bu yöntemle elde edilecek fiberlerin çekme kuvvetinin etkisiyle oluşacak deformasyonlara dayanabilmesi ve sürekliliğini kaybetmemesi önemlidir (Süslü, 2009).

**Faz Ayırma Yöntemi:** Doku mühendisliğinde iskele yapıların oluşturulmasında sık kullanılan bir yöntemdir. Homojenik bir solüsyonu termodinamik değişmelerle çok fazlı bir yapıya çevirme yöntemidir. Beş aşamalı bir işlemdir.

- i. Polimer uygun bir çözücü ile çözünür.
- ii. Polimerin jelleşmesi için kimyasal maddeler katılır ve solüsyon buzdolabında bekletilir.
- iii. Çözücünün uzaklaştırılması için solüsyon saf suda bekletilir
- iv. Jel daha sonra dondurulur.
- v. Donmuş olan jel soğuk kurutma işleminden geçirilir ve karakterizasyonu sağlanır (Süslü, 2009).

**Kendi kendine Tutunma:** Bu yöntem peptit nanofiberler ve peptit amfifillerin üretimi için kullanılmaktadır. Amino asitlerin protein oluşturduğu doğal yollardan esinlenerek geliştirilmiştir. Bu yöntemde van der Waals kuvvetleri, elektrostatik kuvvetler, hidrofobik etkileşimler ve hidrojen bağ durumları değişkenler olarak etki

göstermektedirler (Süslü, 2009).

**Kalıp ile Üretim Yöntemi:** Eşit çaplı nano boyutta silindirik gözeneklerin bulunduğu bir kalıp yardımıyla nanofiberler üretilir. Cidarlı ve cidarsız silindirik nanofiberler üretilmektedir. Metallerden, yarı iletkenlerden, iletken polimerlerden ve daha birçok malzemeden nanofiberler üretilmektedir. Olumsuz tarafı ise sürekli fiber üretilmemesidir (Süslü, 2009).

**Eriyik Püskürtme Yöntemi:** Bu yöntemde polimerler bir kalıptan dışarı doğru yönlendirildikleri sırada sıcak hava ile temasa girmekte ve daha sonra soğuk hava ile karşılaştırılıp inceltilmektedir. Bu şekilde nanofiberler elde edilmektedir (Süslü, 2009).

**Elektrospın Yöntemi:** Son yıllarda popülerlik kazanmış ucuz ve hızlı bir üretim yöntemidir. Bir sonraki başlıkta detaylı olarak incelenecektir.

### 3.4. Elektrospın Yöntemi

1600'lerde temeli atılan ve uzun bir geçmişi olan elektrospın yöntemi nanofiber üretimde etkili, ucuz ve başarılı bir yöntemdir. W. Gilbert 1600'de bir sıvının elektrostatik çekme etkilerini gözlemlemiş, C. F. Schönbein 1846'da yüksek nitrattlı selüloz üretimini yapmıştır ve C. V. Boys 1887'de nanofiber üretimi üzerine bir yayın yapmıştır. J. Zeleny 1900'de elektrospın ile ilgili ilk patenti almış ve 1931 ile 1944 yılları arasında A. Formhals elektrospın üzerine çok sayıda patent almıştır (Karakaş, 2015).

1964 ile 1969 yılları arasında ise G. I. Taylor, daha sonra kendi ismini verdiği, elektrostatik kuvvetler ve yüzey gerilmesi etkilerinin altında damla üzerinde oluşan koniğin matematiksel modellemelerini yaparak elektrospın yönteminin çalışma prensipleri üzerine yönelik araştırmaları başlatmıştır (Karakaş, 2015).

1990'lı yılların başından itibaren elektrospın ile ilgili çalışmalar hızlanmıştır ve Reneker ve ark. elektrospın ismini popüler bir hale getirmişlerdir. (Garg ve ark., 2011; Karakaş, 2015).

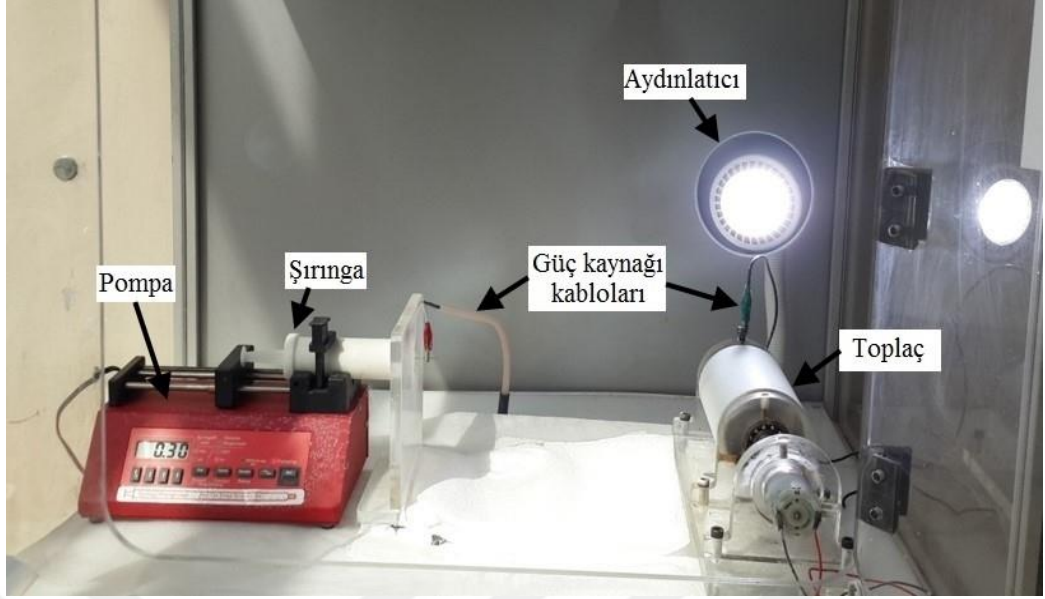
Bu yöntemde bir çözücüde çözünmüş yada eritilmiş bir polimer malzeme elektrik alan şiddeti yardımıyla nanofiber boyuta indirgenerek nanofiber üretimi yapılmakta; katı veya cidarlı, sürekli ve düzenli polimer malzemelerden nanofiberler elde edilebilmektedir.





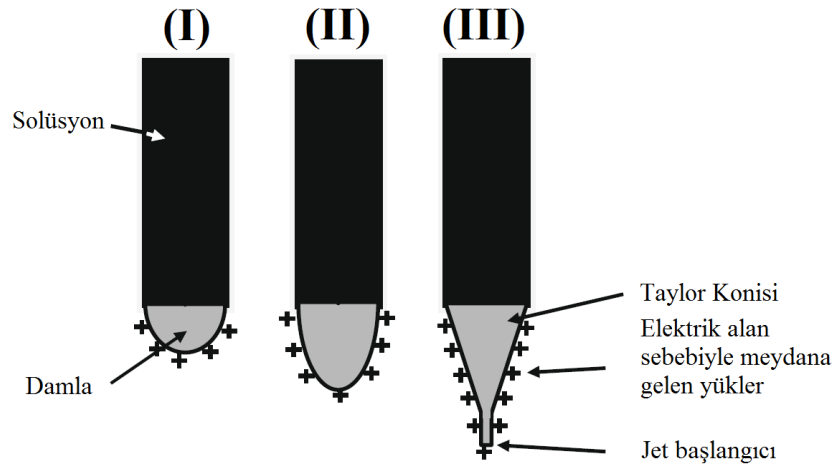
Şekil 3.6. Elektrosin cihazı

Şekil 3.6’da kullanılan elektrosin cihazı verilmiştir. Elektrosin cihazı üç önemli kısımdan meydana gelmektedir. Bu kısımlar, solüsyonun içine doldurulduğu iğneli kap (şırınga), nanofiberlerin üzerinde toplandığı toplaç ve güç kaynağıdır. Güç kaynağı doğru ya da alternatif akım verebilmektedir. Şırınga bir pompa sistemine yerleştirilmekte ve pompa belli bir hızda sürekli besleme yapmaktadır. İğneli şırınganın belli bir mesafe uzağında toplaç bulunmaktadır. Güç kaynağının pozitif ucu iğneye negatif ucu da toplaca bağlanmaktadır. Güç kaynağı 1-50 kV değerinde gerilim uygulayabilmektedir. Verilen akım sebebiyle solüsyon ve aynı zamanda iğne ucundaki damla elektriklenmekte, damlanın yüzeyine yükler eşit miktarda dağılmaktadır. Şekil 3.7’de elemanlar daha ayrıntılı bir biçimde görülmektedir.



Şekil 3.7. Elektrosprin cihazının elemanları

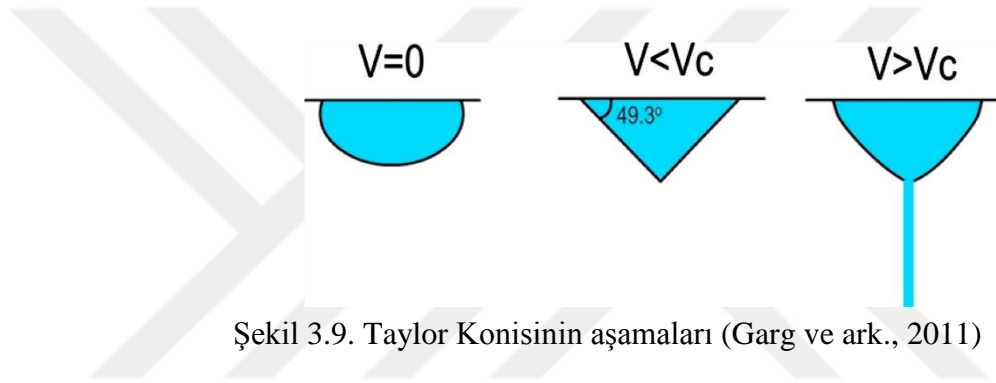
Elektrosprin yönteminde elektrik alan şiddeti, damla üzerindeki yükler ve damlanın yüzey gerilmesi, damla üzerindeki etkili kuvvetlerdir. Güç kaynağının pozitif kutbunun iğneye bağlanması sebebiyle iğne ucunda oluşan damla elektrostatik yükler ile yüklenmektedir (şekil 3.8 (I)). Ayrıca toplaca bağlanan negatif uç ile aralarında bir elektrik alan oluşmaktadır. Damla üzerindeki yüklerin birbirini itmesi ile elektrik alan şiddetinin meydana getirdiği elektrostatik kuvvetler sebebiyle damla uzamaya başlamakta (şekil 3.8 (II)) ve bu etkiler belli bir eşiğe ulaşmış yüzey gerilmesini yendikleri zaman Taylor Konisi meydana gelmektedir (şekil 3.8 (III)).



Şekil 3.8. Polimer damlasının elektrik alan altındaki değişimleri (Baji ve ark., 2010)

Taylor bu konik yüzeyin bir dış elektrik alana maruz kaldığında  $49,3^\circ$ ’lik bir açığa sahip olduğunu ifade etmiştir (Garg ve ark., 2011).

Güç kaynağının çalıştırılması ile solüsyon damlasının yüzeyine elektriksel yükler yayılmaya başlamaktadır. Ayrıca oluşan elektrik alan sebebiyle meydana gelen kuvvetler de damla üzerine etki etmektedir. Bu etkiler yüzey gerilme kuvvetini dengelemeye başlamakta ve solüsyon damlası yarım daire yapısından konik biçimdeki bir geometriye geçiş yapmaktadır. Elektrik alan şiddeti ( $V$ ), kritik voltaj değeri ( $V_c$ )’yi geçtiği zaman elektrostatik kuvvetler yüzey gerilmesini yenmekte ve Taylor Konisinden bir jet akış meydana gelmektedir. Yük yoğunluğunun en yüksek olduğu yer jet akışın başladığı yerdir (Bhat ve ark., 2005; Garg ve ark., 2011). Bu aşamalar şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Taylor Konisinin aşamaları (Garg ve ark., 2011)

Damladan çıkan jet belli bir düzende oluşmaya devam etmekte ve yüzey gerilmesi damlanın şeklinin korunmasını sağlamaktadır. Jet topluca doğru giderken uzamaya devam etmekte ve üzerindeki çözücü ise bu sırada buharlaşmaktadır.

İlerleyen jet akışa etki eden birçok faktör vardır. Bu sebeple birçok akış dengesizlikleri meydana gelmektedir. Jet akış damladan çıktıktan sonra bir süre doğrusal olarak hareket etmekte ve daha sonra dengesiz bir hal almaktadır. Bu durumun oluşmasında polimerin uzaması ve çözücünün buharlaşması, jetin şeklinde meydana gelen değişimler ile alan başına düşen elektrik yükünün değişmesi etkilidir. Ayrıca yüzey gerilmesi ile elektriksel yüklerin arasındaki dengenin bozulması da jet akışın dengesiz bir hal almasına neden olmaktadır.

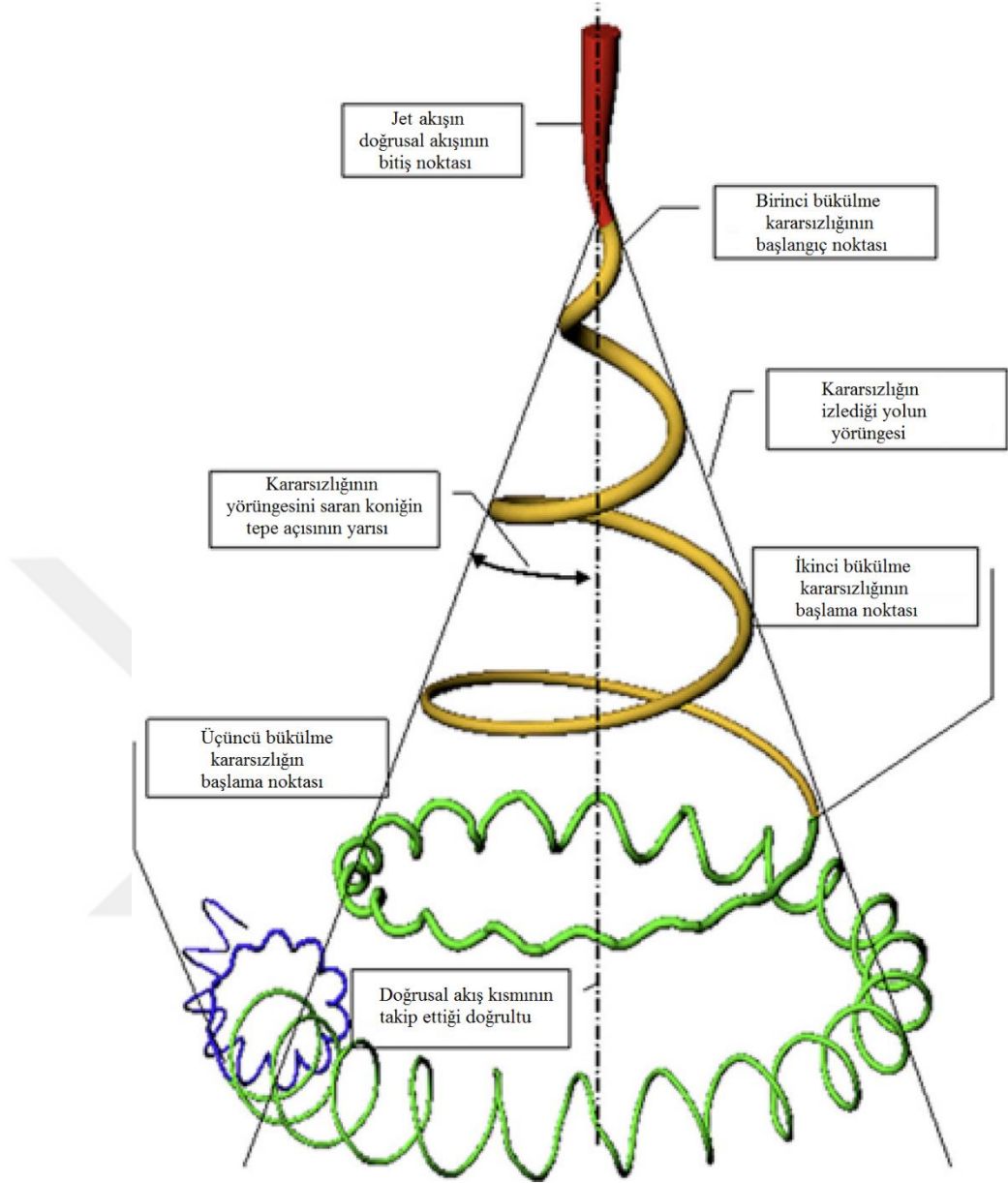
Birim yüzey alanına düşen yük miktarını azaltmak için ana jet akışın yüzeyinden küçük jet akışları çıkabilmektedir. Jet, dallanma ya da spreyleme olarak bilinen işlemde birçok dala ayrılabilir. Yan jet akışların ve fiberlerin oluşumu yüksek konsantrasyonlu, yüksek viskoziteli solüsyonların kullanımında ve/veya aşırı yüksek elektrik alan şiddetine sahip ortamlardaki elektrospin işlemlerinde görülebilmektedir.

Jet akış çapının mikrometrelerden nanometrelere inmesini sağlayan ana etken bükülme kararsızlığıdır. Bükülme kararsızlığı jet akışın bükülmesini ve/veya uzamasını sağlamaktadır. Polimer jet aşırı uzun ve ince olduğunda üzerindeki yükün jet akış üzerinde kendini dağıtabilmesi için daha fazla zaman gerekmektedir. Ayrıca uzamayla birlikte yüklerin konumu da değişmektedir. Yüklerin birbirlerini itmesi ile jet katılaşana kadar kendi doğrultusunda uzamaya zorlanmaktadır. Bu durum jetin uç kısmının oldukça yüksek bir hıza sahip olmasına sebep olmaktadır. Sonuç olarak jet ucunda da yanıl salınımlar meydana gelmekte ve helisel döngüler oluşmaktadır. Bu döngüler jetin uzaması ve çapının küçülmesi ile büyümeye devam etmekte ve kararsızlık ortaya çıkarmaktadır.

Hohman ve ark. (2001a; 2001b) ile Shin ve ark. (2001) elektrospin yöntemi ile üretilen PEO jetin stabil olma durumunu incelemişler üç tür kararsızlığın olabileceğine karar vermişlerdir. İlk olanı Rayleigh kararsızlığı olup, jetin merkezi eksenine simetrik bir şekilde oluşan kararsızlıktır. İkinci kararsızlıkta da yine kendi eksenine göre simetrik davranan bir kararsızlıktır ama üçüncü kararsızlık simetrik davranmayan bir kararsızlık olup whipping kararsızlığı olarak adlandırılmaktadır ve bükülme kuvvetlerinin etkisi ile meydana gelmektedir (Karg ve ark., 2011). Bu aşamalar şekil 3.10'te verilmiştir.

Rayleigh kararsızlığı zıt kuvvetlerin jetin yüzey alanı üzerinde etkileşmesiyle meydana gelmektedir. Elektrik yüklerinin birbirlerini itmesi ile jetin yüzey alanı artmaktadır. Buna karşın yüzey gerilmesi toplam yüzey alanını azaltmaya yönelik etki etmektedir. Bu sebeple kararsızlıklar oluşmakta ve jetin küresel yapıda damlacıklar halinde saçılmasına sebep olmaktadır. Bu durum Rayleigh kararsızlığı olarak bilinmektedir (Huang ve ark., 2003; Karg ve ark., 2011).

Kararsızlıklar sebebiyle kaotik bir hal alan jet akışlar toplaca doğru hareket etmektedir.



Şekil 3.10. Jet akışın aşamaları (Karg ve ark., 2011)

Nanofiberler toplaca ulaştıktan sonra örgülü olmayan bir yapıda, üst üste yığılarak toplanmaktadır.

Nanofiber üretiminde son yıllarda elektrospin yöntemine ağırlık verilmiş ve bu yöntemin parametreleri analiz edilerek fiber çapları kontrol altına alınmaya çalışılmıştır.

### 3.4.1. Elektroselin Yöntemini Etkileyen Parametreler

Nanofiberlerin oluşumunu etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler nanofiberin çapını, yönlenmesini, gözenekli ve cidarlı yapısını etkilemektedir. Bu parametrelerin incelenmesi ve kontrol edilebilmesi ile istenilen özelliklerde nanofiberler elde edilebilmektedir. Bu faktörler;

- kullanılan polimer ve çözücüler
- solüsyonun viskozitesi ve konsantrasyonu
- yüzey gerilimi
- çözeltinin iletkenliği
- çözeltinin sıcaklığı
- uygulanan voltaj
- polimer besleme hızı
- iğne ile toplaç arası mesafe
- çevresel faktörler

olarak sıralanabilir.

**Kullanılan Polimer ve Çözücüler:** Kullanılan polimer ve çözücüler oluşacak nanofiber yapısını birincil dereceden etkilemektedir. Polimerlerin moleköl ağırlıkları solüsyonların viskozitesini, yüzey gerilimini ve iletkenliğini etkilemektedir. Ayrıca yüksek moleküllü polimerler daha kalın nanofiberlerin oluşmasında etkin rol oynamaktadır.

Ayrıca kullanılan çözücüler de uçuculuklarına, dielektrik katsayılarına, yoğunluklarına ve kaynama noktalarına göre nanofiberler üzerinde etkili olmaktadır. Hangi polimerin hangi çözücüde hangi konsantrasyonda çözüldüğü de önem taşımaktadır.

Solüsyonsuz, eritme yoluyla elektroselin işleminde kullanılan polimerler de ise erime sıcaklığının arttırılmasıyla daha küçük çaplı fiberler elde edildiği görülmüştür.

**Solüsyonun Viskozitesi ve Konsantrasyonu:** Katı bir polimerin bir çözücü içerisine belli oranda eklenerek eritilmesi ile solüsyonlar elde edilir. Bu oranlar solüsyonun konsantrasyonunu belirlemektedir. Solüsyonun viskozitesi ile konsantrasyonu arasında doğrusal bir bağlantı vardır.

Elektrospın yöntemi ile nanofiber üretiminde solüsyonun viskozite değerinin etkin bir rolü vardır. Viskozitenin aşırı arttırılması jet akışı olumsuz etkilemektedir. Yüksek viskozitede solüsyon damlalarının ağır hareketi sebebiyle, damlanın iğne ucunda donması ve jet akışın kesilmesi problemi meydana gelmektedir. Düşük viskozitede ise sürekli bir akışının sağlanamaması ile jetin fiber şeklini koruyamaması, küreselleşerek damla halini alması ve bu şekilde toplaç yüzeyine ulaşması ile oluşan bir kusur olan boncuksu yapıların meydana geldiği görülmektedir. Bu açıdan kullanılacak polimer ve çözücüler için uygun bir viskozite aralığının bulunabilmesi nanofiber üretilebilirliği açısından önemlidir. Ayrıca yüksek viskoziteli solüsyonlarda genelde büyük çaplı nanofiberler elde edilmektedir.

Solüsyonun konsantrasyonu da çap değerini etkilemektedir. Solüsyon konsantrasyonunun atırılması büyük çaplı nanofiberlerin elde edilmesine neden olmaktadır.

Demir ve ark. (2002) polimer konsantrasyonunun kübik değerinin nanofiber çapı ile orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek konsantrasyonlu solüsyonlarda, konsantrasyonun kritik bir eşiği aştığı takdirde üretilen nanofiberlerin çoğunluğunun sahip olduğu çap değerlerinin dışında daha küçük çap değerlerine sahip nanofiberlerin de oluşabildiğini görmüşlerdir. Çalışmalarında suda çözülmüş PEO'nun %10'luk konsantrasyonunda iki farklı çap değerine sahip nanofiberlerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.

**Yüzey Gerilimi:** Elektrospın işlemi ile nanofiber elde edilebilmesi için elektrostatik kuvvetlerin, yüzey geriliminin sahip olduğu kuvvet değerinden daha fazla olması gerekmektedir. Bu açıdan solüsyonun sahip olduğu yüzey gerilimi önemlidir. Farklı çözücüler ile farklı yüzey gerilim değerleri elde edilmektedir.

Yüzey geriliminin düşürülmesi ile boncuksu yapıların olmadığı nanofiberlerin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Yang ve ark. (2004) polivinilprolidon malzemenin etanol, DMF ve MC çözücülerini ile solüsyon haline getirilmesinden sonra elektrospın yöntemiyle elde edilen nanofiberlerin yüzeylerini incelemişler ve farklı tür çözücülerin yüzey gerilimine etki edebildiğini göstermişlerdir. Sabit konsantrasyonda, yüksek yüzey gerilimine sahip boncuksu yapıya kıyasla, yüzey geriliminin düşürülerek düzgün nanofiber elde edilebildiğini göstermişlerdir. Yine de aşırı düşük yüzey geriliminin elektrospın işlemi için uygun olmadığı bilinmektedir.

**Çözeltinin İletkenliği:** Solüsyonun iletkenliği polimer türüne, çözücüye ve iyonize edilebilen tuzların solüsyona eklenmesiyle belirlenmektedir. Polimerler birkaç dielektrik malzeme dışında çoğunlukla iletkenlerdir. Solüsyona eklenen iyonlar jetin iletkenliğini olumlu yönde etkilemektedir. İyonlar sayesinde jet akışın yük kapasitesinde artışlar meydana gelmekte ve bu sayede elektrik alan şiddeti içerisinde, jet akışta daha yüksek bir gerilmenin meydana gelmesi sağlanmaktadır. Yüksek iletkenliğe sahip solüsyonlar ile küçük çaplı nanofiberler elde edilebilmektedir (Bhat ve ark., 2005).

Zong ve ark. (2002) Poli-D-Laktik (PDLA) malzeme ile nanofiber üretimi için hazırladıkları çözeltiye  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  ve  $\text{NaCl}$  iyonik tuzları ekleyerek küçük çaplı ve boncuksuz nanofiberler elde etmişlerdir.

İletkenliğin artması ile daha düşük elektrik alan şiddeti gerekmekte ve bu da daha uygun bir çalışma aralığına imkân vermektedir.

**Çözelti sıcaklığı:** Çözelti sıcaklığının artması çözücünün daha hızlı buharlaşmasına ve viskozitenin de azalmasına sebep olmaktadır. Yüksek sıcaklık ile polimer molekülleri hareketlilik kazanarak jet oluşumu kolaylaşmaktadır. Bu sayede küçük çaplı nanofiberler elde edilebilmektedir.

Çözücü kullanılmadan, eritme yöntemi ile elde edilen solüsyonlarda ise sıcaklık artışı ile nanofiber çapının azaldığı, düşük sıcaklıkta ise jet akışının çabuk katılaşması sebebiyle kısıtlandığı ve büyük çaplı fiberlerin elde edildiği gözlenmiştir.

**Uygulanan Voltaj:** Elektrosprin yönteminde güç kaynağı, yöntemi oluşturan bileşenlerden birisidir. Bu güç kaynağının oluşturacağı voltaj ve dolayısı ile elektrik alan da elektrosprin ile nanofiber üretimi üzerinde kritik bir rol oynamaktadır.

Nanofiber üretimi sırasında meydana gelen kararsızlıkların, polimerin mekanik özelliklerinin yanında elektrik alan etkisiyle de meydana geldiği düşünülmektedir. Farklı yapıdaki kararsızlıkların başlama noktalarının, jet akışın çıktığı yüzey ve bu kararsızlıkların buldukları kararsızlık seviyesi ile alakalı olduğu ileri sürülmektedir. Bu durum fiber morfolojisini de etkilemektedir.

Uygulanan voltaj ile damlaya etkiye elektrik alan şiddeti oluşarak, damlanın uzaması sağlanmakta ve fiber oluşumu elde edilmektedir. Bu voltajın artması elektrik alan şiddetinin artmasına ve dolayısı ile damlanın daha fazla uzamasına ve küçük çaplı nanofiberler elde edilmesine neden olmaktadır. Yine de artan voltaj ince nanofiber oluşumunu etkileyen bir diğer parametre olan solüsyonun topluca doğru giderken elde



ettiği uzama süresini kısa tutmakta ve nanofiber çapını etkilemektedir (Zhao ve ark., 2004).

Megelski ve ark. (2002) polyester malzemeden nanofiber üretmede voltaj etkisini incelemişler ve voltaj artışı ile nanofiber çapında küçülme olduğunu belirtmişlerdir.

Beachley ve ark. (2009) polikaprolakton malzemeden elektrospın yöntemiyle nanofiber üretmişlerdir. Elektrospın parametrelerinin fiber çapı ile fiber morfolojisi üzerindeki etkilerini inceledikleri çalışmalarında voltajın artması ile fiber çapının küçüldüğünü belirtmişlerdir.

Yüksek voltaj ayrıca boncuksu yapıların oluşmasına da sebep olmaktadır. Kararsızlıkların artışı ile boncuk oluşumunun ilgisi olduğu düşünülmektedir (Yeneker ve ark., 2008).

Uygulanan voltaj değerinin nanofiberlerin kristal yapısı üzerinde etkisinin olduğu da kabul edilmektedir. Elektrik alan sebebiyle polimer moleküllerinin belli bir düzende dizilmeleri sağlanmaktadır. Bu işlem için zaman gerekmektedir ama artan voltaj sebebiyle polimer toplaç üzerinde daha çabuk toplanacağından kristal yapı için gerekli zaman elde edilemeyebilmektedir. Bu sebeple uygulanan voltajın uygun değerlerde olması önemlidir.

**Polimer Besleme Hızı:** Polimerin beslenme hızı, jet hızını ve dolayısıyla nanofiber oluşumunu etkilemektedir. Çözücünün buharlaşması için gerekli zamanın sağlanabildiği düşük besleme hızları önerilmektedir. Taylor koniğinin kararlı bir hal aldığı besleme hızı uygundur. Aşırı hızlı besleme boncuksu yapıların meydana gelmesine sebep olmaktadır.

Megelski ve ark. (2002) yüksek besleme hızlarında nanofiber çapının ve nanofiber yüzeyindeki gözeneklerin çaplarının arttığını gözlemlemişlerdir.

**İğne ile Toplaç arası Mesafe:** İğne ile toplaç arasındaki mesafe polimerin toplaca gelirken havada asılı kaldığı süre ve elektrik alan şiddeti üzerinde etkiye sahiptir. Bu mesafenin fazla olması elektrik alan şiddetini azaltırken havada kalabilme süresini arttırmaktadır. Bu sürenin yeterince uzun olması çözücünün buharlaşabilmesi açısından önem taşımaktadır. Ayrıca iğne ucu ile toplaç arasındaki mesafenin kısa olması boncuksu yapıların oluşmasına yol açmaktadır. Bu mesafenin fazla olması ise düşük bir elektrik alan şiddetine ve dolayısı ile fiber oluşmamasına yol açabilmektedir.

**Çevresel Faktörler:** Elektrospın işleminin yapıldığı ortamın üretilcek nanofiberler üzerinde etkisi vardır. Çalışılan ortamın hava olması veya farklı bir gaz

olması dikkate değerdir. Ayrıca ortamda bulunan nem oranı, ortamın sıcaklık değeri, basınç gibi etkenler de önemli parametrelerdir (Li ve ark., 2013).

Ortam gazının elektrik alan altındaki davranışları farklılık gösterebilmektedir. Helyum gazının elektrik alan etkisiyle parçalanması ve elektrospin ile üretime engel olabilmesi mümkündür. Ayrıca parçalanma voltajı yüksek Freon-12 gazının ortamında yapılan elektrospin işleminde nanofiberlerin çaplarının hava ortamında üretilenlere kıyasla iki kat daha büyük olduğu görülmüştür (Deitzel ve ark., 1999).

Yüksek nem bulunan bir ortamda su moleküllerinin nanofiberler üzerinde yoğunlaşması sebebiyle nanofiberlerin yüzeylerinde gözenekli yapılar oluşmaktadır. Nem oranının artması ile gözeneklerin boyu ve çapı artmaktadır. Nem ayrıca çözücülerin buharlaşma hızını olumsuz yönde etkilemektedir.

Baumgarden ve ark. (1971) %60'tan fazla bağıl nem bulunan bir ortamda ürettikleri akrilik nanofiberlerin yeterince kuruyamadığını ve toplaç üzerinde dolaşık bir hal aldıklarını gözlemişlerdir.

Basınçta nanofiberlerin oluşumu üzerinde etkilidir. Düşük basınç ortamında elektrik yüklerinin kolay boşalması sebebiyle elektrospin işlemi yapılamaz. Ayrıca düşük basınçta damlanın iğneden düşme durumu daha sık olmakta ve bu da jet oluşumunu sekteye uğratmaktadır.

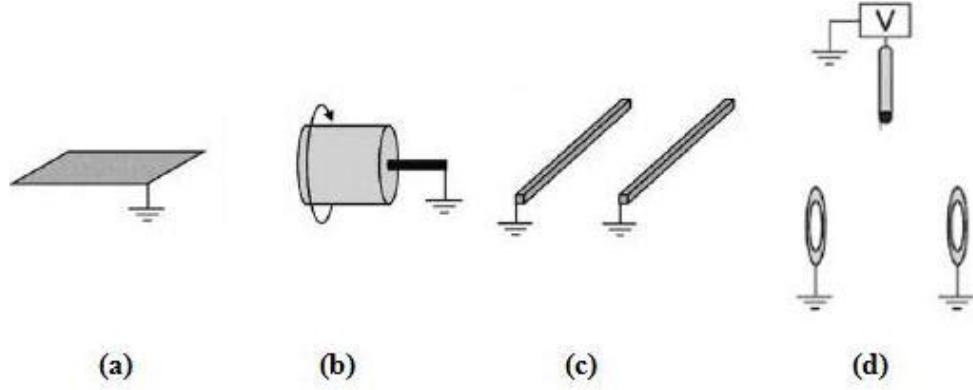
Yine de vakum ortamında yapılan elektrospin işlemlerinin başarılı olduğuna dair çalışmalar vardır. Kim ve ark. (2004), PCL malzemedeki elektrospin yöntemi ile nanofiber üretiminin, vakum ortamında yapılması ile daha iyi özellikte nanofiberlerin elde edildiğini belirtmişlerdir (Grenier ve ark, 2007).

Rangkupan ve ark. (2003) ise elektrospin yöntemi ile polipropilen eriyik polimerinden elde edilen nanofiberlerin çaplarının normal basınçtakilere kıyasla, vakum ortamında çok daha ince olduklarını belirtmişlerdir.

Sıcaklık ise arttıkça daha ince nanofiberlerin elde edilmesini sağlamaktadır. Çevresel sıcaklık solüsyonun sıcaklığını arttırmakta ve nanofiber üretimi sırasında çözücülerin daha hızlı buharlaşmalarını sağlayarak daha ince nanofiberlerin elde edilmesine izin vermektedir.

**Kullanılan Toplaç Çeşitleri:** Toplaçlar nanofiberlerin dizilimleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Elektrospin yöntemi ile üretim yapılırken nanofiberlerin düzgün ve üniform bir şekilde toplanması arzulanmaktadır.

İyi bir toplaç elektrik alanının sağlanabilmesi açısından iletken olmalıdır. Toplaçlar düz bir plaka, kendi eksenine etrafında dönen bir silindir, aralarında mesafe bulunan birbirlerine paralel yerleştirilmiş bir çift çubuk, mesafeli halkalar şeklinde olabilir. Şekil 3.11’te bu toplaçların örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Elektrospin işleminde kullanılan toplaç çeşitleri (Süslü, 2009)

### 3.4.2. Nanofiberlerin Özellikleri

Nanofiberler sahip oldukları mekanik özellikler sayesinde aktif bir şekilde araştırılmakta ve birçok alanda kullanılmaktadır. Nanofiberlerin mekanik özellikleri üzerinde sahip oldukları fiziksel özellikleri etkin bir rol oynamaktadır.

**Fiber boyu:** Elektrospin yöntemi ile sürekli nanofiberler elde edilebildiğinden kilometrelerce uzunluğa sahip nanofiberlerin elde edilmesi mümkündür. Elektrospin yöntemi sürekli olduğundan elde edilen nanofiberler üst üste birikerek yığınlar oluşturabilirler. Bu uzun fiberler kullanılarak örgülü olmayan üç boyutlu yapılar elde edilebilmektedir.

Pawlowski ve ark. elektrospin yöntemi ile üretilen nanofiberlerin, mikro-hava araçlarının kanat iskeletlerinin üzerine doğrudan bir kabuk şeklinde örülerek kullanılabilirliğini göstermişlerdir (Süslü, 2009).

**Fiber Çapı:** Nanofiberlerin kullanımında sahip oldukları fiber çapı önemlidir. Küçük çap daha yüksek yüzey alanı/hacim oranı vereceğinden küçük çaplı nanofiberlerin elde edilmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

Genel olarak nanofiber çapının bir kritik değerin altına indiğinde nanofiberin çekme mukavemetinde ve elastisite modülünde önemli artışlar gözlemlenmektedir. Bu

davranışın nanofiberlerin supramoleküler yapıların büyüklüğünün, nanofiberlerin çaplarına kıyaslanabileceği değerlerde olduğu zaman ortaya çıktığı belirtilmektedir. Amorf fazdaki supramoleküler yapıların makro moleküllerin yönelimi nanofiberin mekanik özelliklerinin iyileşmesinde etkin bir rol oynamaktadır. Nanofiber çapının büyümesi ile nanofiberlerin daha büyük kütleli yapılara benzer mekanik özellikler göstermeye meyilli oldukları belirtilmektedir. Daha küçük çaplarda molekül zincirlerinin daha düzenli olması ve kristalleşmedeki az miktardaki artış nanofiberlerin mekanik özelliklerini güçlendirmektedir. Daha küçük çapta lameller ve fibril yapılar nanofiberin doğrultusunda dizilerek mekanik özellikleri olumlu şekilde etkilemektedir. Daha büyük nanofiber çaplarında ise bu dizilmeler azaldığı için mekanik özelliklerin olumsuz şekilde etkilendiği görülmektedir (Grenier ve ark., 2007; Baji ve ark., 2010).

**Nanofiberlerin Gözenekliliği:** Gözeneklere sahip nanofiberler kullanım alanlarına göre rağbet görebilmektedir. Gözenekler sayesinde yüzey alanının artırılması ile filtreleme, absorpsiyon, ilaç salınımı gibi çalışmalarda yüksek verimliliklerin görülmesi beklenmektedir.

Gözenekler nanofiberlerin üstünde olan ya da nanofiberler arası boşlukları ifade etmektedir. Mezoporlu malzemelere kıyasla elektrospin yöntemi ile üretilen nanofiberler daha düşük yüzey alanlarına sahip olsalar da gözeneklerin nispeten daha büyük ve tam olarak birbirine bağlı olmalarından dolayı üç boyutlu ağların oluşabilmesi mümkündür. Gözenekli yapının varlığı ve bu gözeneklerin büyüklüğü, kullanılacak nanofiber tabakanın amaçlanan hedefi yerine getirmesinde aktif rol oynayan bir faktördür (Garg ve ark., 2011).

Çözücünün buhar basıncı ile ortamda bulunan nem nanofiberlerin gözenekli yapısı üzerinde etkilidir. Rabolt ve ark. elektrospin yöntemiyle karbonat (PC), polimetaklorat (PMMA) ve polistren (PS) malzemelerden ürettikleri nanofiberlerin gözenekli yapısını incelemiş; hızlı buharlaşan çözücülerin kullanımının ve nem miktarının atırılmasının gözeneklerin sayısını ve boyutunu arttırdığını gözlemlemişlerdir (Süslü, 2009).

**Nanofiberlerin Yüzey Özellikleri:** Nanofiberlerin yüzeyleri genellikle düzgün olmakla birlikte bu durum işlem parametrelerine bağlıdır. Düşük konsantrasyon ve/veya yüksek voltaj boncuksu yapılara ve dolayısı ile pürüzlü yüzeylerin oluşmasına sebep olmaktadır. Nanofiberlerin kesitleri genelde daireseldir. Yine de bazı durumlarda polimerik jette bir kabuğun oluşması ve daha sonra çözücü buharlaşırken bu kabuğun

çökelerek şerit halini alması mümkündür. Bu sayede şerit yapıda nanofiberler oluşabilmektedir. Ayrıca yüksek molekül ağırlıklı polimerler ve yüksek konsantrasyon da bu konuda etkin rol oynamaktadır. Yüksek solüsyon viskozitesi çözücü buharlaşmasını yavaşlatarak nanofiberlerin ıslak olarak kalmasına sebep olmakta ve bu sebeple nanofiberler toplayıcıya ulaştıklarında çarpmanın etkisi ile şerit halini almaktadırlar.

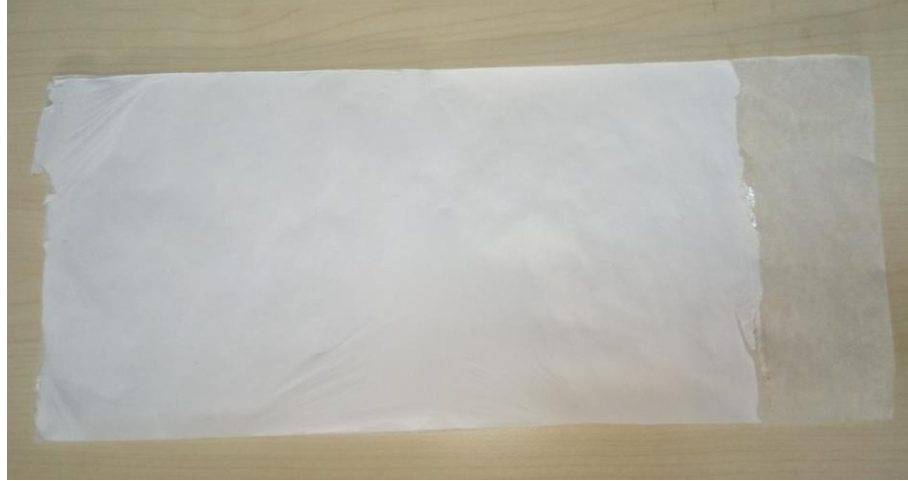
**Nanofiberlerin Zincir ve Kristal yapısı:** Çözücünün hızla buharlaşması ve elektrikle yüklenmiş jetin çabuk uzaması, elektrospin yöntemi ile üretim sırasında polimerlerin molekül zincirlerinin çok yüksek seviyede kesme kuvveti etkisi altında kalmalarına sebep olmaktadır. Uzama oranının elektrospin jetlerde  $10^4/s$  seviyelerinde olduğu raporlanmıştır. (Doshi ve ark., 1995). Bu uzama akışı polimer moleküllerinin, uzamanın olduğu yöne doğru yönelmelerini teşvik etmektedir. Çabuk uzama ve katılma da polimer zincirlerin tekrar eski dengeli yapılarına dönmelerini engellemektedir. Yine bu durum kristalleşebilmek için yeterli zamana fırsat vermediğinden, kristalleşmelerde gerilemeler görülmektedir. Nanofiberlerdeki molekül zincirleri kristal yapıda olmasa da fazlasıyla düzenlidir. Ayrıca yeterli kristalleşme durumunun olmamasından dolayı camsı geçiş sıcaklığı ve kristalleşme tepe noktasının sıcaklığında düşüşler görülmektedir. (Garg ve ark., 2011).

### 3.4.3. Elektrospin Yöntemi ile Nanofiber Üretimi

Bu çalışmada elektrospin cihazında kullanılmak üzere iğneli bir şırınga kullanılmıştır. Solüsyonun 10 mL'lik bir miktarı bir şırınga içerisine çekilerek elektrospin cihazının pompa bölümüne yerleştirilmiştir.

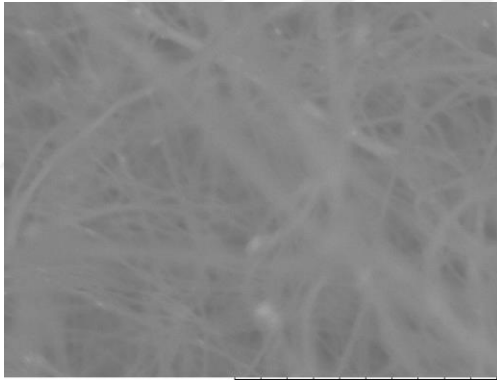
Elektrospin işlemi; 30 kV voltajda, 0,3 mL/saat besleme hızında, iğne ile toplaç arası yaklaşık 20 cm mesafede, ortam sıcaklığı ortalama  $25^{\circ}C$ 'de ve bağıl nem de %50-%60 değerleri arasında gerçekleştirilmiştir.

Elektrospin işlemi bittikten sonra nanofiber tabakalar elde edilmiştir. Tabakalar çözücülerin tamamen buharlaşmasından emin olmak için kullanılmadan önce 48 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır. Nanofiber tabakaların kalınlıkları 0,0030-0,035 mm aralığında ölçülmüştür. Şekil 3.12'de üretilen nanofiber tabakalardan bir tanesinin kullanılmaya hazır hali görülmektedir.



Şekil 3.12. Naylon 6,6 nanofiber tabaka

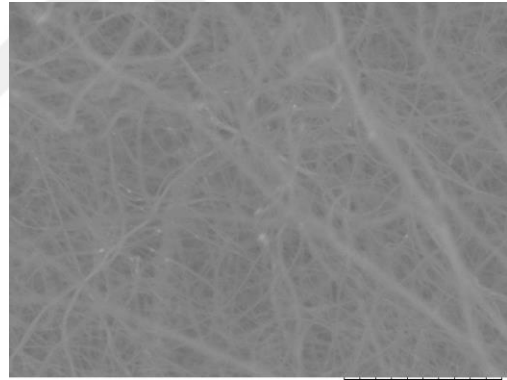
Ayrıca naylon 6,6 nanofiber tabakaların SEM görüntüleri de elde edilmiş ve şekil 3.13’de verilmiştir.



TM-1000\_0301

15.39 L x5.0k 20 um

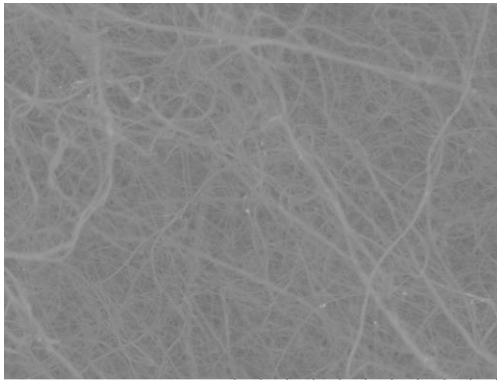
5000X



TM-1000\_0302

15.43 L x2.0k 30 um

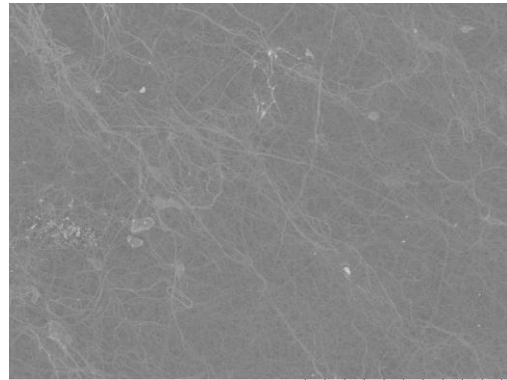
2000X



TM-1000\_0299

15.28 L x1.0k 100 um

1000X



TM-1000\_0298

15.26 L x250 300 um

250X

Şekil 3.13. Naylon 6,6 nanofiberlerin SEM görüntüleri

Nanofiberlerin düzensiz bir dizilim gösterdikleri gözlemlenmiştir. Yine de boncuksu yapıların olmadığı görülmektedir.

### 3.5. Tabakalı Kompozitlerin Darbe Davranışı

Darbe karşısında elastik ve plastik şekil değişimi gösterebilen metallere kıyasla kompozit malzemelerin davranışları farklı olabilmektedir. Kompozit malzemelerde darbe sonucunda oluşan hasar, malzemenin darbe görmeyen yüzeyinde oluşabilir ya da içyapıda delaminasyon şeklinde ortaya çıkabilir. Polimer matrise sahip kompozitler darbe enerjisini elastik deformasyon ve hasar mekanizmaları (delaminasyon, fiber kopması) ile absorbe edebilirler. Tabakalı kompozit malzemelerde kalınlık boyunca takviye sağlanmamışsa en büyük darbe hasarının enine doğrultuda oluşacağı bilinmektedir. Bunun sebebi, malzeme elastik özelliklerinin enine doğrultuda zayıf olmasındandır. Darbe sırasında kompozit malzemeye geçecek olan enerjinin miktarı, malzeme üzerinde oluşacak hasar mekanizmasını belirlemede etkili olmaktadır. Bu sebeple darbe hızının belirlenmesinin önemi vardır.

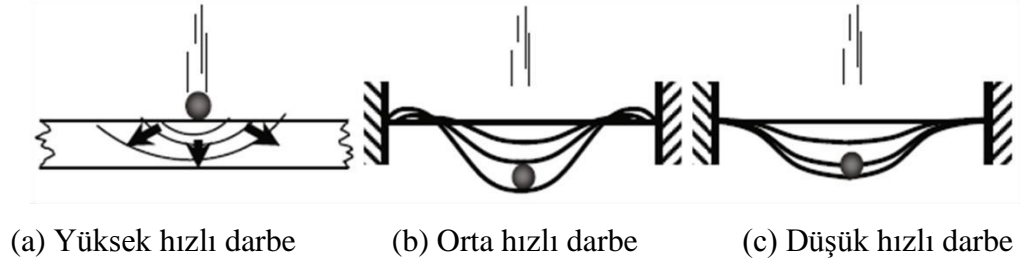
Malzemelerin darbe davranışları kendilerine çarpan cismin hızına göre değişebilmektedir. Bu cisimler düşük hızlı ve yüksek hızlı olabilirler. Bu kategoriler arasında keskin bir ayırım yoktur. Genelde, darbeye sebep olan cisimlerin hızları;

- 1-10 m/s arasında ise düşük hızlı darbelerin,
- 10-50 m/s arasında ise orta hızlı darbelerin,
- 50-1000 m/s arasında ise yüksek/balistik hızlı darbelerin,
- 2-5 km/s arasında veya daha yüksekte ise aşırı yüksek hızlı darbelerin

meydana geldiği kabul edilmektedir.

Düşük hızlı darbelerde malzemenin çok büyük kısmı etkilenirken, yüksek hızlı darbelerde malzemenin tepki verme zamanının kısıtlı olmasından dolayı kısmi hasarlar meydana gelir. Aşırı yüksek hızlı darbelerde ise malzeme sıvı gibi davranır.

Şekil 3.14'te farklı hızlardaki darbelerin malzemeler üzerinde oluşturduğu etkiler gösterilmiştir. Yüksek hızlı darbede (şekil 3.14 (a)) darbe süresinin çok kısa olması ile genişmeli dalganın baskın olduğu davranış, orta hızlı darbede (şekil 3.14 (b)) darbe süresinin kısa olması ile bükülgen ve keskin dalgaların baskın olduğu davranış, düşük hızlı darbede şekil (3.14 (c)) uzun darbe süresi ile yarı statik davranış gözlemlenmektedir.



Şekil 3.14. Darbe etkileri (Potoğlu, 2012)

### 3.5.1. Düşük Hızlı Darbe

Polimer matrisli kompozitler, düşük hızlı darbelerin meydana getirdiği etki sebebiyle kolayca iç hasara uğrayabilirler. Yüzeylerde hasar olmasa da iç hasar ciddi boyutlarda olabilmektedir. Bu durumda kompozit malzemenin yük kapasitesinde kritik seviyede azalma ve çalışma ömründe kısaltmalar meydana gelmektedir. Bu sebeplerden dolayı kompozit malzemelerin hasar mekanizmalarına ve darbe sonrası mekanik özelliklerine yönelik çalışmalar yapılmaktadır.

Düşük hızlı darbelerde temas süresi malzemenin tamamının darbeye tepki verebilmesine imkân kılacak kadar uzun olmasından dolayı malzemelerin yapısının vereceği dinamik tepki önemlidir. Bu durumda daha fazla elastik olarak enerji emilimi mümkündür.

Hasar mekanizmaları malzemeye olan yüklenme durumuna bağlıdır. Düşük hızlı darbede meydana gelebilecek hasar mekanizması ve absorbe edilebilecek enerji için, malzemenin boyutu, rijitliği ve malzemenin sahip olduğu sınır şartları önem arz etmektedir. Düşük hızlı darbenin sahip olduğu enerji matrisin kırılmasına, fiberlerin kopmasına ve delaminasyonlara harcanmaktadır.

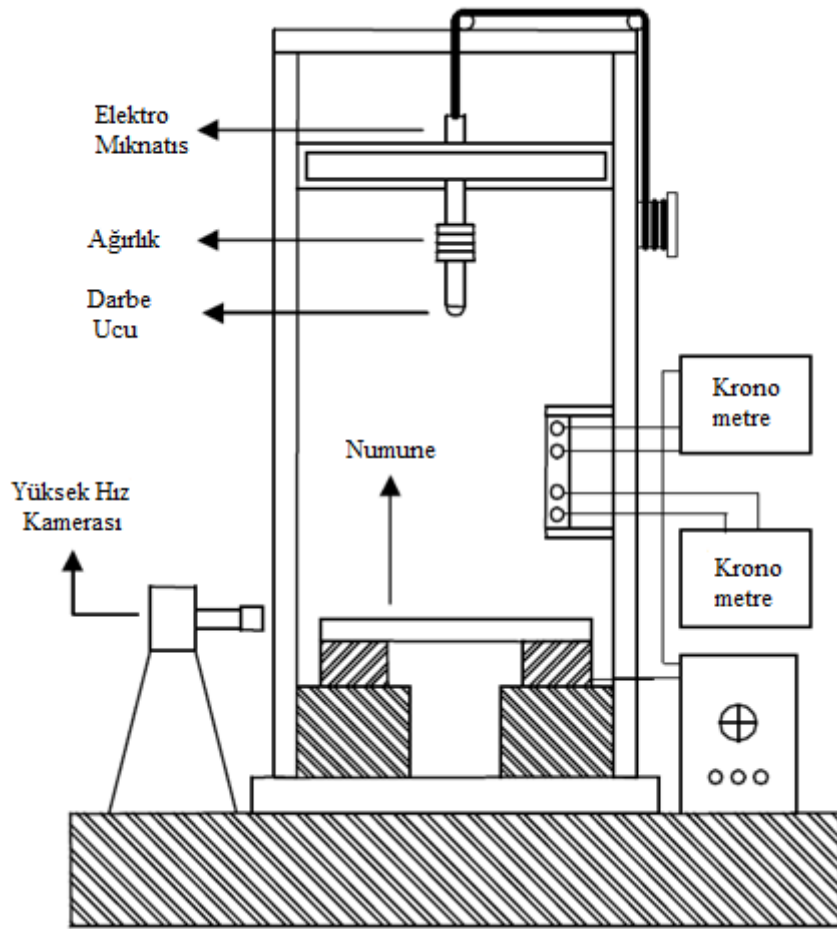
Ayrıca kompozitlerin anizotropik yapısı göz önüne alındığında darbenin kompozite hangi yönde uygulandığının önemi vardır. Kompozit malzemeler, düzlemlerine dik doğrultuda olan darbelere karşı en yüksek hassasiyeti göstermektedirler. En doğrultularında gösterdikleri direnç, boy doğrultularında gösterdikleri dirençten daha zayıftır. Bu durum, en doğrultularında darbe aldıklarında, kompozit malzemelerin yük taşıma kapasitelerinde ciddi düşüşleri ortaya çıkarabilmektedir.

Kompozit malzemelerin bu tür darbelere karşı gösterebileceği davranışlar komplekstir. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin bireysel özellikleri ve bu



bileşenlerin ne şekilde bir araya getirildiği önemli parametrelerdir. Kompozit malzemeye çarpan cismin hızı, geometrik yapısı, toplam kütlesi gibi özellikler önemlidir. Darbenin etkisi ile cismin üzerinde gözle görülemeyecek kadar küçük hasarlardan, belirgin hasarlara kadar farklı sonuçlar gözlemlenebilmektedir.

Darbe testlerinin yapılabilmesi için farklı cihazlar vardır. Genelde düşük hızlı darbeler için, sarkaç çekici, bir yükseklikten bırakılan ağırlık, dönen çark veya bir merminin atılması ile darbe elde edilebilir. Düşük hızlı darbeler için sık kullanılanlar Izod ve Charpy darbe testleri ile bir yükseklikten bırakılan ağırlık ile yapılan darbe testleridir.



Şekil 3.15. Ağırlık düşürme test cihazı (Metin, 2008)

Ağırlık düşürme test cihazı ile yapılan incelemeler gittikçe daha çok kullanılan bir yöntem olmaya başlamıştır. Bu test yöntemi ile geniş bir çalışma alanı elde edilebilmekte ve test parametrelerinin tespiti daha kolay olmaktadır. Ayrıca sonuçlar kolaylıkla değerlendirilebilmektedir.

Darbe özelliklerini; kullanılan test cihazı, darbeyi yapan cismin karakteristik özellikleri, hızı, kütle değeri ile üzerinde test yapılacak olan malzemenin yapısal özellikleri, boyu, sabitlenme şekli gibi parametreler belirler.

Ağırlık düşürme test cihazının basit bir tasarımı şekil 3.15'te verilmiştir. Darbeyi gerçekleştirecek uç kısma bir yük sensörü yerleştirilerek kuvvet değerleri elde edilebilmektedir. Bu test cihazları arasında yer değiştirmeyi ya da ivmeyi ölçebilen versiyonlar da bulunmaktadır. Bu sayede çarpışma sırasındaki kuvvet, yer değiştirme ve ivme değerlerinin ölçümü yapılabilmektedir. Ayrıca darbeden sonra uç kısmın test malzemesi üzerine tekrar çarpması, tek bir darbenin etkisinin araştırılmasını engelleyeceğinden ve malzemede aşırı hasara neden olacağından frenleme sistemleri de bu cihazlara yerleştirilmiştir.

Ağırlık düşürme test cihazda serbest düşme yapan darbe ucunda, Charpy ve Izod testlerinde ise sarkaçta, işlemlere başlamadan önce biriken enerjinin hesaplanması için kullanılan formül:

$$E_0 = \frac{1}{2} mV_0^2 \quad (3.1)$$

dir. Burada  $E_0$ ; J cinsinden başlangıçtaki enerjiyi,  $m$ ; kg cinsinden darbe ucunun kütleini ve  $V_0$ ; m/s cinsinden çarpma sırasında darbe ucunun hızını ifade etmektedir. Darbe ucunun serbest düşme yaptığı kabul edilirse,

$$V_0 = \sqrt{2gh_0} \quad (3.2)$$

formülü kullanılır.  $g$ ; m/s<sup>2</sup> cinsinden yer çekim ivmesi,  $h_0$ ; ise darbe ucunun, test numunesine kıyasla sahip olduğu metre cinsinden yükseklik değeridir. Numune tarafından absorbe edilen toplam enerji değeri ise,

$$E = E_0 - E_f = \left(\frac{1}{2}\right) m(V_0^2 - V_f^2) \quad (3.3)$$

formülü ile elde edilebilir.  $E$ ; toplam absorbe edilen enerjiyi, J cinsinden,  $E_f$ ; darbe ucunun çarptıktan sonraki enerjisini J cinsinden ifade etmektedir.  $V_f$ ; m/s cinsinden darbe ucunun

çarpıktan sonraki yukarı yönlü hareketinde sahip olduğu hızı belirtmektedir. Eğer düşük hızlı darbe testi cihazında çarpma sırasındaki kuvveti ölçecek elemanlar varsa, hız-zaman grafiği oluşturabilmek için,

$$V(t) = V_0 + gt - \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \quad (3.4)$$

formülü kullanılır. Pozitif hız değeri yere doğru olan bir hareketi ifade etmektedir. Burada  $t$ ; s cinsinden test sırasındaki zamanı ifade eder,  $t=0$  darbe ucunun numune ile temas ettiği andır.  $V(t)$ ; zamana bağlı olarak, m/s cinsinden,  $t$  zamandaki darbe ucunun hızını,  $F(t)$ ; zamana bağlı olarak, N cinsinden,  $t$  zamandaki ölçülmüş darbe ucunun çarpma kuvvetini belirtmektedir. Darbe ucunun zamana göre yaptığı yer değişikliğini ölçmek için ise

$$\delta(t) = \delta_i + V_0 t + \frac{gt^2}{2} - \int_0^t \left( \int_0^t \frac{F(t)}{m} dt \right) dt \quad (3.5)$$

formülü kullanılır. Burada  $\delta(t)$ ; zamana bağlı olarak, metre cinsinden, darbe ucunun  $t$  zamanında yaptığı yer değiştirmeyi verir.  $\delta_i$ ;  $t=0$  sırasında darbe ucunun referans alınan noktadan yaptığı yer değiştirmedir. Zamana göre absorbe edilen enerji grafiği için ise

$$E(t) = \frac{m(V_0^2 - [V(t)]^2)}{2} + mg\delta(t) \quad (3.6)$$

formülü kullanılır.  $E(t)$ ; zamana bağlı olarak, toplam absorbe edilen enerjiyi vermektedir ve birimi J olarak kabul edilmektedir.

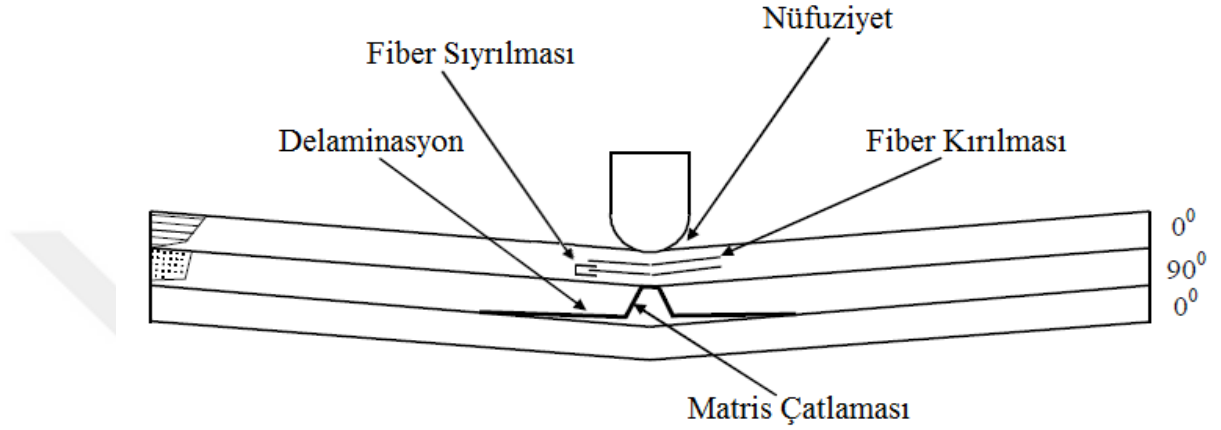
### 3.5.2. Hasar Mekanizmaları

Tabakalı kompozit malzemelerde bileşenlerinin özelliklerine, bir araya getirilme şekline ve darbe ucunun fiziksel özelliklerine göre farklı hasar mekanizmalarından bahsetmek mümkündür. En belirgin olan beş tanesi ise;

- matris hasarı
- fiber kırılması
- fiber sıyrılması

- delaminasyon
- nüfuziyet

şeklinde sıralanabilmektedir. Hasar mekanizmaları kompozit malzemenin mekanik özelliklerinin ortaya çıkarılması açısından faydalıdır. Malzemenin toplam yük kapasitesi, toplam enerji absorbe edebilme kapasitesi gibi önemli faktörlerin belirlenmesi sağlanabilmektedir.



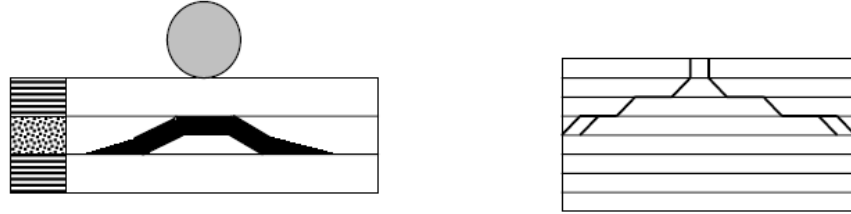
Şekil 3.16. Hasar mekanizmaları (Metin, 2008)

Şekil 3.16’de tipik bir tabakalı kompozit malzeme, darbe ucunun çarpması ile oluşabilecek hasar mekanizmaları gösterilmiştir.

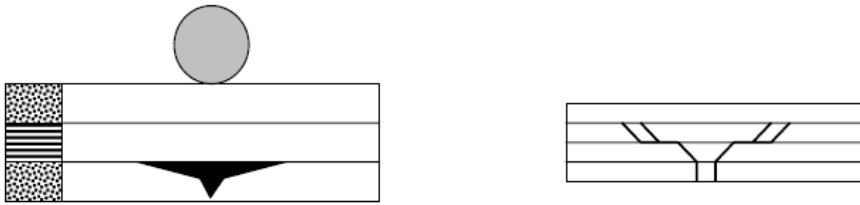
**Matris Hasarı:** Matris hasarı, düşük hızlı darbe testlerinde kalınlık doğrultusunda oluşan hasarın ilk tipidir. Genel olarak kompozit malzeme üzerinde çatlaklar şeklinde ortaya çıkar. Fiber ile matrisin bağlanmasının zayıflaması da matris hasarıdır. Kompozit malzeme kullanılan fiberler tek yönlü ise matristeki çatlamlar oluştuğunda yön olarak fiberlerin doğrultusunu takip ederler.

Tabakalı kompozit malzemelerde matris çatlakları ile başlayan hasar süreci delaminasyonlar ile devam etmektedir. Numunenin kalınlığına göre çekme ve kayma çatlakları oluşabilmektedir. Çekme çatlakları ince malzemelerde sıklıkla görülmektedir. Numunenin darbe alan yüzünün diğer tarafında kalan yüzünde çekme gerilmeleri meydana gelmektedir. Yani tabakalı kompozit malzemenin bu yüzünden hasarlanma başlamaktadır. Kesme çatlakları ise kalın malzemelerde görülmektedir. Ayrıca darbeye maruz kalan alanda gerilme yığılmaları oluşmakta ve darbe alan yüzeyde hasarlanma meydana gelmektedir. Bu hasar çatlakları ile alt tabakalara doğru hareket etmektedir.

Kalın tabakalarda hasarın ilerlemesi bir çam görüntüsüne sahiptir. İnce tabakada ise hasarın ilerlemesi ters çam ağacını andıran bir görüntüye sahiptir. Şekil 3.17 ve şekil 3.18’de kalın ve ince tabakalardaki hasarların ilerlemeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.17. Kalın tabaka hasarı (Metin, 2008)



Şekil 3.18. İnce tabaka hasarı (Metin, 2008)

**Delaminasyon:** Delaminasyon tabakaların ayrılmasıdır. Bu hasar mekanizması farklı eğilme rijitliklerine sahip tabakalar arasında görülmektedir. Bu farklı eğilme rijitlikleri sebebiyle ortaya çıkan farklı kayma gerilmeleri bu problemi ortaya çıkarmaktadır. Bu farklılık arttıkça delaminasyon alanları da büyümektedir. Farklı fiber yönlendirmelerine sahip tabakalar bu duruma örnek verilebilir.

Matrislerdeki çatlaklar delaminasyon için öncüllerdir. Aralarında dikkate değer bir bağlantı vardır. Matris çatlağı alt tabakalara doğru hareket edip ara yüzeye ulaştığı zaman farklı yönlendirilmiş fiberlerin etkisiyle durmakta ve bu ara yüzeyde delaminasyon olarak devam etmektedir.

Delaminasyonlar, matris çatlakları ile ortaya çıkan yüksek seviyedeki düzlem dışı gerilmeler ile tabakaların ara yüzeylerindeki kesme gerilmelerinin etkisiyle Mod I kırılma olarak başlamaktadır. Tabakaların farklı yönlendirmeleri dışında, kullanılan malzemelerin özellikleri, kalınlıkları, tabakaların yerleştirilme şekli de delaminasyon üzerinde etkilidir.

**Fiber Kırılması:** Fiber kırılması da matris çatlama ve delaminasyonlardan sonra görülen bir diğer hasar mekanizmasıdır. Oluşmasında etkili olan etkenler ise yüksek seviyede bölgesel gerilmeler, nüfuziyetin yapmış olduğu etkiler ve yüksek eğilme

gerilmeleridir. Nüfuziyet etkisi darbe ucunun temas ettiği bölgede gerçekleşirken eğilme gerilmelerinin etkileri ise darbenin olmadığı yüzeyde meydana gelmektedir.

**Fiber Sıyrılması:** Bu hasar mekanizması matrisin kırılmasıyla birlikte fiberlerin matris içinde buldukları konumdan çıkmasıyla meydana gelmektedir. Bu hasarın oluşmasındaki temel etken fiberin uzunluğu boyunca aynı seviyede mukavemetin olmamasıdır. Fiber üzerinde, fiberin mukavemetini düşürebilecek bir hata olmadığı zaman fiberin, matris çatlamasının olduğu tabakalar arası gibi maksimum gerilmenin olduğu bir yerden kopması ve herhangi bir sıyrılmanın olmaması beklenir. Ama eğer gevrek fiberin üzerinde, uzunluğu boyunca üniform olmayan bir yük bulunduğunda, fiberin düşük gerilme altında büyük bir kusurun olduğu noktadan ya da yüksek gerilme altında küçük bir kusurun bulunduğu noktadan kırılması mümkündür. Böyle bir durumda bu fiber kırılması maksimum gerilmenin olduğu noktadan belli bir uzaklıkta meydana gelebilmekte ve kompozit malzeme çatlakların ilerlemesi ile bu fiberlerin sıyrılması gözlemlenebilmektedir. (Wells ve ark., 1985).

**Nüfuziyet:** Nüfuziyet, numune üzerinde gözle görülen bir hasar mekanizmasıdır ve malzemeye çarpan cismin malzemeye dalması ile ilgilidir. Nüfuz için gerekli darbe enerji eşik değeri malzemenin kalınlığı ile değişmektedir. Aynı zamanda numune boyutu, kullanılan fiberlerin boyut değerleri ve yönlenmeleri, tabakaların sıralanış şekli, kullanılan matris gibi faktörler de nüfuziyet üzerinde etkilidir.

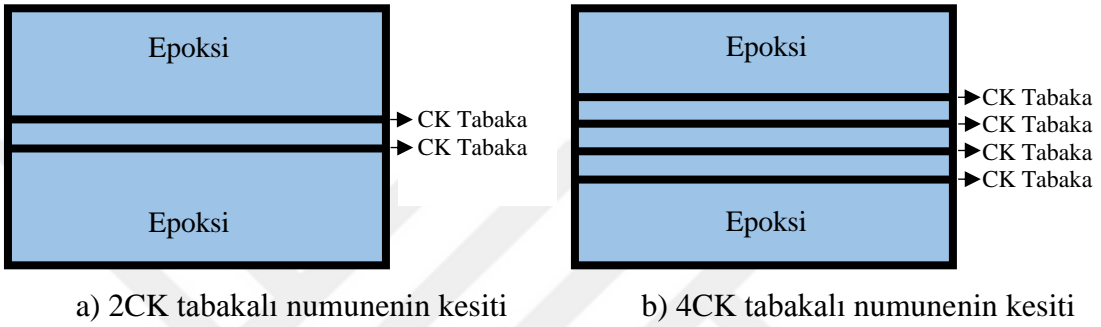
### 3.6 Numunelerin Üretimi

İki adet cam kumaş tabakanın arasına bir adet naylon 6,6 nanofiber tabaka koyulması ve iki adet cam kumaş tabakanın hem arasına hem de boşta kalan diğer iki yüzüne birer adet gelecek şekilde üç adet naylon 6,6 nanofiber tabakaların yerleştirilmesi ile nanofiber takviyeli kompozit malzemeler elde edilmiştir. Epoksi içerisine iki adet ve dört adet cam kumaş tabakanın yerleştirildiği saf kompozit malzemeler de üretilmiştir. Hem cam kumaş hem de nanofiber tabakalar epoksi içerisine elle yatırma yöntemi kullanılarak yerleştirilmiştir.

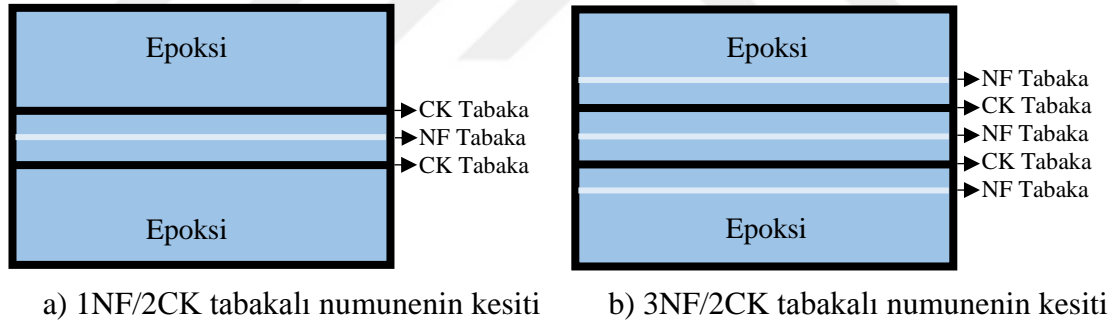
Elde edilen saf numuneler için şekil 3.19 (a)'da iki tabakalı saf kompozitin, şekil 3.19 (b)'de ise dört tabakalı saf kompozitlerin basitleştirilmiş kesit görüntüleri verilmiştir. Nanofiber takviyeli numuneler için ise şekil 3.20 (a)'da bir adet nanofiber tabaka ile

takviye edilmiş kompozit malzemelerin, şekil 3.20 (b)'de ise üç adet nanofiber tabaka ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin basitleştirilmiş kesit görüntüleri verilmiştir.

Şekillerdeki “CK” yazısı cam kumaşı, “NF” yazısı nanofiber tabakaları belirtmektedir. “2CK” 2 cam kumaş tabakalı kompozit numuneyi, “4CK” 4 cam kumaş tabakalı kompozit numuneyi, “1NF/2CK” 1 naylon 6,6 nanofiber tabaka takviyeli 2 cam kumaş tabakalı kompozit numuneyi, “3NF/2CK” ise 3 naylon 6,6 nanofiber tabaka takviyeli 2 cam kumaş tabakalı kompozit numuneyi ifade etmektedir.



Şekil 3.19. Saf numunelerin kesitleri



Şekil 3.20. Naylon 6,6 nanofiber tabaka takviyeli numunelerin kesitleri

Aynı formata sahip tabakalı kompozitler hem düşük hızlı darbe testleri hem de çekme testleri için üretilmiştir. Düşük hızlı darbe testleri için üretilen numuneler ASTM-D-7136 standardı referans alınarak uygun boyutlarda üretilmiştir. Ayrıca numunelerin ağırlıkça değerleri çizelge 3.3'te gram ve yüzde cinsinden verilmiştir. Şekil 3.21'de üretilen düşük hızlı darbe numunelerinin resimleri verilmiştir.

Çekme testleri için ise üretilen numuneler ise ASTM-D-638 standardı referans alınarak uygun boyutlarda üretilmiştir. Çekme numunelerin ağırlıkça değerleri çizelge 3.4'te gram ve yüzde cinsinden verilmiştir. Şekil 3.22'de üretilen çekme testi

numunelerinin resimleri verilmiştir.

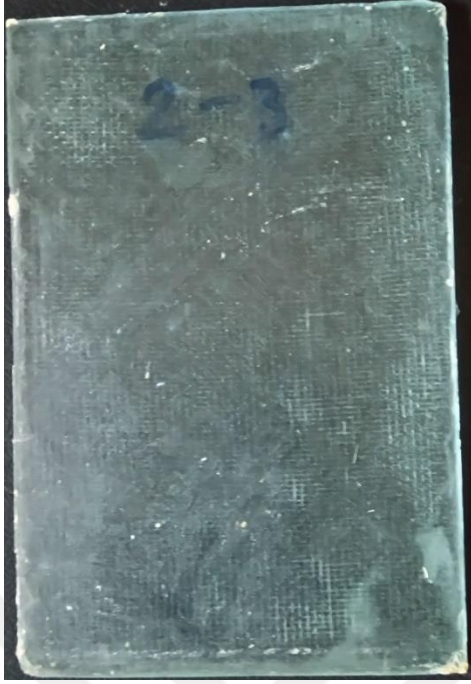
Nanofiber tabakaların ağırlıkça önemli bir yüzde değerleri elde etmedikleri gözlemlenebilmektedir. Numunelerin büyük bölümünü matris olan epoksinin oluşturduğu; nanofiber takviyeli numunelerde dahil olmak üzere, 2 cam kumaş tabaka bulunan numunelerde ağırlığın %7-8'lik bir kısmını, 4 cam kumaş tabaka bulunan numunelerde ise ağırlığın %15-16'lık bir kısmını cam kumaş tabakaların oluşturduğu gözlemlenmiştir.





Çizelge 3.3. Düşük hızlı darbe testi için numunelerin ağırlık değerleri

Numune Grubu	Numune Sayısı	NF Tabaka Ağırlığı	Cam Kumaş Ağırlığı	Epoksi Ağırlığı	Toplam	
2CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	-	5,874	64,912	70,786
		[%]	-	8,326	91,674	100,0
	2	[gr]	-	5,721	61,486	67,207
		[%]	-	8,513	91,487	100,0
	3	[gr]	-	5,925	68,788	74,713
		[%]	-	7,988	92,012	100,0
4CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	-	11,804	61,723	73,527
		[%]	-	16,676	83,324	100,0
	2	[gr]	-	11,703	58,667	70,380
		[%]	-	16,628	83,372	100,0
	3	[gr]	-	11,946	63,957	75,903
		[%]	-	15,739	84,261	100,0
1NF/2CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	0,280	5,890	60,003	73,173
		[%]	0,383	8,054	91,563	100,0
	2	[gr]	0,192	5,723	70,319	76,262
		[%]	0,252	7,504	92,244	100,0
	3	[gr]	0,18	5,801	70,174	76,175
		[%]	0,236	7,615	92,148	100,0
3NF/2CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	0,851	5,892	61,488	68,231
		[%]	1,247	8,637	90,115	100,0
	2	[gr]	0,959	5,864	64,13	70,953
		[%]	1,352	8,265	90,384	100,0
	3	[gr]	0,72	5,799	66,658	73,177
		[%]	0,984	7,925	91,091	100,0



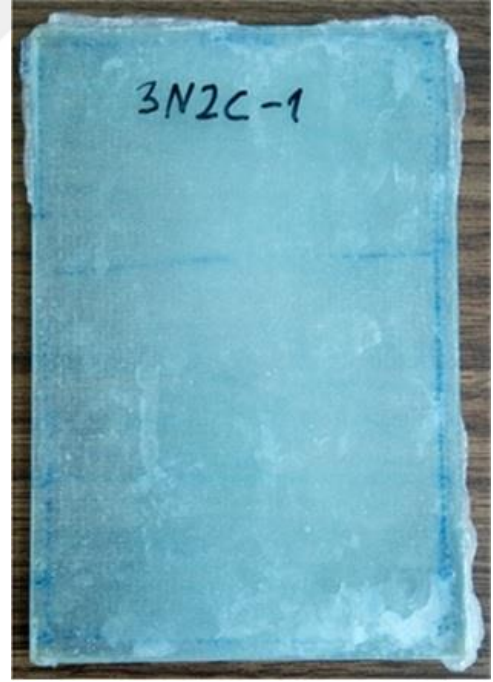
2CK tabakalı saf numune  
örneği



4CK tabakalı saf numune  
örneği



1NF/2CK ve tabakalı numune örneği



3NF/2CK tabakalı numune örneği

Şekil 3.21. Düşük hızlı darbe testleri için hazırlanan numune örnekleri

Çizelge 3.4. Çekme testi için numunelerin ağırlık değerleri

Numune Grubu	Numune Sayısı	NF Tabaka Ağırlığı	Cam Kumaş Ağırlığı	Epoksi Ağırlığı	Toplam	
2CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	-	1	11,736	12,736
		[%]	-	7,852	92,148	100,0
	2	[gr]	-	1,012	12,422	13,434
		[%]	-	5,450	91,550	100,0
	3	[gr]	-	0,98	11,756	12,736
		[%]	-	7,695	92,305	100,0
4CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	-	2,019	11,415	13,434
		[%]	-	15,853	84,147	100,0
	2	[gr]	-	2,01	11,206	13,216
		[%]	-	15,209	84,791	100,0
	3	[gr]	-	2	12,444	14,444
		[%]	-	13,847	86,153	100,0
1NF/2CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	0,03	1,005	12,607	13,642
		[%]	0,220	7,367	92,413	100,0
	2	[gr]	0,029	1,03	13,171	14,23
		[%]	0,205	7,238	92,557	100,0
	3	[gr]	0,030	1,01	15,564	16,604
		[%]	0,182	6,083	93,735	100,0
3NF/2CK Tabakalı Numuneler	1	[gr]	0,126	1,02	12,402	13,548
		[%]	0,929	7,529	91,542	100,0
	2	[gr]	0,116	1,01	12,678	13,804
		[%]	0,842	7,317	91,841	100,0
	3	[gr]	0,093	1,009	12,403	13,505
		[%]	7,471	0,686	91,843	100,0



2CK tabakalı numune



4CK tabakalı numune



1NF/2CK tabakalı numune

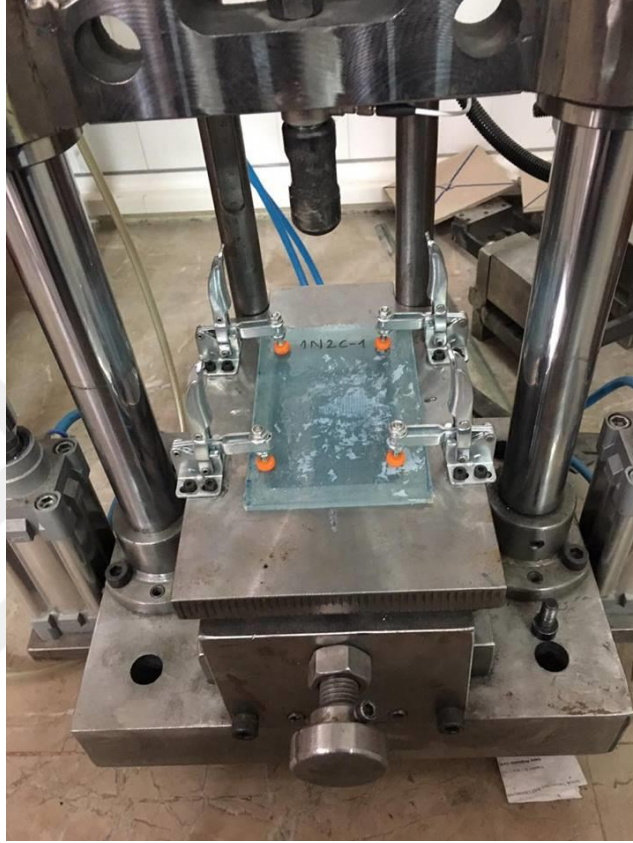


3NF/2CK tabakalı numune

Şekil 3.22. Çekme testileri için hazırlanan numune örnekleri

### 3.6. Düşük Hızlı Darbe Testleri

Testler için kullanılan cihaz, darbe ucunun serbest düşüş yapabileceği bir kule şeklinde tasarlanmıştır ve şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23. Ağırık düşürme test cihazı

Cihazdaki darbe ucu 12 mm yarıçaplı yarım küre şeklinde olup 5,6 kg değerinde bir ağırlığa sahiptir. Darbe ucu 1,5 m/s hızla hareket ederek test numunelerine çarpıp çarpışma sırasında toplam 6,3 J değerinde enerji ortaya çıkarabilmektedir. Numuneler çarpışma amacıyla hazırlanmış bölüme yerleştirilerek hareket etmemeleri için kavrayıcılar ile sabitlenmektedir.

Kuvvet sinyalleri mili volt skalasında çalışan, darbe ucunun uç kısmına bağlanmış bir kuvvet sensörü ile ölçülmektedir. Sinyaller ilk olarak bir sinyal işlemcisi tarafından güçlendirilmekte ve filtrelenmekte, daha sonra da bir veri toplama kartına iletilmektedir.

Darbe ucu numuneye çarptığı zaman, darbe ucunun sahip olduğu kinetik enerjinin bir kısmı numuneye geçmektedir. Geriye kalan kinetik enerji ise darbe ucunu geri iterek

yükselmesine ve tekrardan numuneye çarpmasına sebep olmaktadır. Bu durum, tüm kinetik enerjinin numune tarafından absorbe edilmesine kadar devam etmektedir. Ama kullanılan test cihazında bir frenleme sistemi bulunmakta ve ilk çarpışmadan sonra geri tepen darbe ucunun numuneye tekrar çarpması engellenmektedir.

Cihazın sahip olduğu bu özellikler göz önüne alınarak elde edilen veriler elde bilgisayar ortamına aktarılarak grafikler elde edilebilmektedir.

### 3.7. Çekme Testleri



Şekil 3.24. Çekme testi cihazı

Çekme testleri ise şekil 3.24’te görülen TIRAtest markalı ve 24500 modelli yüksek tonajlı çekme cihazı kullanılmıştır. Cihaz düşük ve yüksek mukavemetli malzemelerin çekme işlemleri için uygundur. Çekme testleri için çekme hızı 1 mm/dk olarak ayarlanabilmektedir. Kuvvet değerlerinde kademe artışı ise 5 N olmaktadır.

Numuneler çenelere yerleştirilerek sabitlenmektedir. Numunelerin kırılğan yapısı göz önüne alınarak hassas bir yerleştirme yapılması gerekmektedir.

Kuvvet ve yer değiştirme değerleri hassas kuvvet ve hareket sensörleri ile elde edilmektedir.



şekil 3.25. Çekme testi sonrası numune

şekil 3.25'te bir numunenin test sonrası durumu görünmektedir. Testler sonrasında elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Cihazın sahip olduğu analiz yardımı ile değerlerden gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilebilmektedir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Düşük hızlı darbe testleri sırasında, kuvvet sensöründe harcanan enerji dikkate alınmamıştır. Bağlantı aparatları ve tabla, numunelere kıyasla daha kalın ve rijit olmasından dolayı bu aparatlara harcanan enerjiler ihmal edilmiştir. Aynı şekilde darbe ucunun yüksek mukavemete sahip olmasından dolayı yine bu aparatta meydana gelen düşük seviyeli elastik şekil değiştirme için gereken enerji miktarı da ihmal edilmiştir. Yine darbe ucu numunelere doğru hareket ederken bu hareketi sağlayan sistemdeki sürtünme kayıpları da ihmal edilmiştir.

Bu ihmaller dikkate alınarak numuneler tarafından absorbe edilen enerjinin ve darbe ucunun geri tepme enerjisinin toplamının tüm enerjiyi verdiği kabul edilmiştir. Absorbe edilen enerjinin, numunelerde şekil değiştirmelerde ve hasar mekanizmalarında kullanıldığı bilinmektedir. Testlerden sonra numuneler incelenerek elde edilen veriler ile düşük hızlı darbe testleri için hız-zaman, yer değiştirme-zaman, kuvvet-zaman, kuvvet-yer değiştirme, enerji-zaman ve enerji-yer değiştirme, impuls ve absorbe edilen enerji grafikleri hazırlanıp yorumlamalar yapılmıştır. Numunelerin darbe testleri sonrası numunelerin resimleri de konu içerisine dâhil edilmiştir.

Çekme testlerinde ise kavrayıcı çenelerde oluşabilecek enerji kayıpları ihmal edilmiştir. Çekme testleri için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri hazırlanarak değerlendirmeler yapılmıştır. Çekme testleri için de numunelerin testler sonrası resimleri de verilmiştir.

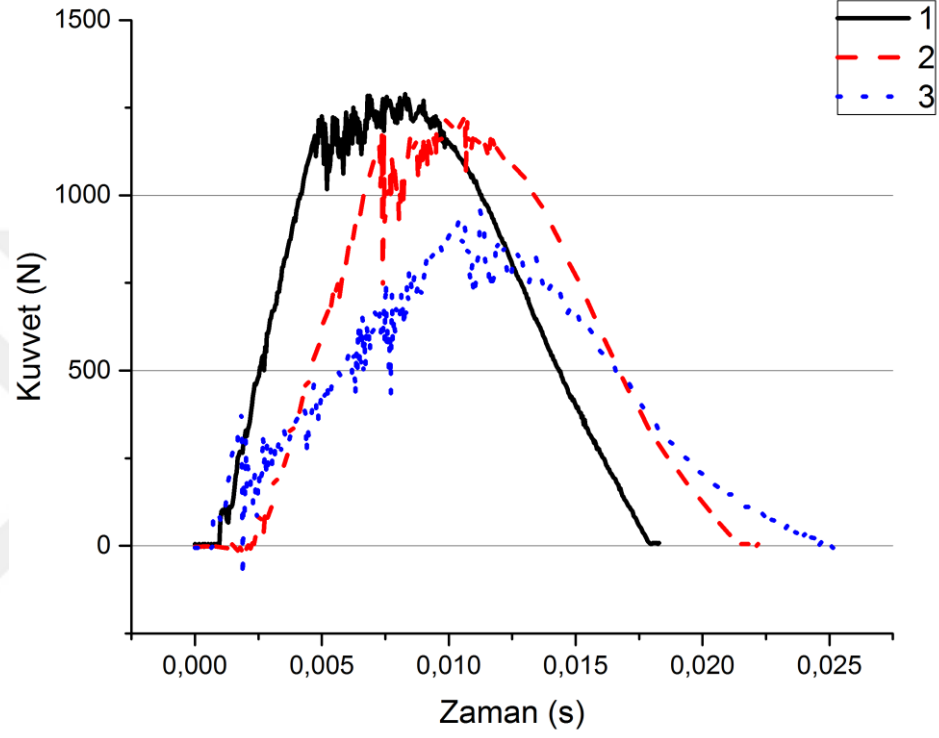
Düşük hızlı darbe testlerinde, kıyaslamaların yapılabilmesi amacıyla ilk olarak her numune grubunun kendi aralarında kıyaslamaları yapılmıştır. Her numune grubunun kuvvet-zaman grafikleri hazırlanmıştır. Kıyaslamalar sonunda ideal bulunan numuneler temsilciler olarak seçilip bu temsilcilerin kıyaslamaları yapılmıştır.

Çekme testleri için de her numune grup için gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri hazırlanarak kendi aralarında kıyaslamaları yapılmıştır. Yine ideal bulunan numuneler seçilerek, temsilcilerin kıyaslamaları yapılmıştır.

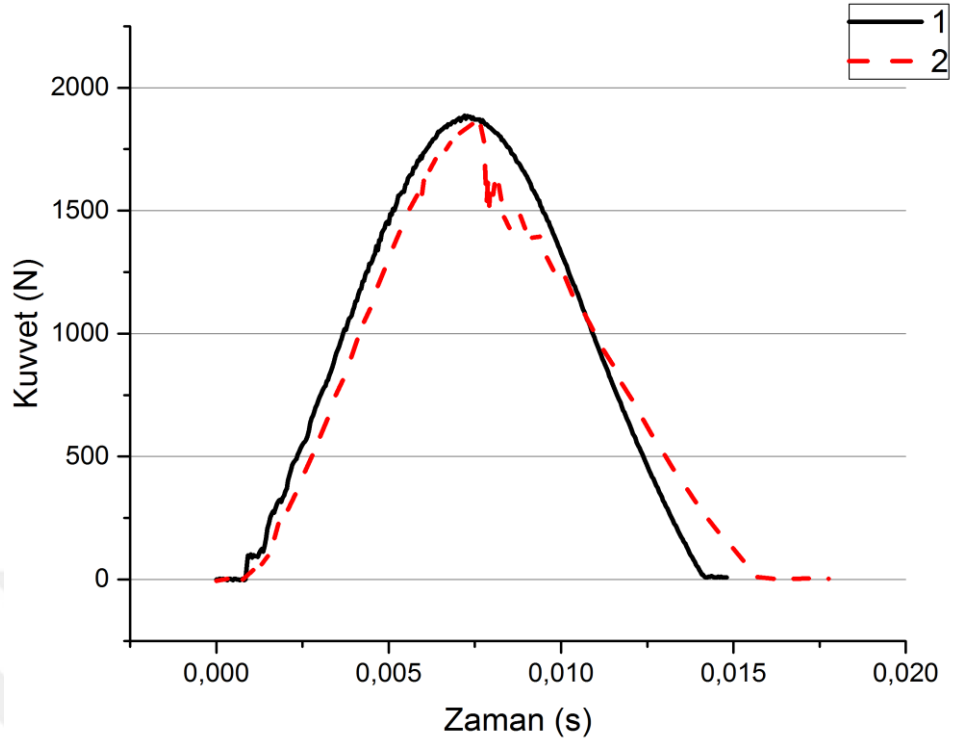


#### 4.1. Düşük Hızlı Darbe Testleri Sonuçları

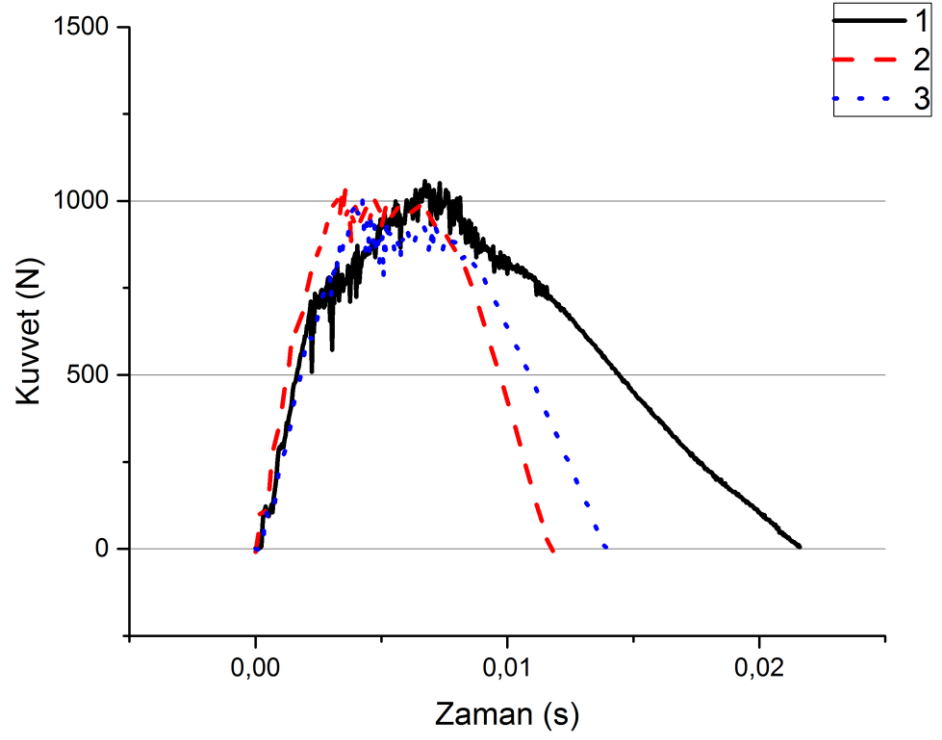
Şekil 4.1'te 2CK tabakalı numuneler, şekil 4.2'te 4CK tabakalı numuneler, şekil 4.3'te 1NF/2CK tabakalı numuneler ve şekil 4.4'da da 3NF/ 2CK tabakalı numunelerin kuvvet-zaman grafikleri verilmiştir.



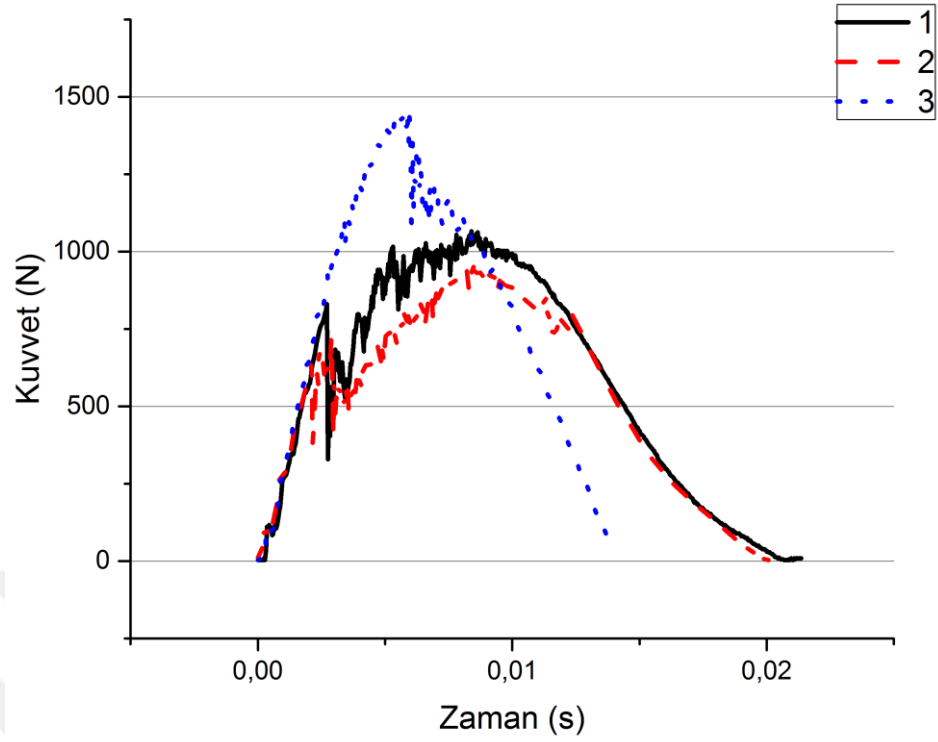
Şekil 4.1. 2CK tabakalı numuneler



Şekil 4.2. 4CK tabakalı numuneler



Şekil 4.3. 1NF/2CK tabakalı numuneler



Şekil 4.4. 3NF/2CK tabakalı numuneler

Numune gruplarından temsilcilerin seçilmesi ile ilgili bilgiler şöyledir;

- 2CK tabakalı numuneler için 1. numune diğer numunelere kıyasla çizdiği ideal grafik sebebiyle temsilci olarak seçilmiştir.
- 4CK tabakalı numuneler için 1. numune diğer numunelere kıyasla çizdiği ideal grafik sebebiyle temsilci olarak seçilmiştir. 4CK grubu için üçüncü numunenin testlerde başarısız olması sonucu veri alınamamıştır.
- 1NF/2CK tabakalı numuneler için 1. numune diğer numunelere kıyasla çizdiği ideal grafik sebebiyle temsilci olarak seçilmiştir.
- 3NF/2CK tabakalı numuneler için 1. numune diğer numunelere kıyasla çizdiği ideal grafik sebebiyle temsilci olarak seçilmiştir. 3. numune aşırı rijit davrandığından ideal değildir.

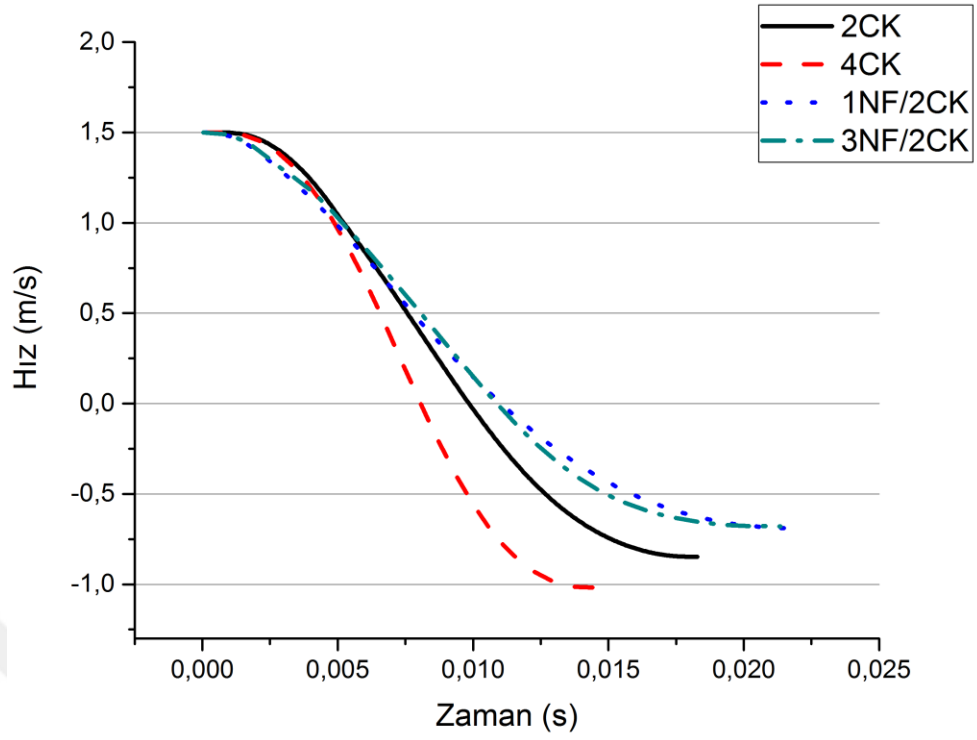
Daha sonra temsilci numunelerin grafikleri hazırlanmış ve yorumlamalar yapılmıştır.

Şekil 4.5'te temsilcilerin hız-zaman grafiği verilmiştir. Grafikteki çizgilerin hepsinin 0,0 değerinin de altına indiği görülmektedir. Bu, darbe ucunun hiçbir numuneyi delmediğini, ilk çarpışmadan sonra darbe ucunun tekrardan yükseldiğini göstermektedir. Darbe ucu numunenin içine doğru nüfuz etmesi durumunda hızın belli bir noktadan sonra sıfırlanması ve geri tepmenin olmaması beklenmektedir. Darbe ucunun numuneyi delme durumunda ise, kinetik enerjinin tamamının sönmülmesi mümkün olmayacağından darbe ucunun yoluna devam etmesi ve bu durumun grafikte negatif bölgeye geçiş olmaması ile göstermesi beklenmektedir.

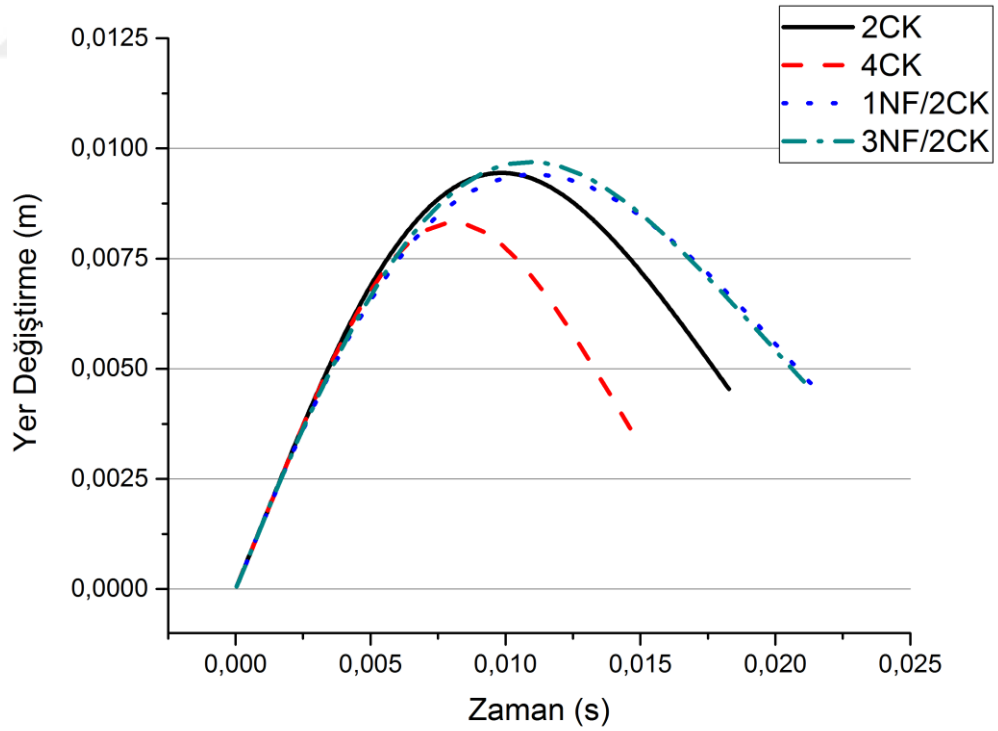
Numunelerin absorbe edebildikleri enerji değerlerine göre geri tepme hızlarında belirgin farklılıklar gözlemlenebilmektedir. 4CK numune diğer numune temsilcilerine kıyasla rijit olması sebebiyle daha fazla kinetik enerjinin darbe ucu üzerinde kalmasını sağlamıştır. 2CK numune de nispeten rijit davranış sergilemiştir. Buna kıyasla nanofiber takviyeli numuneler daha sünek bir davranış göstermişlerdir ve nanofiberler daha fazla enerjinin absorbe olmasını sağlamışlardır.

Şekil 4.6'da ise temsilcilerin yer değiştirme-zaman grafiği verilmiştir. Grafikteki çizgilerin parabolik bir şekilde bir tepe noktasına ulaştıktan sonra aşağı yönlü hareket izledikleri görülmektedir. Darbe ucunun geri tepmesinin olduğu durumlarda yer değiştirmenin azalmasını görmek mümkündür. Darbe ucunun numuneye saplanması durumunda yer değiştirmede azalma görülmemekte ve darbe ucunun numuneyi delip geçmesi durumunda ise sürekli artışın meydana geldiği bir grafik elde edilmektedir.

Grafik incelendiğinde en düşük yer değiştirmenin 4CK numunede meydana geldiği görülmektedir. 4CK numunenin sahip olduğu yüksek rijitlik bu durumu ortaya çıkarmaktadır. 4CK'larda görülen düşük yer değiştirme değerlerine kıyasla 2CK numunede yüksek yer değiştirme elde edilmiştir. Nanofiber takviyeli numuneler ile 2CK numune benzer yer değiştirme değerlerine sahip olsalar da 2CK numune daha kısa sürede yer değiştirme yapmıştır. Nanofiber takviyeli numunelerde görülen uzun yer değiştirme süreleri bu numunelerin kazandığı sünek yapı özellikleri ile açıklanabilmektedir. 3NF/2CK numune, numune grupları arasında en yüksek yer değiştirme değerlerine sahiptir. 1NF/2CK numune de 3NF/2CK numuneye oldukça yakın değerler ortaya koymuştur. Nanofiber takviyeli numuneler hemen hemen aynı sürede yer değiştirmelerini tamamlamışlardır.



Şekil 4.5. Hız-zaman grafiği



Şekil 4.6. Yer değiştirme-zaman grafiği

Şekil 4.7’de temsilcilerin kuvvet-zaman grafiği verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere 4CK numune, numune temsilcileri arasında en yüksek yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu göstermiştir. Hasarlanmadan önce 1960 N değerine kadar ulaşabilmiştir. Buna kıyasla 2CK numune 1200 N yük kapasitelerine ulaşabilmiştir. Nanofiber takviyeli numuneler ise 1000 N civarında yük kapasitesi performansı göstermişlerdir.

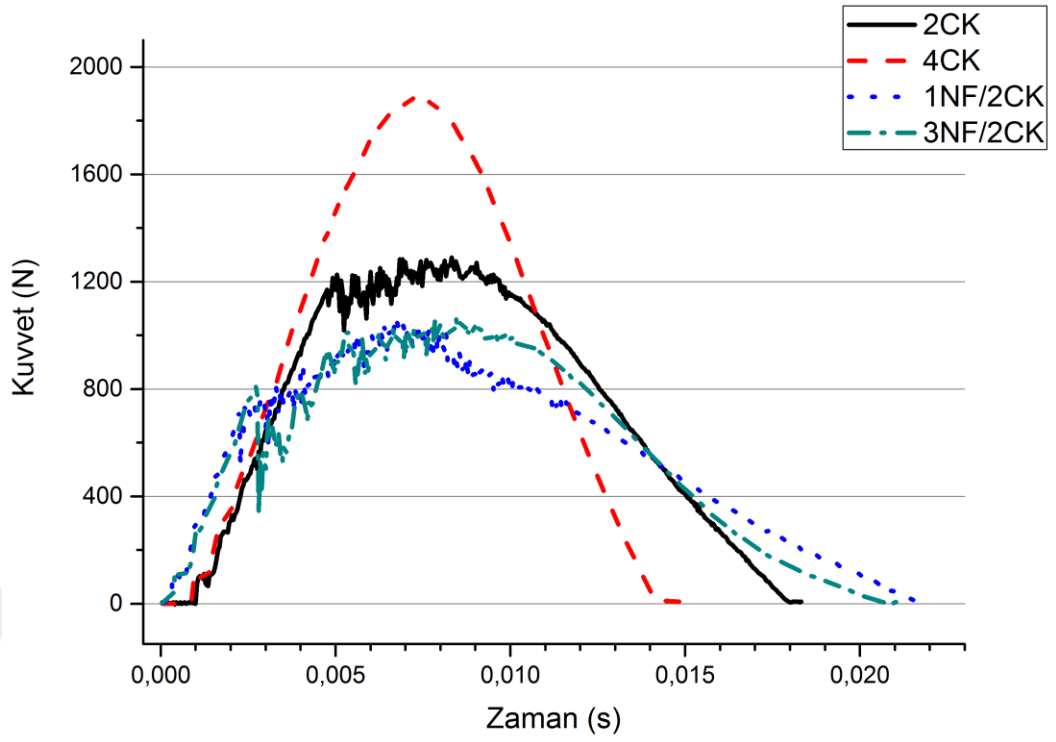
Naylon 6,6 nanofiber tabakalar ile takviyeli numunelerde, yük kapasitesinde azalmalar meydana geldiği görülmektedir. Numunelerde meydana gelen süneklik ile yine bu numunelerde meydana gelen delaminasyonlar yük kapasitesindeki azalmaların sebepleri olarak düşünülmektedir. Yine de nanofiber tabaka takviyeli numunelerin 2CK numuneye çok uzak olmayan yük kapasite değerlerine ulaşabildikleri ve daha uzun süreli dayanım gösterebildikleri görülmektedir. 3NF/2CK ile 1NF/2CK numuneler benzer seviyede performans göstermişlerdir.

4CK çizgisi hariç diğer çizgilerde salınım olduğu görülmektedir. Salınımlar numunelerin merkezlerinde hasar oluştuğuna işaret etmektedir. Ayrıca darbe ucunun çarpmasıyla birlikte numune üzerinde oluşan titreşimler, kuvvet sensörü üzerinde etkilere neden olmakta ve test başlangıcında da salınımlar meydana getirmektedir. Grafikte bu durum görülmektedir. 4CK numunede salınım görülmemekte, diğer numune gruplarında ise belli bir seviye salınım görülmektedir. 4CK numunenin sahip olduğu yüksek rijitlik bu durumun sebebi olarak açıklanabilmektedir.

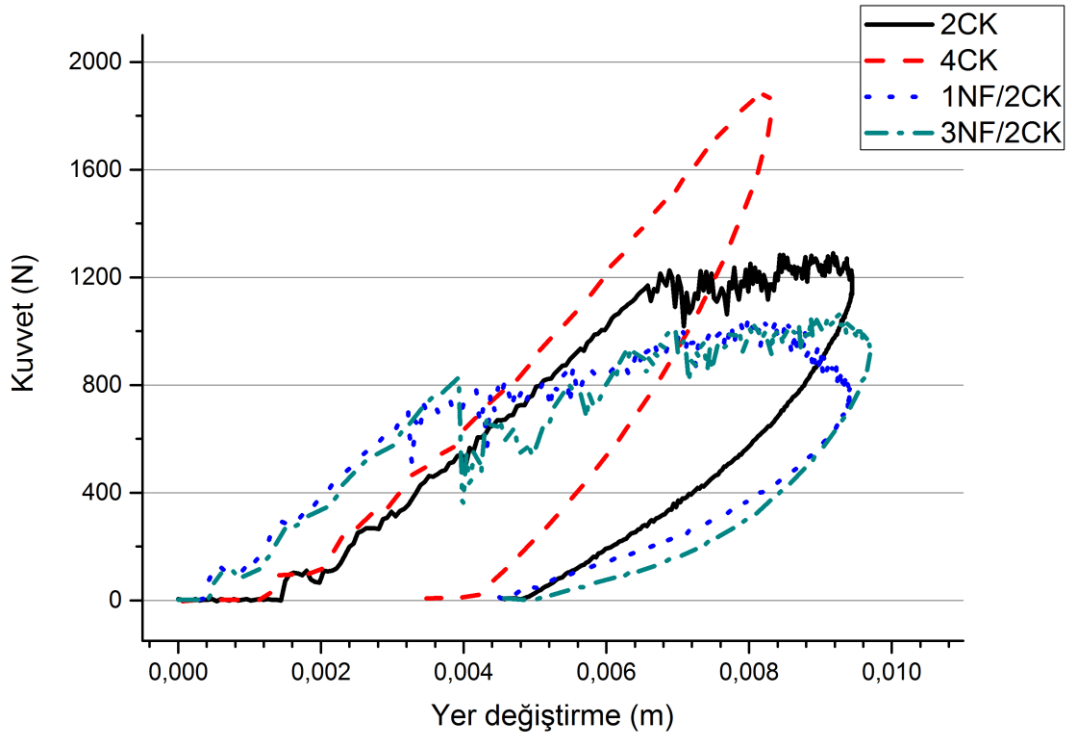
Şekil 4.8’de kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Grafikte çizgilerin kapalı bir eğri oluşturma eğiliminde oldukları görülmektedir. Bu kuvvet-yer değişimi grafiklerinde görülen tipik bir durumdur. Kapalı eğrilerin oluşmaması ise hasar mekanizmaların meydana gelmesi sebebiyledir.

Darbe ucunun çarpması ile birlikte yer değişmeler oluşmaya başlamakta ve yer değişimi bir tepe noktasına ulaştıktan sonra tekrar azalmaktadır. İş formülünden yararlanarak, grafiklerde çizgilerin altında kalan alanın hesaplanmasıyla işin yani absorbe olan enerjinin hesaplanması mümkündür.

Yüksek rijitliği sebebiyle 4CK numunede düşük seviyede yer değiştirme gözlemlenmiştir. 2CK, 1NF/2CK ve 3NF/2CK numune temsilcileri ise birbirlerine yakın seviyede yer değişmeler göstermişlerdir.



Şekil 4.7. Kuvvet-zaman grafiği



Şekil 4.8. Kuvvet-yer değiştirme grafiği

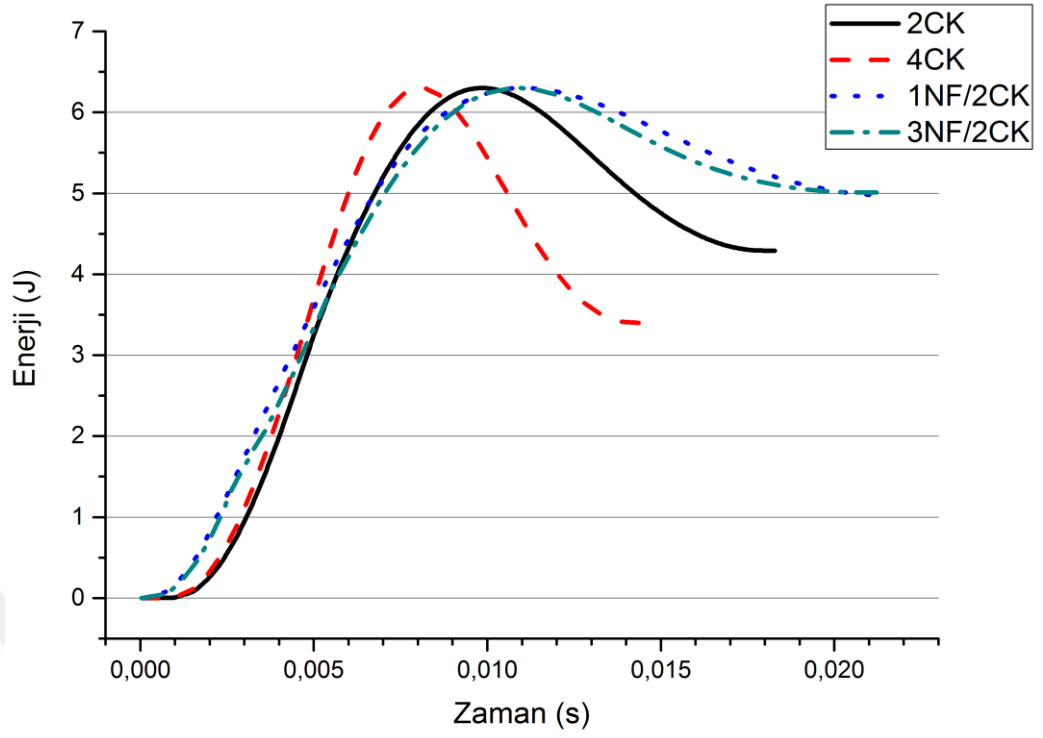
Şekil 4.9'te temsilcilerin enerji-zaman grafiği verilmiştir. Bu grafikte numuneler üzerinde absorbe edilen enerji miktarlarını görebilmek mümkündür. Toplam 6,3 J değerinde bir kinetik enerji ile çarpışma gerçekleşmiş ve enerjinin belli bir kısmı numuneler tarafından absorbe edilirken geriye kalan kinetik enerji ise darbe ucunun geri tepmesi için kullanılmıştır.

Grafik incelendiğinde tüm numunelerin darbe ucunun enerjisi numunelere geçtikten sonra geri tepmenin meydana geldiği görülmektedir. Geri tepme en rijit numune grubu olan 4CK numunede en yüksektir. 2CK numune de nanofiber takviyeli numunelerden daha fazla bir geri tepmeye izin vermiştir. Nanofiber takviyeli numunelerde ise artan süneklik ile daha zayıf bir geri tepme meydana gelmiştir.

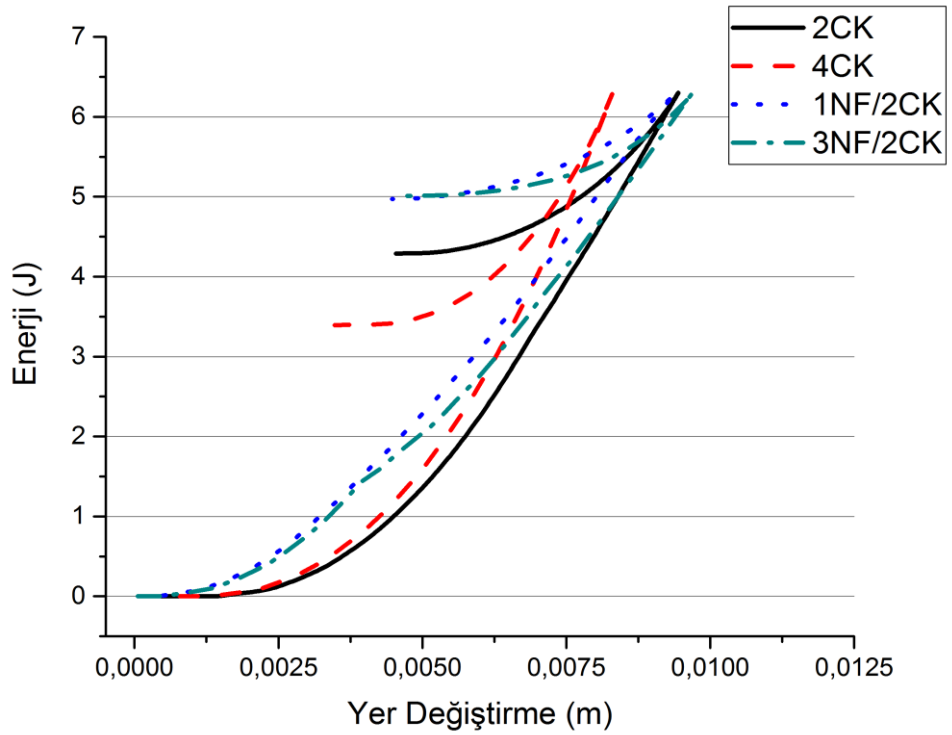
Geri tepme durumlarından yorumlanabileceği üzere nanofiber takviyeli numunelerin daha fazla enerjiyi absorbe ettikleri görülmektedir. 3NF/2CK ve 1NF/2CK numuneler benzer miktarlarda enerji absorbe etmişlerdir. En az enerji absorpsiyonu 4CK ise numunede gerçekleşmiştir. 2CK numunede ise nanofiber takviyeli numuneler kadar olmasa da 4CK'li numunelere kıyasla daha yüksek bir enerji absorpsiyonunun olduğu görülmektedir.

Şekil 4.10'da ise hız-zaman grafiği verilmiştir. Bu grafikte numunelere enerjinin geçişi ile yer değişmelerin oluşmaya başladığı görülmektedir. Yer değiştirmeler, darbe ucunun sahip olduğu 6,3 J değerindeki tüm enerjinin numunelere geçişinin tamamlandığı sırada maksimuma ulaştığı görülmektedir. Artan süneklik sebebiyle, enerjinin geçişi ile yer değiştirmelerin nanofiber takviyeli numunelerde daha erken başladığı görülmektedir. Saf numuneler ise daha rijit olmalarından dolayı yer değiştirmeye daha geç başladıkları gözlemlenmiştir.





Şekil 4.9. Enerji-zaman grafiği

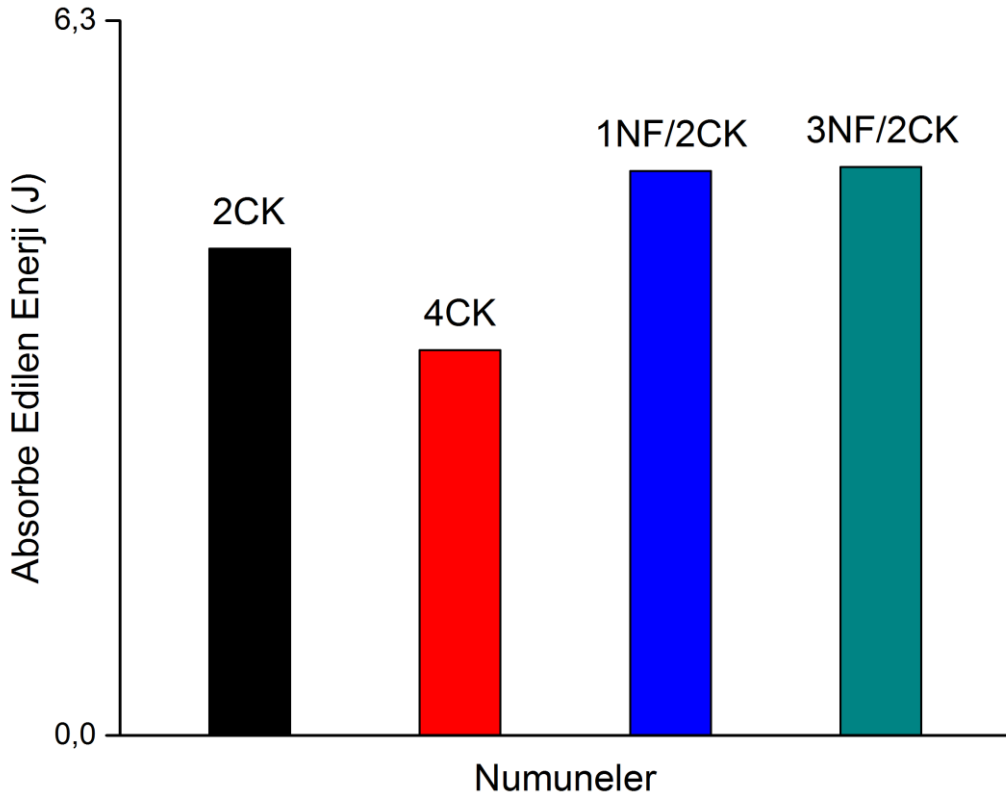


Şekil 4.10. Enerji-yer değiştirme grafiği

Çizelge 4.1’te numunelerin absorbe ettikleri ve geri teptikleri enerji değerleri verilmiştir. Şekil 4.11’de ise numuneler tarafından absorbe edilen enerji oranları grafik oluşturularak kıyaslamaları yapılmıştır.

Çizelge 4.1. Numunelerdeki enerji absorpsiyon ve geri tepme değerleri

Numuneler		2CK	4CK	1NF/2CK	3NF/2CK
Toplam absorbe edilen enerji	[J]	4,29	3,39	4,97	5,01
	[%]	68,10	53,87	78,92	79,51
Toplam geri tepen enerji	[J]	2,01	2,91	1,33	1,29
	[%]	31,89	46,12	21,06	20,48
Toplam enerji	[J]	6,3	6,3	6,3	6,3
	[%]	100,0	100,0	100,0	100,0

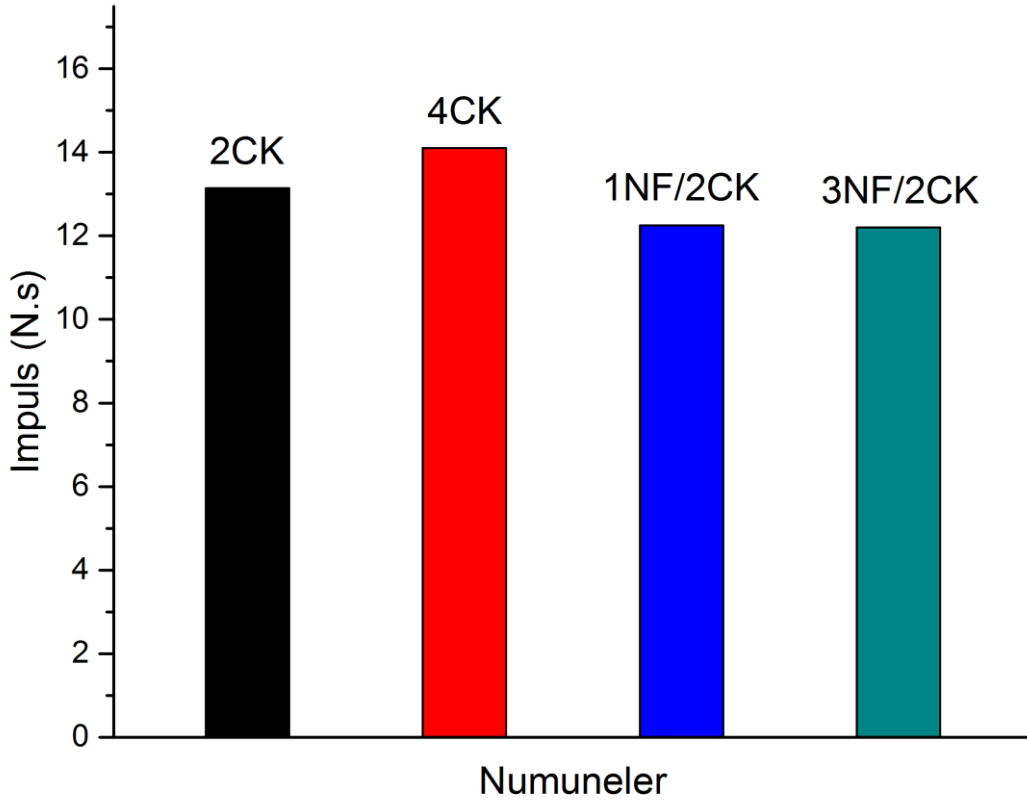


Şekil 4.11. Numunelerin enerji absorpsiyonlarının kıyaslanması

İmpuls, temel olarak bir cismin çizgisel momentumundaki değişim olarak açıklanabilir ve kuvvet-zaman grafiğinde çizginin altında kalan alanın hesaplanması ile elde edilebilir.

Şekil 4.12’de numunelerin impuls değerleri verilmiştir. Saf numunelerin daha yüksek impuls değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum rijitliği yüksek malzemelerin daha yüksek impuls değerleri ortaya koyduğunu göstermektedir. 4CK numunelerin impuls değerleri en yüksek olarak bulunmuştur.

Nanofiber takviyeli numunelerin ise hemen hemen aynı impuls değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Nanofiber takviyeli numunelerin artan enerji absorpsiyon kapasitelerinin daha düşük impuls değerlerine yol açtığı düşünülmektedir.



Şekil 4.12. Numunelerin impuls değerleri

Şekil 4.13, şekil 4.14, şekil 4.15 ve şekil 4.16’da düşük hızlı darbe testleri sonrası numunelerin resimleri verilmiştir.



a) 2CK numune ön yüz



b) 2CK numune arka yüz

Şekil 4.13. 2CK numunenin testlerden sonra yüzeylerinde oluşan hasarlar

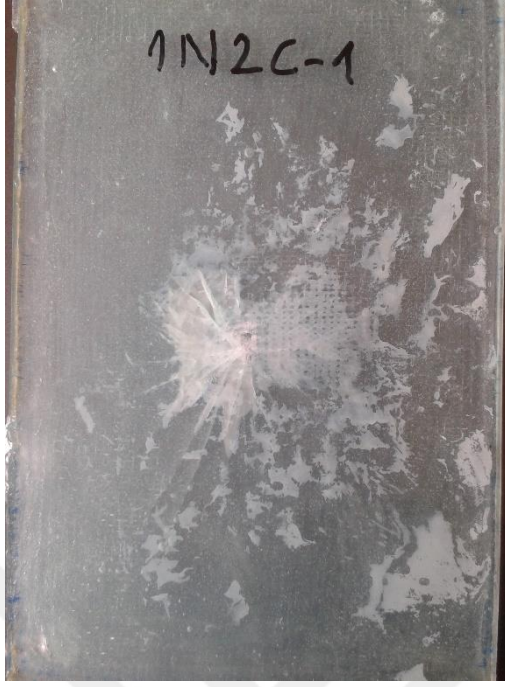


a) 4CK numune ön yüz



b) 4CK numune arka yüz

Şekil 4.14. 4CK numunenin testlerden sonra yüzeylerinde oluşan hasarlar



a) 1NF/2CK numune ön yüz

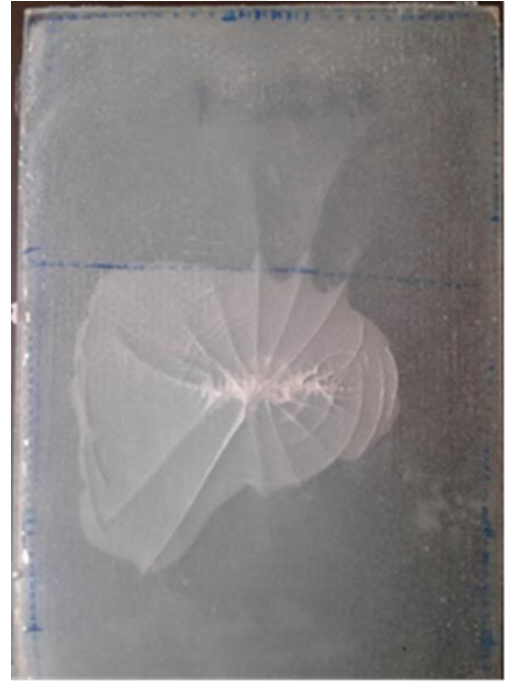


b) 1NF/2CK numune arka yüz

Şekil 4.15. 1NF/2CK numunenin testlerden sonra yüzeylerinde oluşan hasarlar



a) 3NF/2CK numune ön yüz



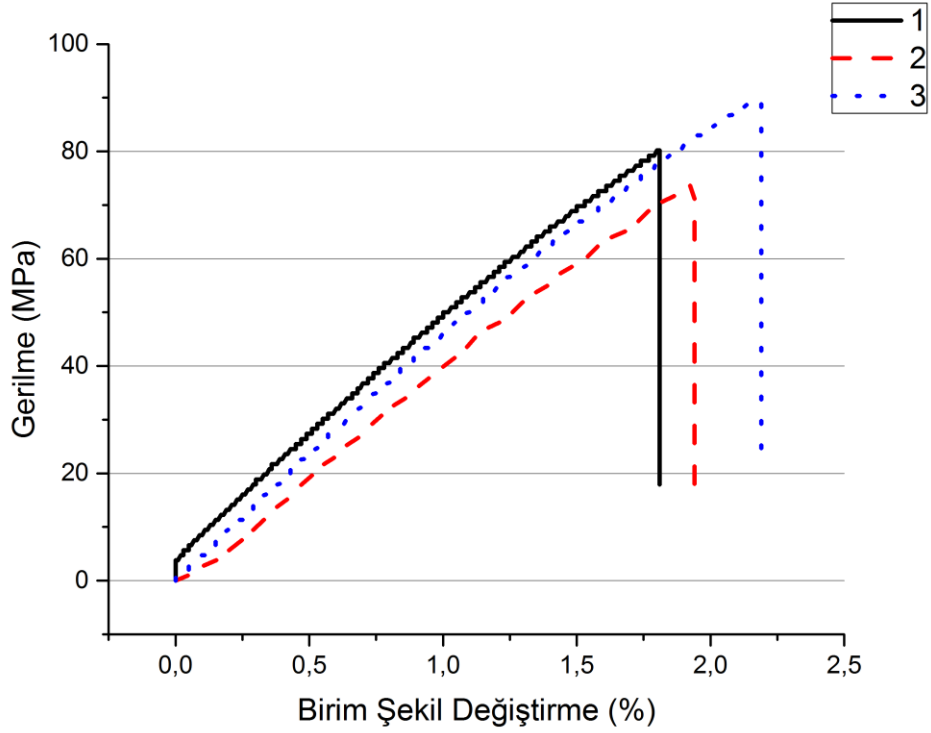
b) 3NF/2CK numune arka yüz

Şekil 4.16. 3NF/2CK numunenin testlerden sonra yüzeylerinde oluşan hasarlar

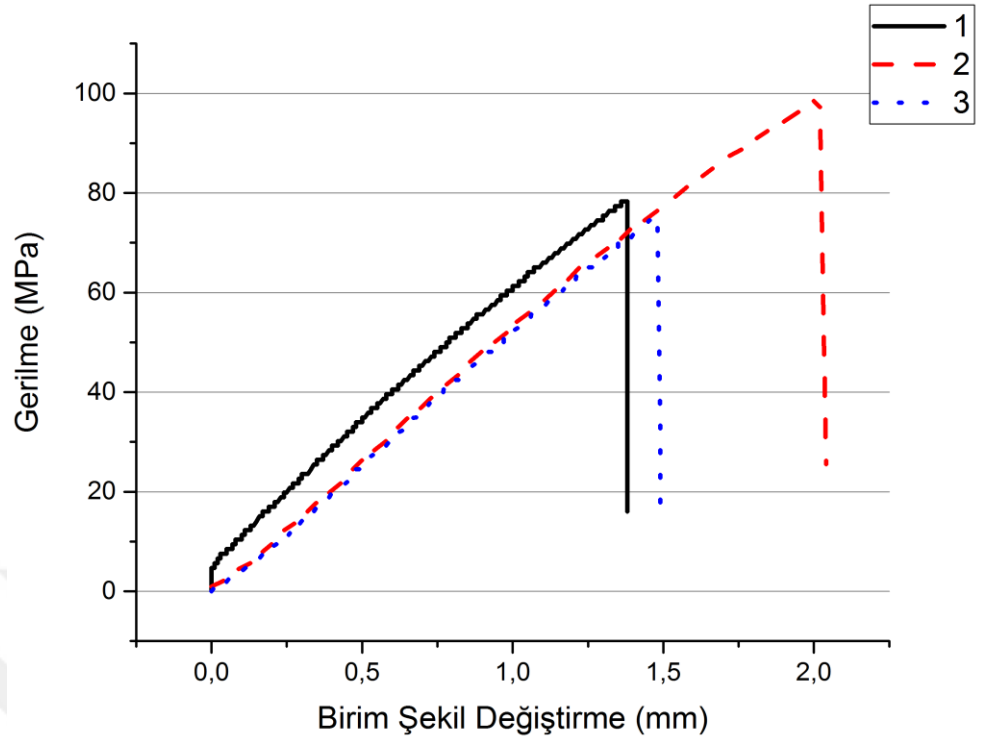
## 4.2. Çekme Testleri Sonuçları

Numune gruplarının çekme testleri yapıp her grup kendi arasında değerlendirilmiştir. Daha sonra her gruptan bir temsilci seçilip grupların kıyaslanması yapılmıştır. Kıyaslamalar için numunelerin gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri hazırlanmıştır.

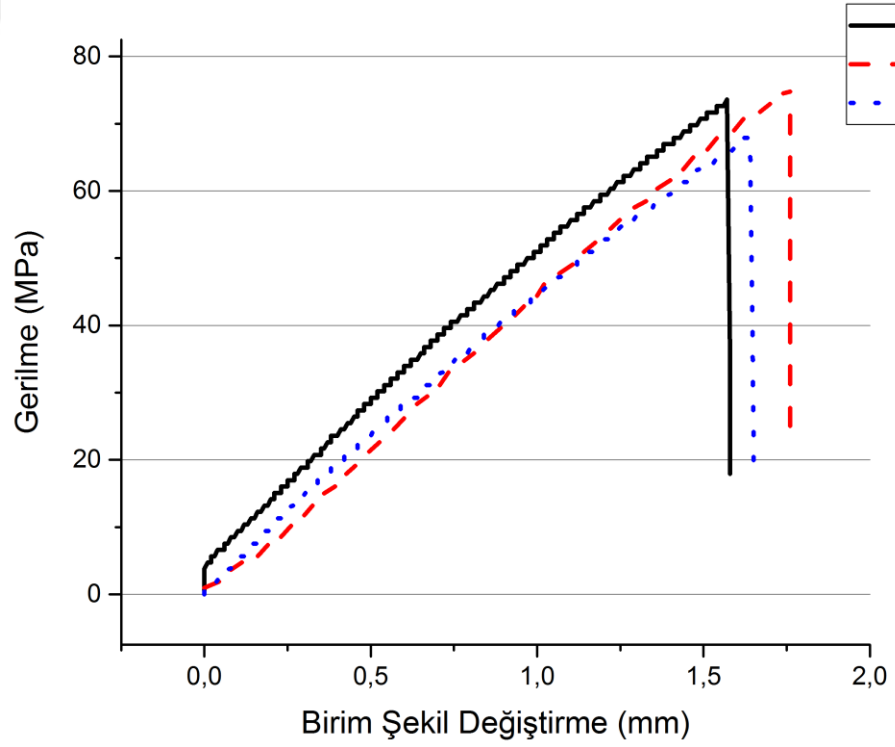
Şekil 4.17’de 2CK tabakalı numuneler, şekil 4.18’de 4CK tabakalı numuneler, şekil 4.19’da 1NF/2CK tabakalı numuneler ve şekil 4.20’de de 3NF/2CK tabakalı numuneler kıyaslanmıştır.



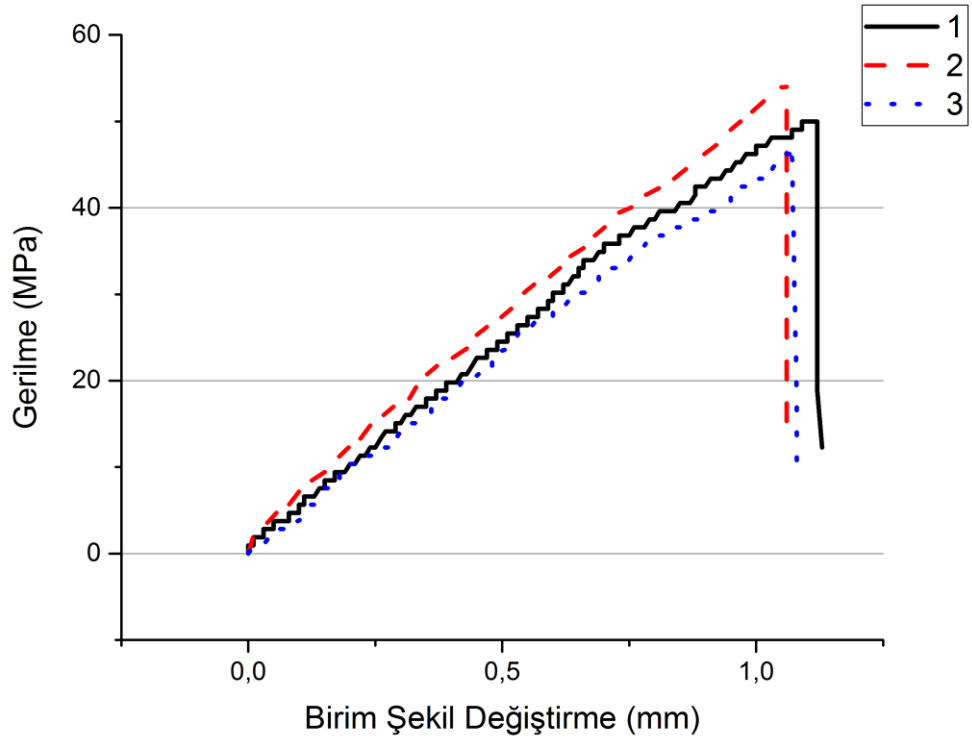
Şekil 4.17. 2CK tabakalı numuneler



Şekil 4.18. 4CK tabakalı numuneler



Şekil 4.19. 1NF/2CK tabakalı numuneler



Şekil 4.20. 3NF/2CK tabakalı numuneler

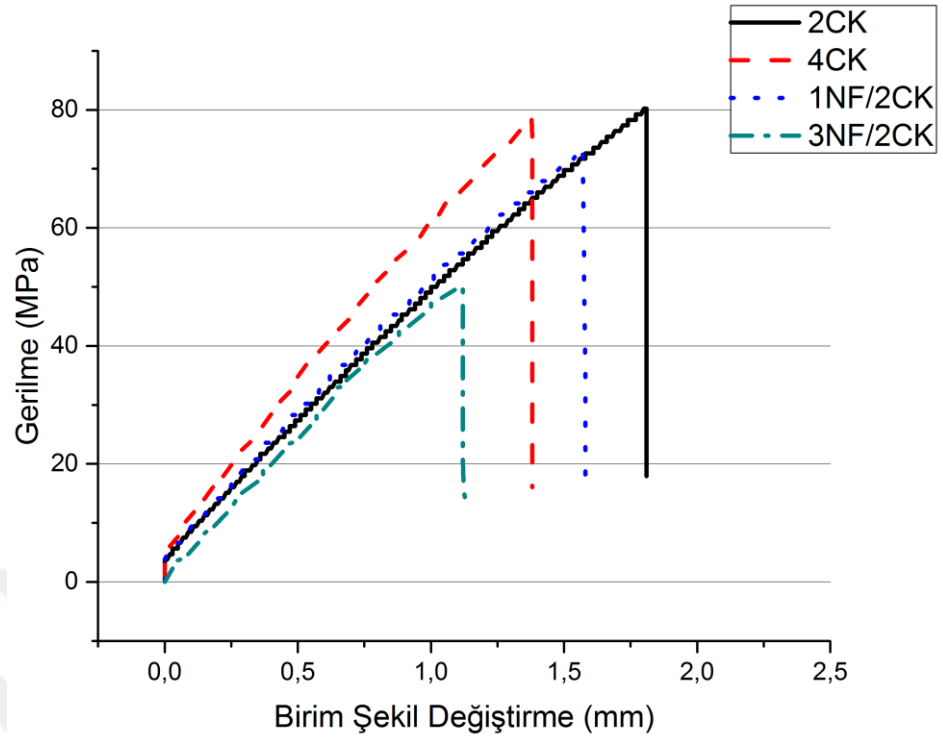
Şekil 4.21’de ise ise numune gruplarının temsilcilerinin kıyaslanması yapılmıştır. Numune gruplarının kıyaslamalarında verilen grafiklerden yararlanarak her numune grubu için gösterdikleri ideal performanslardan dolayı 1. numuneler temsilciler olarak seçilmiştir.

Grafik incelendiğinde 2CK ve 4CK numunelerin yüksek gerilme değerlerine ulaştıkları görülmektedir. Saf malzemelerin sahip olduğu yüksek rijitliğin etkisinin görüldüğü düşünülmektedir. 4CK numunelerde daha az yer değişime görülmesi de yine bu rijitliğin ekisi olarak yorumlanabilir.

2CK, 1NF/2CK ve 3NF/2CK numunelerin benzer grafiklere sahip oldukları görülmektedir. Bu da elastisite modülüne nanofiber tabakaların önemli bir etkisinin olmadığını göstermektedir.

3NF/2CK numuneler 1NF/2CK numunelere kıyasla daha düşük gerilme değerlerinde hasarlanmıştır. Nanofiber tabakaların eklenmesi ile çekme dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir.





Şekil 4.21. Gerilme-birim şekil değiştirme

Numune temsilcilerinin için çekme testleri sonucunda elde edilen bilgiler çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Numunelerinin çekme testi sonuçları

Numune	Kopma Uzaması [%]	Kopma Gerilmesi [MPa]	Elastisite Modülü [MPa]	Maksimum Yük [N]
2CK	1,81	80,18	42,50	4211,75
4CK	1,38	78,29	53,79	4071,15
1NF/2CK	1,58	73,58	44,02	3825,9
3NF/2CK	1,12	49,99	44,45	2599,65

Şekil 4.22'de test sonrası numune temsilcilerinin resimleri verilmiştir.



2CK numune



4CK numune



1NF/2CK numune



3NF/2CK numune

Şekil 4.22. Çekme testleri sonrası numuneler

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

### 5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada epoksi/cam kumaş kompozit malzemelere elektrospin yöntemi ile elde edilen naylon 6,6 nanofiber tabakaların farklı sayılarda eklenmesi ile meydana gelen etkiler araştırılmıştır.

Elektrospin yöntemi ile üretilen nanofiber tabakalar bir ve üç adet olmak üzere, iki cam kumaş tabakalı epoksi/cam kumaş kompozite takviye edilmiştir. Ayrıca kıyaslama yapılabilmesi için iki ve dört cam kumaş tabakalı saf kompozit malzemeler de üretilmiştir. Test yöntemi olarak düşük hızlı darbe testleri ve çekme testleri üzerinde karar kılınarak, bu kompozit numune gruplarına uygulanmıştır.

Elde edilen verilerden yola çıkarak düşük hızlı darbe testleri için aşağıdaki maddelerden bahsetmek mümkündür;

- Numunelerde delinme meydana gelmemiş ve dolayısıyla nüfuziyet hasarı oluşmamıştır.
- Cam kumaş tabaka sayısını arttırmak beklenildiği gibi numunelerin mukavemetinde artış sağlamıştır. 4CK numuneler 1960 N civarında bir yük kapasitesi performansı göstermişken 2CK numuneler 1200 N civarında kalmıştır.
- Saf numuneler daha katı ve nanofiber takviyeli numuneler daha sünek davranış göstermiştir.
- En yüksek impuls değerleri 4CK numunelerde görülmüştür ve dolayısı ile numuneler arasında en rijit olan grup bu gruptur. 2CK numuneler ise ikinci sırada bulunmaktadır. 3NF/2CK ve 1NF/2CK numuneler eşit denebilecek bir miktarda impuls değerlerine sahip olmuşlardır.
- Naylon 6,6 nanofiber tabakalar yük kapasitesinde azalmalara yol açmışlardır. Nanofiber takviyeli numunelerde delaminasyon ve fiber sıyrılmaları oluşmuştur.
- Bir tabakalı ve üç tabakalı nanofiber takviyeli kompozit numunelerin yük ve enerji absorpsiyon kapasiteleri birbirlerine oldukça yakın çıkmıştır.
- Nanofiber takviyeli tabakalar iki tabakalı saf numunelere kıyasla yaklaşık olarak %11, dört tabakalı numunelere kıyasla da yaklaşık olarak %25 daha fazla enerji absorbe edebilmiştir.

Çekme numuneleri için ise;

- Cam tabaka sayısının artması ile rijitliğin arttığı ve yer değişiminin azaldığı gözlemlenmiştir.
- Nanofiber tabakaların elastisite modülü üzerinde önemli etkilerinin olmadığı gözlemlenmiştir.
- Nanofiber tabakaların sayısının artması ile çekme dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir.

Çıkarımlardan numuneler için, cam tabakaların sayılarının arttırılması ile mukavemette, nanofiber tabakaların eklenmesi ile de sünekliğinin ve dolayısı ile enerji enerji absorpsiyon kapasitelerde artışlarının sağlandığı anlaşılmaktadır. Naylon 6,6 nanofiber tabakalar için 3 adet eklemenin 1 adet eklemeye kıyasla belirgin bir iyileşmeye neden olmadığı görülmektedir.

## 5.2. Öneriler

Nanofiber üretiminde kullanılan voltajın, konsantrasyonun, çözücü oranlarının ve iğne ile toplac arası mesafenin değiştirilmesi ile farklı çap değerlerinde nanofiberler elde edilmesi mümkündür. Farklı bir polimer malzemenin de kullanılmasıyla farklı özelliklere sahip nanofiber tabakalar elde edilebilir.

Yine cam veya başka bir fiber takviye elemanı kullanılarak oluşturulan kompozit tabakaların nanofiber tabakalar ile takviye edilerek oluşabilecek değişikliklerin incelenmesi ile nanofiber takviyeli kompozitlerin gelişimine katkı sağlanaması mümkün olabilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akangah, P., Lingaiah, S., ve Shivakumar, K., 2010. Effect of Nylon-66 nano-fiber interleaving on impact damage resistance of epoxy / carbon fiber composite laminates. **Composite Structures**, 92, p.1432–1439
- Anonim, 2017, Epoxy. <https://en.wikipedia.org/wiki/Epoxy>. Erişim tarihi: 10.03.2017.
- Anonim, 2017, Glass Fiber Types Used in Structural FRP Reinforcement. <http://www.build-on-prince.com/glass-fiber.html>. Erişim tarihi: 20.03.2017.
- Anonim, 2017. Laminating resin MGS® L 160. <http://tr.metyx.com/Uploads/GenelDosya/30120139318515.pdf>. Erişim tarihi: 12.04.2017.
- Baji A., Mai Y. W., Wong S. C., Abtahi M., ve Chen P., 2010. Electrospinning of polymer nanofibers: Effects on oriented morphology, structures and tensile properties. **Composites Science and Technology**, 70, p.703-718.
- Baumgarten, P. K., 1971. Electrostatic spinning of acrylic microfibers. **Journal of Colloid And Interface Science**, 36(1), p.71-79.
- Beachley, V., ve Wen, X., 2009. Effect of electrospinning parameters on the nanofiber diameter and length. **Materials Science and Engineering C**, 29(3), p.663-668.
- Belingardi, G., ve Vadori, R., 2002. Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. **Journal of Impact Engineering**, 27, p.213–229.
- Brugo T., Minak G., Zucchelli A., Yan X.T., Belcari J., Saghafi H., ve Palazzetti R., 2017. Study on Mode I fatigue behaviour of Nylon 6,6 nanoreinforced CFRP laminates. **Composite Structures**, 164, p.51–57
- Deitzel, J., Tan, N.C.B., Kleinmeyer, J.D., ve Mchugh, A., 1999. Generation of Polymer Nanofibers Through Electrospinning. **Materials Research**.
- Demir, M. M., Yilgor, I., Yilgor, E., ve Erman, B., 2002. Electrospinning of polyurethane fibers. **Polymer**, 43(11), p.3303–3309.
- Doshi, J., ve Reneker, D.H., 1993. Electrospinning process and applications of electrospun fibers. **Industry Applications Society Annual Meeting, Conference Record of the 1993 IEEE**, 3, p.1698–1703.
- Fidan, S., Sınmazçelik, T., Bora, M.Ö., ve Çoban, O. 2010. Düşük hızlı darbe yüklemeleri sonrası cam fiber takviyeli polyester kompozitlerde ortaya çıkan hasar konisinin incelenmesi. **15. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul.
- Garg, K. ve Bowlin G. L., 2011. Electrospinning jets and nanofibrous structures. **Biomicrofluidics**, 5.

- Greiner A. ve Wendorff J.H., 2007. Electrospinning: A Fascinating Method for the Preparation of Ultrathin Fibers. **Angewandte Chemie International Edition**, 46(30), p.5670-5703.
- Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G., ve Brenner, M. P., 2001. Electrospinning and electrically forced jets. I. Stability theory. **Physics of fluids**, 13(8), p.2201-2220.
- Hohman, M. M., Shin, M., Rutledge, G., ve Brenner, M. P., 2001. Electrospinning and electrically forced jets. II. Applications. **Physics of Fluids**, 13(8), p.2221-2236.
- Huang, Z. M., Zhang, Y. Z., Kotaki, M., ve Ramakrishna, S., 2003. A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites. **Composites Science and Technology**, 63(15), p.2223-2253.
- İçoğlu, H.İ., 2014. Elektrospin yönteminde çevresel parametrelerin nanolif özellikleri üzerindeki etkilerinin incelenmesi, **Çukurova Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi**, Adana
- Karakaş, H., 2015. Electrospinning of nanofibers and their applications. Electrospinning of nanofibers and there applications. **Textile Technologies and Design Faculty, Istanbul Technical University**, İstanbul
- Li, Z., ve Wang, C., 2013. Effects of Working Parameters on Electrospinning. **One-Dimensional Nanostructures**, p.15-28.
- Megelski, S., Stephens, J. S., Chase, D. B., ve Rabolt, J. F., 2002. Micro- and nanostructured surface morphology on electrospun polymer fibers. **Macromolecules**, 35(22), p.8456-8466.
- Palazzetti, R., Zucchelli, A., Gualandi, C., Focarete, M.L., Donati, L., Minak, G., ve Ramakrishna S., 2012. Influence of electrospun Nylon 6,6 nanofibrous mats on the interlaminar properties of Gr-epoxy composite laminates. **Composite Structures**, 94, p.571-579.
- Palazzetti, R., Zucchelli, A. ve Trendafilova, I., 2013. The self-reinforcing effect of Nylon 6,6 nano-fibres on CFRP laminates subjected to low velocity impact. **Composite Structures**, 106, p.661-671
- Papa, I., Ricciardi, M. R., Antonucci, V., Lopresto, V. ve Langella, A., 2016. Impact performance of GFRP laminates with modified epoxy resin. **Procedia Engineering**, 167, p.160-167.
- Potoğlu, U. 2012. Sandviç kompozit plakların darbe darvanışları. D.E.Ü. **Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi**, İzmir.
- Rangkupan, R., ve Reneker, D.H., 2003. Electrospinning Process of Molten Polypropylene in Vacuum. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, 12(2), p.81-87.
- Saghafi, H., Brugo, T., Minak, G., ve Zucchelli, A., 2015. Improvement the impact damage resistance of composite materials by interleaving Polycaprolactone nanofibers. **Engineering Solid Mechanics**, 3, p.21-26.

- Saghafi, H., Palazzetti, R., Zucchelli, A. ve Minak, G., 2015. Influence of electrospun nanofibers on the interlaminar properties of unidirectional epoxy resin/glass fiber composite laminates. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, Sage, 34, p.907-914.
- Saghafi, H., Palazzetti, R., Zucchelli, A. ve Minak, G., 2015. Influence of electrospun nanofibers on the interlaminar properties of unidirectional epoxy resin / glass fiber composite laminates. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, 34(11), p.907-194.
- Saghafi, H., Zucchelli, A., Palazzetti, R., ve Minak G., 2014. The effect of interleaved composite nanofibrous mats on delamination behavior of polymeric composite materials. **Composite Structures**, 109, p.41-47.
- Shin, Y. M., Hohman, M. M., Brenner, M. P., ve Rutledge, G. C., 2001. Experimental characterization of electrospinning: the electrically forced jet and instabilities. **Polymer**, 42(25), p.09955–09967.
- Sihn, S., Kim, R.Y., Huh, W., Lee, K.H. ve Roy, A.K., 2008. Improvement of damage resistance in laminated composites with electrospun nano-interlayers. **Composite Science and Technology**, 68, p.673–683.
- Subbiah, T., Bhat, G.S., Tock, R.W., Parameswaran, S. ve Ramkumar, S.S., 2005. Electrospinning of nanofibers. **Journal of Applied Polymer Science**, 96, p.557–569.
- Süslü, A., 2009. Elektro-eğirme yöntemi ile nanofiber ve nanotüp üretimi. **D.E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi**, İzmir.
- Uyaner, M., Kara M., ve Ataberk, N., 2007. E-camı/epoksi tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışına numune boyutlarının etkisi, **8. Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı**, p.361-368, İstanbul.
- Wells, J. K., and Beaumont, P.W.R., 1984. Debonding and pull-out processes in fibrous composites. **Journal of Materials Science**, 20(4), p. 1275–1284.
- Yang, Q., Li, Z., Hong, Y., Zhao, Y., Qiu, S., Wang, C., ve Wei, Y., 2004. Influence of solvents on the formation of ultrathin uniform poly(vinyl pyrrolidone) nanofibers with electrospinning. **Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics**, 45(20), p.3721-3726.
- Yang, Q., Li, Z., Hong, Y., Zhao, Y., Qiu, S., Wang, C., ve Wei, Y., 2004. Influence of solvents on the formation of ultrathin uniform poly(vinyl pyrrolidone) nanofibers with electrospinning. **Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics**, 45(20), p.3721-3726.
- Yıldırım, H., 2009. Değişik kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesi. **Fırat. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi**, Elazığ
- Zarei H., Brugo T., Belcari J., Bisadi H., Minak G., ve Zucchelli A., 2017. Low velocity impact damage assessment of GLARE fiber-metal laminates interleaved by Nylon 6,6 nanofiber mats. **Composite Structures**, 167, p.123–131.

Zong, X., Kim, K., Fang, D., Ran, S., Hsiao, B.S., ve Chu, B., 2002. Structure and process relationship of electrospun bioadsorbable nanofiber membrane. **Polymer**, 43, p.4403-4412.

Zuccelli, A., Focarete, L.M., Gualandi, Chiara, ve Ramakrishna S., 2011. Electrospun nanofibers for enhancing structural performance of composite materials. **Polymers for Advanced Technologies**, p.339-349.





## ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Malatya’da tamamladıktan sonra 2014 yılında yine Malatya’da bulunan İnönü üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2015 yılından beri İskenderun Teknik Üniversitesi’nde yüksek lisans eğitimi alıp, Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.

