



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



NANO KATKILI ARAMİD ELYAF
TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN
ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK
DAVRANIŞLARINA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

Mücteba ÇAKICI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mücteba ÇAKICI tarafından hazırlanan “Nano Katkılı Aramid Elyaf Tabakalı Kompozit Malzemelerin Üretim Parametrelerinin Mekanik Davranışlarına Etkisinin Araştırılması” adlı tez çalışması 24/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

Danışman

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Üye

Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

İmza

.....

.....

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../2025 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Havvanur UÇBEYİAY
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Mücteba ÇAKICI

ŞUBAT 2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NANO KATKILI ARAMİD ELYAF TABAKALI KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM PARAMETRELERİNİN MEKANİK DAVRANIŞLARINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Öğrencinin Adı SOYADI

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2025, 84 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE
Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

Bu çalışma, vakum torbalama tekniğiyle üretilen aramid/vinilester tabakalı kompozit plakaların mekanik özelliklerini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Araştırmada, kompozit tabakalı plakaların düşük hızlı darbe ve çekme davranışları, farklı oranlarda karbon nanotüp (%3 ve %5) ve zirkonya (%3 ve %5) katkıları ile katkısız malzeme örnekleri üzerinde incelenmiştir.

Darbe testleri, 15 J ve 25 J enerji seviyelerinde uygulanmış ve katkı oranlarının malzeme performansına etkisi kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman ve enerji-zaman grafikleriyle değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgular, karbon nanotüp katkısının darbe dayanımını artırırken, zirkonya katkısının süneklik özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca, çekme deneylerinde, katkısız ve farklı katkı oranlarına sahip numuneler ASTM D3039 standardına uygun şekilde test edilmiş, katkıların malzemenin çekme mukavemetine olan etkileri belirlenmiştir.

Çalışmanın sonuçları, karbon nanotüp ve zirkonya katkılarının mekanik dayanımı artırmada önemli rol oynadığını, ancak bu katkıların optimum oranlarının belirlenmesinin kritik olduğunu ortaya koymaktadır. Araştırma, kompozit malzemelerin endüstriyel uygulamalarda daha verimli kullanılmasına yönelik önemli bilgiler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Aramid, Düşük hızda darbe testi, Karbon nanotüp, Tabakalı kompozitler, Vakum torbalama, Vinil ester reçine, Zirkonya

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF PRODUCTION PARAMETERS OF THE MECHANICAL BEHAVIOR OF NANO-REINFORCED ARAMID FIBER LAYERED COMPOSITE MATERIALS

Mücteba ÇAKICI

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

2025, 84 Pages

Jury

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE
Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

This study was carried out to evaluate the mechanical properties of aramid/vinyl ester layered composite plates produced by vacuum bagging technique. In the study, low velocity impact and tensile behaviors of composite laminated plates were investigated on samples with different proportions of carbon nanotubes (3% and 5%) and zirconia (3% and 5%) additives and on samples without additives.

Impact tests were performed at 15 J and 25 J energy levels and the effect of doping ratios on material performance was evaluated by force-displacement, force-time and energy-time graphs. The results showed that carbon nanotube doping increased the impact strength while zirconia doping improved the ductility properties. In addition, in tensile tests, samples without additives and with different additive ratios were tested in accordance with ASTM D3039 standard and the effects of additives on the tensile strength of the material were determined.

The results of the study reveal that carbon nanotube and zirconia additives play an important role in increasing the mechanical strength, but it is critical to determine the optimum proportions of these additives. The research provides important information for more efficient use of composite materials in industrial applications.

Keywords: Aramid, Carbon nanotube, Layered composites, Low velocity impact test, Vacuum bagging, Vinylester resin, Zirconia

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim boyunca katkılarını esirgemeyen danışman hocam, Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a teşekkürlerimi iletirim.

Tez dönemim boyunca üretimde, deneylerin yapılışında, tezin ilerleyişı ve yorumlaması hakkında desteğini her zaman sunan Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYRICI, Dr. Öğr. Üyesi İbrahim DEMİRCİ, Arş. Gör. Taner ÇOŞKUN'a ayrıca üretim aşamasında desteğini esirgemeyen meslektaşım Ahmet Faruk DOĞAN'a çok teşekkür ederim.

Üretim sürecince laboratuvar altyapılarından faylandığım Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Makine Mühendislik Fakültesine ve deneyler boyunca Konya Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Fakültesine şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım sürecince, her zaman yanımda olan ve bugünlere gelmemde maddi ve manevi emeği olan aileme teşekkür ederim.

Mücteba ÇAKICI
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
TABLolar DİZİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
3. KOMPOZİT MALZEMELER.....	6
3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı	6
3.2. Matris Malzemeleri.....	7
3.2.1. Termoset matrisler	8
3.2.2. Termoplastik matrisler	9
3.3. Takviye Malzemeleri	10
3.3.1. Aramid elyaf	10
3.3.2. Cam elyaf.....	11
3.3.3. Karbon elyaf	12
3.4. Tabakalı Kompozitler	12
3.5. Kompozit Malzeme Üretimi	13
3.5.1. Fiber takviyeli kompozit laminat imal yöntemleri	13
3.6. Düşük Hızlı Darbenin Mekanikliği.....	18
3.7. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı	19
3.8. Darbe Testi.....	20
3.8.1. Ağırlık düşürme testi	21
3.8.2. Yüksek hızlı darbe testi.....	22
3.9. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları	22
3.9.1. Matris hasarı	23
3.9.2. Delaminasyon	25
3.9.3. Darbe ile elyaf hasarı	28
3.9.4. Elyaf-matris ara yüzey ayrılması	30
3.9.5. Nüfuziyet	30
4. MATERYAL VE YÖNTEM	31
4.1. Materyal.....	31

4.1.1. Aramid elyaf	31
4.1.2. Vinil ester reçine	32
4.1.3. Karbon nanotüp	32
4.1.4. Zirkonya	33
4.2. Yöntem	33
4.3. Düşük Hızlı Darbe Testi	37
4.4 Çekme Deneyi	40
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	42
5.1. Düşük Hızlı Darbe Deney Grafikleri	42
5.1.1. 15J Enerji seviyesindeki darbe testi grafikleri	42
5.1.2. 25J Enerji seviyesindeki darbe testi grafikleri	46
5.2. Çekme Deneyi	50
5.3. Darbe Hasar Görüntüleri.....	51
5.3.1. 15J Enerji seviyesindeki katkısız malzeme hasar görüntüsü	51
5.3.2. 15J Enerji seviyesindeki %3 Karbon nanotüp katkılı malzeme hasar görüntüsü	51
5.3.3. 15J Enerji seviyesindeki %5 Karbon nanotüp katkılı malzeme hasar görüntüsü	52
5.3.4. 15J Enerji seviyesindeki %3 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme hasar görüntüsü	53
5.3.5. 15J Enerji seviyesindeki %5 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme hasar görüntüsü	54
5.3.6. 25J Enerji seviyesindeki katkısız malzeme hasar görüntüsü	55
5.3.7. 25J Enerji seviyesindeki %3 Karbon nanotüp katkılı malzeme hasar görüntüsü	56
5.3.8. 25J Enerji seviyesindeki %5 Karbon nanotüp katkılı malzeme hasar görüntüsü	57
5.3.9. 25J Enerji seviyesindeki %3 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme hasar görüntüsü	58
5.3.10. 25J Enerji seviyesindeki %5 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme hasar görüntüsü	59
5.4 Çekme Hasar Görüntüleri	61
5.4.1. Katkısız malzeme çekme hasar görüntüleri	61
5.4.2. %3 Karbon nanotüp katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü.....	62
5.4.3. %5 Karbon nanotüp katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü.....	63
5.4.4. %3 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü.....	64
5.4.5. %5 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü.....	65
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
6.1 Sonuçlar	66
6.1.1. 15J Darbe Testi Bulguları	66
6.1.3. Çekme Testi Bulguları	67
6.1.3. Katkı Türü ve Oranının Etkisi	67
6.2 Öneriler	67
7. KAYNAKLAR	69
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Kısaltmalar

J: Joule

KNT: Karbon Nanotüp

ASTM: Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu

PAN: Polyacrylonitrileden

ZrO₂: Zirkonya



TABLolar DİZİ

Tablo 1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	7
Tablo 2. Kompozit malzemelerin matris fazına göre sınıflandırılması	8
Tablo 3. Polimer malzemelerin karşılaştırılması (Töre, 2010).....	10
Tablo 4. Cam elyaf özellikleri	11
Tablo 5. Aramid elyaf kumaş özellikleri	31
Tablo 6. Vinilestere ait teknik özellikleri	32
Tablo 7. Çok duvarlı karbon nanotüp'ün mekanik ve elektiriksel özellikleri	33
Tablo 8. Çalışmada kullanılan zirkonya'nın özellikleri.....	33
Tablo 9. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Zaman Grafiği (15J).....	42
Tablo 10. Katkısız, %3 ZrO ₂ , %5 ZrO ₂ Kuvvet-Zaman Grafiği (15J).....	43
Tablo 11. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Enerji-Zaman Grafiği (15J).....	43
Tablo 12. Katkısız, %3 ZrO ₂ , %5 ZrO ₂ Enerji-Zaman Grafiği (15J).....	44
Tablo 13. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Deplasman Grafiği (15J).....	45
Tablo 14. Katkısız, %3 ZrO ₂ , %5 ZrO ₂ Kuvvet-Deplasman Grafiği (15J).....	45
Tablo 15. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Zaman Grafiği (25J).....	46
Tablo 16. Katkısız, %3 ZrO ₂ , %5 ZrO ₂ Kuvvet-Zaman Grafiği (25J).....	47
Tablo 17. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Enerji-Zaman Grafiği (25J).....	47
Tablo 18. Katkısız, %3 ZrO ₂ , %5 ZrO ₂ Enerji-Zaman Grafiği (25J).....	48
Tablo 19. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Deplasman Grafiği (25J).....	49
Tablo 20. Katkısız, %3 ZrO ₂ , %5 ZrO ₂ Kuvvet-Deplasman Grafiği (25J).....	49
Tablo 21. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Çekme Deney Grafiği	50
Tablo 22. Katkısız, %3 ZrO ₂ , %5 ZrO ₂ Çekme Deney Grafiği	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Vakum torbalama yöntemi (Gurit Holding AG,2000)	14
Şekil 2. B.Pultrüzyon yöntemi (Gurit Holding AG,2000).....	15
Şekil 3. Tipik bir ağırlık düşürme test düzeneği.....	21
Şekil 4. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006).....	23
Şekil 5. Matris çatlaklarına ait iki tip çatlak oluşumu, (a) Çeki çatlağı, (b) Kayma çatlağı (Abrate 1998).....	24
Şekil 6.a Hasarın üst tabakadan alt tabakaya doğru çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi,.....	24
Şekil 7. Hasarın alt tabakadan üst tabakaya tersine dönmüş çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi (Abrate 1998).....	25
Şekil 8. Delaminasyon alanlarının elyaf yönlendirme açılarına göre şekilleri (Abrate 1998).....	26
Şekil 9. Sıralı delaminasyon şeritlerinin şematik gösterimi (Malvern ve diğ. 1987)	27
Şekil 10. Darbe uygulamanın yüzeye göre hasar yayılımı, (a) Cam yüzeyden, (b) Aramid yüzeyden (Park ve Jang, 2001).....	29
Şekil 11. Sıcak pres vakum torbalama (açık hali)	34
Şekil 12. Sıcak pres vakum torbalama (kapalı hali)	35
Şekil 13. Ultrasonik karıştırıcı (soğuk su ile)	36
Şekil 14. El yatırma yöntemi	36
Şekil 15. Deney test düzeneği (Genel görünüş).....	37
Şekil 16. Labview Signal Express yazılımı	38
Şekil 17. Sensör algılayıcısı.....	38
Şekil 18. Darbe deneyi.....	39
Şekil 19. Darbe deneyi numune görüntüsü.....	40
Şekil 20. Çekme deney testi.....	41
Şekil 21. Çekme deney testi numune görüntüsü.....	41
Şekil 22. 15J-Katkısız Darbe Hasar Görüntüsü	51
Şekil 23. 15j-%3 KNT Darbe Hasar Görüntüsü	52
Şekil 24. 15J-%5 KNT Darbe Hasar Görüntüsü.....	53
Şekil 25. 15J-%3 ZrO2 Darbe Hasar Görüntüsü	54
Şekil 26. 15J-%5 ZrO2 Darbe Hasar Görüntüsü	55
Şekil 27. 25J-Katkısız Darbe Hasar Görüntüsü.....	56
Şekil 28. 25J-%3 Karbon Darbe Hasar Görüntüsü	57
Şekil 29. 25J-%5 Karbon Darbe Hasar Görüntüsü	58
Şekil 30. 25J-%3 Zirkonya Darbe Hasar Görüntüsü	59
Şekil 31. 25J-%5 Zirkonya Darbe Hasar Görüntüsü	60
Şekil 32. Katkısız Çekme Hasar Görüntüleri.....	61
Şekil 33. %3 KNT Çekme Hasar Görüntüleri	62
Şekil 34. %5 Karbon Çekme Hasar Görüntüleri.....	63
Şekil 35. %3 ZrO2 Çekme Hasar Görüntüleri.....	64
Şekil 36. %5 ZrO2 Çekme Hasar Görüntüleri.....	65

1. GİRİŞ

Günümüzde, teknolojinin artarak gelişimiyle birlikte insanların ihtiyaçları farklı yönere evrilmekte ve teknolojik gelişmelerde bu yönde ilerlemektedir. Bu ihtiyaçları gerçekleştirebilmek için geleneksel malzemelerden farklı olarak yeni malzemeler gerekmektedir. Malzeme bilimindeki gelişmeler, teknoloji alanındaki gelişimleri karşılamada yetersiz kalmaktadır. Buda hâlihazırdaki ana malzemeler ve bu malzemelerin teknik özellikleri yetersiz olması ve daha teknolojik, yenilikçi malzeme üretme ihtiyacı duyulmuştur. Yeni malzeme üretimi ana malzemelere nazaran ekonomik, mukavemetli ve ağırlık olarak hafiflik olması üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, farklı özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin, yeni teknikler uygulanarak fiziksel olarak bir araya getirilmesiyle elde edilen kompozit malzemeler, teknolojiye büyük bir ilgi yaratmıştır. (Arıkan, 2022)

Kompozit malzemeler, kendi bünyesinde bulunan malzemelerin üstün özelliklerini kullanmak şartı ile ana faz olarak bilinen matris ve takviye edici yardımcı fazlardan oluşurlar. Ağırlık yönüyle düşük ama yüksek mukavemet, yüksek sıcaklık dayanımı istenen makine elemanlarında metal bazlı malzemelerin yerini almaktadır.

Nano katkılı polimer yapıli kompozitler; karbon nanotüp, zirkonya, silisyum karbür gibi, nanolar polimer yapı olarak da epoksi, vinilester veya polyester reçine ile birleşmesiyle şekillendirilir. Polimer kompozitler belli katkıları ile hızlı sertleşme, yüksek mukavemet özellikleri ve farklı üretim prosesleri baz alındığında çeşitli yerlerde kullanılmasının yolu açılmıştır. Havacılık ve uzay sanayinin üretimlerinde ağırlığın azaltılması nedeniyle faydalı yükün daha fazla kullanıldığı malzemeler olarak karşımıza çıkar. (Abrate,1991), (Yalçın, 2013)

Kompozit malzemeler literatürde araştırmalar sonucunda farklı hasarlar, gerilimler karşımıza çıkmaktadır. Hasarların ve kusurların gerek üretim aşamasında gerekse taşınma esnasında oluştuğu gözlemlenmiştir (Kang,2010), (Cho,2006), (Lee,2005). Fiber takviye ile imal edilmiş tabakalı kompozitler genel itibari ile, delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) tabakalar arası gerilmelerin oluşması sebebi olmasından tabakaları farklı derecelerde dizerek oluşturmuştur (Abrate,1991). Hasar gerilimleri şiddetine göre malzemedeki yapısal bütünlüğü etkileyecek duruma gelebilir ve sonuçlardan biri olan sızıntıya ve mekanik dayanımda azalmaya uğrayabilir ve bu da dinamik tepkiyi etkiyi değiştirebilir (Zou,2002), (Anderson,1992), (Corbett,1994), (Reid,1996). Ayrıca çevresel koşullar göz önüne alındığında kompozit malzemeleri

oluşturan matris, fiber ve matris-fiber yapışma bölgesinde hasar oluşumu beklenir. Bu tabakalı kompozitler, matriste çatlak, delaminasyon (tabaklar arası ayrılma), fiber bozunumları, fiber-matris yapışmasının bozulması ve fiber çekilmesi gibi hasar oluşumları yanal darbe etkisine maruz kalabilir. Bu tür hasarlar, tabakalı kompozitlerin yapısal bütünlüğünde kayda değer bir düşüşe yol açabilir. (Deniz vd,2012)

Mühendislikte, özellikle mekanik uygulamalarda, malzemeye etki eden bir darbe sonucunda ortaya çıkabilecek beklenmedik durumlar istenmez; bu nedenle, malzemenin öngörülen tepkileri göstermesi beklenir. Kompozit malzemeler kullanıldığı yere göre, farklı şekildeki darbeler sonucunda değişik şekilde hasara uğrayabileceği karşımıza çıkar. Tabakalı kompozitlerde ürün dayanımını tespit etmek amacıyla darbeler; düşük hızlı, orta hızlı ve yüksek hızlı şeklinde kategorize edilir. Bu sınıflandırmalar ürünün karşılaşılabileceği durumları senaryo etmek için farklı darbelerde yapılır. Literatürdeki çalışmalar, düşük hızlı darbelerin malzemenin sertliği, mekanik özellikleri, darbe uygulayan cismin kütlesi ve sertliği gibi faktörlere bağlı olduğunu; bu nedenle genellikle 1 ila 10 m/s arasındaki hızlarla incelendiğini öne sürmektedir (Ceyhun ve Turan 2003), (Kara,2012).

Düşük hızlı darbe ile beklenen, malzemenin deney sonucunda nasıl tepki verdiği belirlenir. Bu konuyla ilgili olarak metal ve metal alaşımlarında düşük hızlı darbe sonucunda oluşan hasarın kütlenin düştüğü yüzeyde olduğu gözlenir. Hasarı gerek darbe yapılan yüzeyde gerekse de darbe yapılan yüzeyin etkilemesiyle diğer yüzeyde olabilir. Bu durum tabaklar arası delaminasyonlar olarak karşımıza çıkar. Metallerde darbe eğrisi ile kompozit malzemeler farklılık göstermektedir. Metal malzemeler plastik deformasyon sonucu kopma veya kırılma gözlenirken, kompozit malzemelerde farklı modlarda hasar mekanizmaları gözlemlenir. Düşük hızlı darbe olması hasebiyle yapısal bütünlükte ciddi değişimler beklenmez (Kara, 2012), (Doğan,2022).

Bu çalışmada vakum torbalama tekniği uygulanarak aramid/vinilester kompozit plakalar 10 kat olarak üretilmiştir. Plakalar çekme ve darbe ölçülerine göre kıl testere ile kesilmiştir. Darbe numunelerine, 15 joule ve 25 joule enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda çıktı olarak veriler ile kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-zaman grafikleri çizilmiştir. Çekme numuneleri ise ASTM D3039 standardı baz alınarak kıl testere ile kesilmiştir. Çekme cihazında 2mm/dk sabit hız olarak deney yapılmıştır. Darbe sonucunda malzemedeki hasar modları incelenmiştir. Hasar alanları incelenerek yorumlanmıştır. Çekme ile malzemenin mekanik özellikleri hakkında bilgi edinilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Kevlar fiber aramid fiber olarakta bilinir. Aramid fiber yüksek mukavemet, yüksek modül özellikleri olarak 1970'li yıllarda ortaya çıkmıştır bununla birlikte özgül mukavemet yönünden metallere göre üstün özellikleri nedeniyle bazı uygulamalarda tercih edilmektedir. Poli (parafenilen tereftalamid) malzeme gurubu ile kimyasal olarak ifade edilir. Aramid fiber yüksek tokluk, darbe direnci, sürünme ve yorulma hasarlarına karşı dirençli olarak bilinir.

Kevlar fiberler kompozitlerin polimer olan kısmında kullanılır; genel anlamda epoksi, polyester ve vinilester gibi matris elemanları kullanılır. Fiberler esnek ve sünek olmasından kaynaklı tekstil uygulamalarında rahatlıkla işlenebilir. Kevlar kompozitler balistik gereken savunma sanayinde, çeki halatlarında, roket kılıflarında, basınçlı kaplar, otomotiv sektöründe polimer salmastra olarak kullanılır (William, 2014).

Singh ve Samanta aramid (Kevlar) fiber ve lamineli kompozitlerin termal, mekanik darbe özelliklerini içeren bir araştırma yapılmıştır. Aramid elyafın anizotrop bir malzeme olmasından kaynaklı elyafların yüksek çekme ve yüksek basma mukavemeti gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak kevlar fiberin diğer elyaf malzemelerle olan hibritleşmesi sebebiyle arayüzeydeki lif-matris yapışma mukavemetinde artış sağlayarak malzemeyi rijitleştireceği sonucuna varılmıştır (Singh vd.,2015)

Das ve arkadaşları para -aramid özellikteki kevlar kumaşın balistik performansını iplikler arası sürtünmeye dayalı olan etkileri incelemişlerdir. Balistik test olarak; dokunmuş kumaşlarda statik ve kinetik sürtünme katsayılarının malzeme üzerindeki etkisini tespit etmek için sayısal ve deneysel çalışmalar yapmışlardır. İplik arası sürtünmenin daha yüksek ve yüksek darbe performansı elde etmek için yeterli olmadığı darbe sonucunda burun şeklinin ortaya çıkması yüksek sürtünme katsayıları için temel etken olduğu neticesine varmışlardır (Das vd., 2015)

Bandaru ve diğerleri kevlar lif takviyesi ile matris olarak polipropilen malzemesi ile güçlendirme yapılan zırhın balistik özelliklerini tespit etmek için darbe testi uygulamıştır. Kompozitten yapılmış zırh plakaların imalatı 9 mm metal örtü ile farklı dokuma (2D düz dokuma, 3D ortogonal ve 3D açılı kilitleme) şekilleri kullanılmıştır. Balistik testler sonucunda 3D ortogonal ve 3D açılı kilitli kompozit plakaların 2D dokuma yapılmış kompozit plakaya üstünlüğü %16,44 ve %20 daha yüksek balistik orandaki sonuçlarla gösterilmiştir (Bandaru vd., 2016).

Kumar ve diğerkleri Kevlar fiber ile epoksi matrisi ile imal edilmiş kompozit plakaların balistik darbe davranışını incelemek için sayısal bir çalışma yapılmıştır. Plakaları 100 ila 1000 m/s limitleri arasındaki hızlarla uygulama yapmışlardır. Sayısal simülasyonları darbe analizi için ANSYS AUTODYN bilgisayar yazılımı kullanılmıştır. Testler sonucunda hasar mekanizmaları incelendiğinde balistik limitlerin altında kaldığı ama numuneye mermi isabet ettiğinde malzemede içi enerjinin arttığı görülmüştür (Kumar vd., 2010)

Yang, Kevlar fiberleri ile takviyeli epoksi reçinenin matris olarak kullanılmasıyla imal edilen kompozit plakaların düşük hızlı darbe testleri icra edilerek hasar mekanizmalarını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Farklı kalınlıklarda imal edilen kompozit plakaların farklı enerji miktarlarında (10, 11, 12, 15, 18, 21, 24, 28 ve 32 J) ağırlık darbe testleri yapılmıştır. Numunelerin zamana karşı kuvvet tepkileri, ultrasonik C-tarama teknolojisi kullanılarak hasar boyutları tespit edilmiştir. Darbe enerjisinin kuvvet-zaman verilerinde etkisinin görüldüğü numunelerin kalınlık parametreleri arttırıldığında tepkinin arttığı belirlenmiştir. Düşük hızlı darbe testlerinde kuvvet-zaman grafikleri düzgün ve sinüs eğrisine benzer olduğu, yüksek hızlı darbe testinde salınım oranında farklılık gösterdiği sonucunda varılmıştır (Yang vd., 2013)

Taraghi ve arkadaşları farklı karbon nanotüp içerikleriyle birlikte imal edilen kevlar/epoksi kompozit plakaların düşük hızlı darbe ile mekanik davranışları incelenmiştir. Enerji profil grafikleri malzemedeki penetrasyon seviyesi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Karbon nanotübün kompozit laminatlardaki darbe davranışının etkisi aynı ortam ve düşük sıcaklıklarda darbe enerji seviyesi 45 j'de araştırılmıştır. Literatürde olduğu üzere karbon nanotübün etkisi darbe dayanımında etkisi açıkça görülmüştür (Taraghi, 2014).

Kevlar/epoksi ile imal edilen kompozit laminatların nano kil takviyesinin düşük hızlı darbe testi ile darbe davranışlarını incelenmiştir. İdeal darbe performansları incelemek için %1,5, 3 ve 6 gibi farklı ağırlıklarda nano-killer eklenerek kompozit plakalar imal edilmiştir. Plakadaki elastik toparlanma ve penetrasyon eşiği, nano kil ilave edilmeyen kompozit plakalara kıyasla maksimum darbenin %6 ağırlık içeriğiyle olduğu sonucuna varılmıştır (Reis, 2013)

Üç boyutlu dokuma Kevlar kumaş yapılarının epoksi reçine ile sertleştirilmeden önce ve sonra darbe özelliklerini incelenmiştir. Kompozit kumaşın üç boyutlu şekli Solidworks yazılımı kullanılarak modellenmiş ve daha sonra ANSYS yazılımı kullanılarak darbe tepkileri simüle edilmiştir. Farklı vuruş hızları için bir dizi düşük hızlı

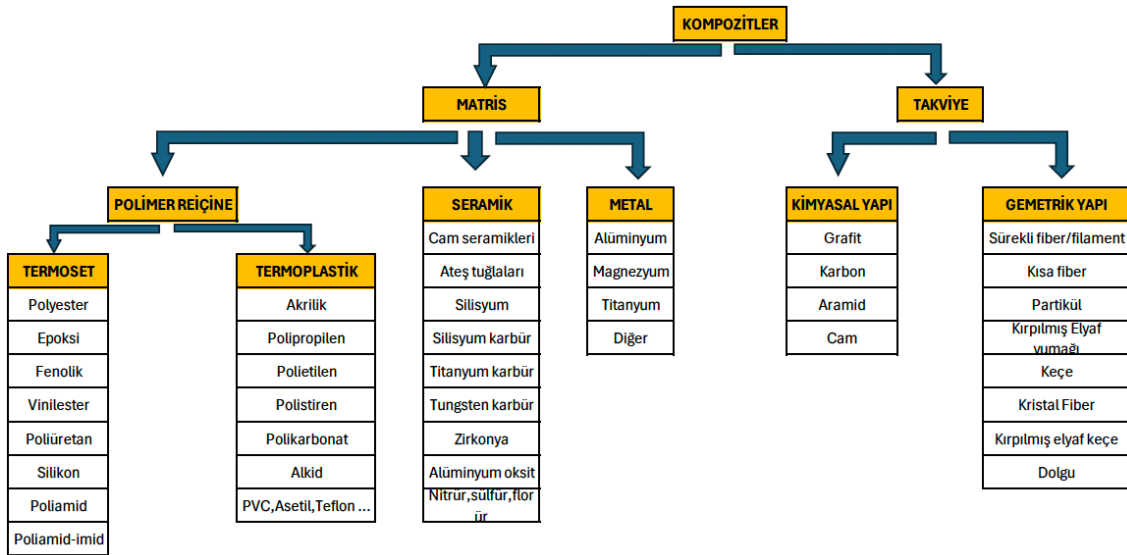
darbe testi deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve ardından sonuçlar elde edilen sayısal sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Dokuma Kevlar/epoksi kompozit laminatların u boyutlu şeklinin, lamina içindeki matris ve elyaf arasındaki yüksek arayüz mukavemeti nedeniyle yeterince daha iyi darbe direncine sahip olduğu kanıtlanmıştır (Misra vd., 2014)



3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Kompozit Malzemelerin Tanıtımı

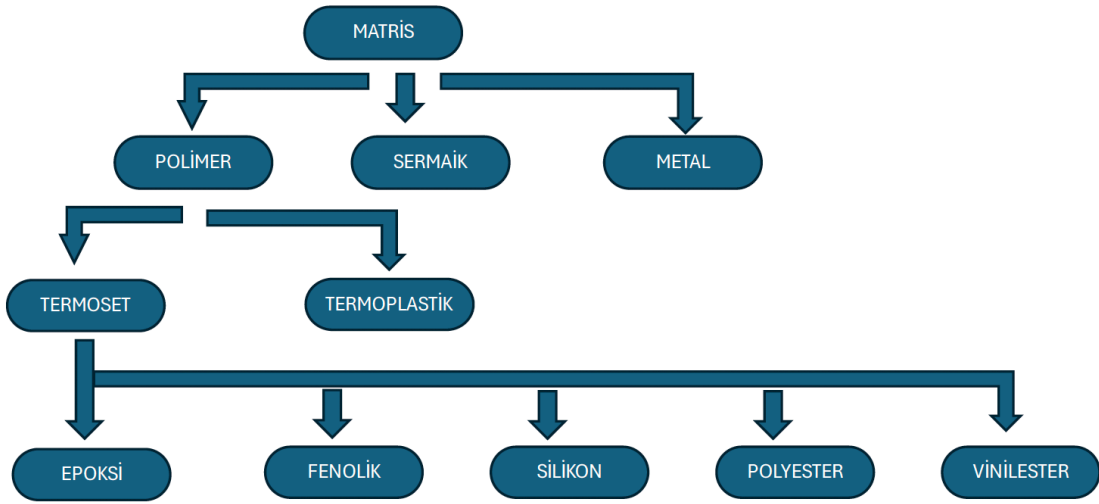
İki ya da ikiden fazla malzemenin fiziksel olarak birleştirilmesi neticesinde tasarımda kullanılacak özelliklerin daha muntazam hale gelmesine kompozit malzeme denir. Üretilen kompozit malzemeler vesilesiyle, daha iyi dayanım, hafiflik, tasarımda kolaylık ve yüksek rijitlik, aşınmaya karşı dirençlilik, ısıya dayanıklı, korozyon direnci yüksek, ısı iletkenliği yüksek gibi özellikler sağlanabilmektedir. Kompozit malzeme imalatında kullanılan malzemeleri referans olarak kompozit malzemelerin kısmi özelliklerini hesaplayabiliriz; yoğunluk, çekme dayanımı, elastiklik modülünü vb. Kompozit malzemeler kendilerini oluşturan malzemelerden daha iyi özelliklere sahip olmaları sebebiyle tasarımda aranan özellikleri sağlarlar. Bu sayede havacılık, uzay endüstrisinde, deniz altı ve gemi gibi malzeme özelliklerinin mühim olan birçok makine elemanı kompozit malzemeler tarafından imal edilmektedir. Kompozit malzemeleri oluşturan iki faz vardır, bunlar ise matris ve takviye fazıdır. Burada matris olarak adlandırılan temel bir bileşen ile yüksek dayanıklılık ve elastiklik modülüne sahip sağlarken takviye olarak bahsettiğimiz faz ise elyaf, parçacık gibi yapısal bileşenlerden meydana gelir. Matrisler, kompozit malzemelerde bağlayıcı görevde kullanılır ve kompozitin bünyesinde bulunan takviye elemanları olan elyafları bir arada tutar. Matrisin ana görevi; destekleyici bileşenleri güçlendirmek, koruma sağlamak ve yük aktarımını gerçekleştirmektir. Matrislerin yoğunluğu, sertliği ve dayanımı elyaflara kıyasla daha düşük olmasına rağmen, elyaflarla bir araya geldiğinde yüksek mukavemet ve rijitlik özelliklerine sahip bir malzeme ortaya çıkar. (Şahin 2004), (Gemi, 2014).



Tablo 1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması

3.2. Matris Malzemeleri

Kompozit yapıların içerisinde, elyafları bir arada tutmak, yükü elyaflara iletmek ve elyafları dış etkenlerden korumak için matris malzemesi kullanılır. Matris malzemesi, başlangıçta düşük viskoziteye sahip bir yapıda olmalı ve sonrasında elyafları sağlam ve düzgün bir şekilde sarabilecek katı hale kolaylıkla dönüşebilmelidir. Elyaf yönlendirmelerine dik doğrultuda, matrisin mekanik özellikleri ve elyaf ile matris arasındaki bağ kuvvetleri, kompozit yapının mukavemetini belirleyici önemli hususlardır. Matris yapılar elyaf yapılarına göre daha zayıf ve esnektirler. Bu durum kompozit yapıların tasarımında ayrıca dikkat edilmesi gereken bir konudur. Kompozitlerde metal, seramik ve plastik esaslı matrisler kullanılmaktadır. Plastik esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler şeklinde ikiye ayrılır (Gemi, 2014).



Tablo 2. Kompozit malzemelerin matris fazına göre sınıflandırılması

3.2.1. Termoset matrisler

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde en çok epoksi reçine, polyester, fenolik reçine gibi malzemeler matris malzemesi olarak kullanılmaktadır. Termoplastikler; oda sıcaklığında maddenin sıvı halinde bulunurlar, ısıtılarak kimyasal tepkimelere maruz bırakılarak yapı sertleşir ve daha sağlam hale gelir. Termosetler; termoplastiklerden farklı olarak ısıtıldıklarında dahi yüksek sıcaklıklarda yumuşamazlar. Geri dönüşü zor olan malzemelerdir. Bu özelliklere sahip olması sebebiyle çoğu Termoset matrisler sertleşmeleri için dondurulmuş olarak depolanmaları şarttır. Epoksi reçineler özellik bakımından hafiflik ve yüksek dayanıma sahip olduğu için Uzay ve havacılık endüstrisinde ve bunun gibi ağırlığın çok kritik olduğu ve yüksek dayanım istenen yerlerde kullanılırlar. Hafifliğin ve dayanımın kritik olduğu sektörlerde, mekanik özellikler iyi, yorulma dayanımı yüksek, ısıl dayanım, takviye malzemesine iyi entegre olması ve sertleşme esnasında düşük çekme oranı gibi özelliklerinden ötürü polyester reçine gibi ucuz olan bir reçine tercih edilir. Epoksi grubunun polimerizasyonu ile Epoksi reçine elde edilir. Çeşitli formüller kullanarak reçinenin özelliklerini büyük ölçüde değiştirmek mümkün kılabilir. Çok farklı epoksiler geliştirilebilir ve ideal bir seçim yapmak çok kritiktir. Kullanılan sertleştiricinin cinsi, üretilen malzemenin özelliklerine büyük ölçüde etki eder. Reçinenin homojen olarak sertleşmemesi durumunda, tahmin edilebilmesi zor tepkilerle karşı karşıya kalabiliriz, bu durum özellikle gerilmeli korozyon olayında karşımıza çıkar. Sertleşme durumu belirli sıcaklıklarda ihtiyaç duyarken genellikle basınç altında meydana gelir. Ayrıca epoksilerin ısıl kararlılıkları 250 °C'ye kadar

geliştirilmiştir. Sertleşme sırasında kendini çekme sorunu yaşanmaz. Yüksek dayanım gösterirler, pek çok elyafı güçlü bağ oluşturabilirler ve kimyasal dirençleri oldukça yüksektir.

Vinil ester reçineler polyeester reçineler ile hemen hemen aynı özellikleri gösterir. Takviye fazı ile matris arasındaki bağ gücü geliştirilmiştir. Polyester, glikol ve doymamış hidroksilik bileşenlerin eklenmesiyle oluşur. Vinil ester reçineler, tokluk artırıcı ve çekme azaltıcı özelliklere sahip yeni sentez yapıları ile mekanik performansı iyileştirebilir. Bu reçineler, kimyasal tesisler, borular ve tanklar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. (Doğan, 2022).

3.2.1.1 Vinil ester reçine

Vinil ester reçineler, polyeester reçinelerin sahip olduğu özelliklerle benzer özelliklere sahiptir. Matris elemanı ile takviye elemanı arasındaki bağ kuvveti güçlendirilmiştir. Vinil ester reçineler; malzemedeki çekmeyi azaltıcı ve tokluğu arttıran vb. mekanik özellikleri bünyesinde barındıran yeni sentez yapıları da kullanılabilir. Vinil ester reçineler, savunma sanayisinde tank imalatında, kimyasal tesislerde ise borularda kullanımı mümkündür (Doğan, 2022).

3.2.2. Termoplastik matrisler

Kompozit malzemelerde matris olarak termoplastik malzemeler kullanılmaktadır. Termoset malzemedeki farklı olarak oda şartlarında katı fazda bulunurlar. Termoplastik malzemeleri anlatırken camsı geçiş sıcaklığı malzemenin oda şartlarındaki faz ile aynı durumdadır. Malzemeye camsı geçiş sıcaklığı üzerinde ısı ve basınç uygulanmasıyla birlikte malzeme kolay bir şekilde şekillendirilebilir (Schweitzer, 2006).

Camsı geçiş sıcaklığı üzerine sıcaklık ve basınç uygulanması ile malzeme katı fazdan sıvı faza geçiş sürecine girerken soğutma işlemi esnasında tekrardan katı faza doğru geçiş yaparlar. Termoplastik malzemeler tekrarlı bir şekilde kullanılabilecek malzemeler olarak bilinir (Kurtman ve Göktaş, 2006).

Termosetler	Termoplastikler
Raf ömrü var	Raf ömrü bilinmiyor
Yeniden işlenemez	Yeniden işlenebilir
Isıtmayla ayrışmazlar	Yumuşayabildiği için tamir edilebilir
Yapışkan	Yapışkan değil
Düşük üretim sıcaklığı	Yüksek üretim sıcaklığı
Çözücü direnci düşük	Çözücü direnci yüksek

Tablo 3. Polimer malzemelerin karşılaştırılması (Töre, 2010)

3.3. Takviye Malzemeleri

Kompozit ürünlerde takviye malzemesi olarak sıklıkla elyaflar tercih edilir. Elyaf malzemelerin çapları, uzunluğuna göre nispeten daha küçük malzemelerdir. Kompozit malzemelerde elyafın en önemli görevi yükü taşıyor olmasıdır. Elyaf takviye malzemesi, kompozit malzemeye dayanım, sağlamlık ve rijitlik kılar. Kompozit malzemedeki devamlı olan elyaflara “filaman”, metalik filamanlara ise “tel” olarak adlandırılır. Vele ki elyafların geometrik görünüşü dikdörtgen prizması görüntüsü şeklinde veya diğer bir deyişle kesit alanı dikdörtgense ve dikdörtgenin bir kenarı diğer kenarının dört katından daha uzun ise, bu tür elyaflara "şerit" denir. (Gemi, 2014).

3.3.1 Aramid elyaf

Aramid, aromatik poliamidlerden oluşan bir tür naylon çeşididir. Aramid ismi, aromatik poliamid kelimelerinin baş harflerinden türetilmiştir. Takviye malzemesi olarak kullanılan aramid elyaf, Kevlar ve Twaron gibi isimleri piyasalarda ticari isim olarak bilinmektedir. Piyasada yaygın olarak kullanılan üç farklı Kevlar türü bulunmaktadır. Kevlar çeşitleri arasında Kevlar 29, Kevlar 49 ve Kevlar 149 bulunur. Özellikle Kevlar 49, özgül sertlik özelliğiyle öne çıkar ve ileri teknoloji gerektiren kompozit uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Aramid elyafların birçok avantajlı özellikleri olduğu gibi bunun yanında dezavantajları da mevcuttur. Bazı türleri, ultraviyole ışınlarına, asitlere ve tuzlulara karşı dirençsizdir. Ayrıca, malzeme kumaş ya da fiber formundayken kesme ve katlama işlemleri zorlaşabilir. Matris malzemesiyle uyumlu bir birleşim sağlanamadığında ise, küçük çatlaklar oluşabilir ve bu da malzemenin su

emmesine, dolayısıyla deformasyona neden olabilir. Aramid elyaflar savunma sanayinde, askeri alanda, gemi ve denizcilik sahalarında ayrıca havacılık ve otomotiv endüstrileri gibi sektörlerde çok geniş yelpazeyi kaplayan alanlarda tercih edilir (Mazumdar,2002), (Bakkal,2011), (Chawla, 2011), (Asi,2018), (Doğan, 2022).

3.3.2. Cam elyaf

Kompozit malzemelerde çok fazla tercih edilen ve en ekonomik malzemelerden biri de Cam Elyaflardır. Genellikle yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olmalarıyla bilinirler. Cam elyafların elastiklik modülü, alüminyum alaşımlarına kıyasla daha yüksektir, ancak grafit ve aramid elyaflara nazaran daha düşük kalmaktadır. Cam elyafı güçlendirilmiş plastiklerin rijitlik/yoğunluk oranı, metallerin rijitlik/yoğunluk oranına göre kıyaslandığında daha zayıf olduğu bilinmektedir. Ancak, cam elyaflar kimyasal direnç bakımından daha yüksek özelliklerine sahiptir. Cam elyaflar, reçine ile bir araya geldiklerinde uygun özelliklere sahip bir malzeme oluşturur. Ancak, matris ile elyaf malzeme arasındaki kurulacak bağların yetersiz kalması, iç yüzeyde kusurların oluşmasına neden olabilir. Elyaf ile reçine arasındaki güçlü yapışma, malzemenin özelliği için kritik öneme sahiptir. Takviye malzemesi ile matrisin iyi yapışmaması durumunda, aralarındaki kayma, kompozit malzemenin rijitlik ve dayanım özelliğini olumsuz etkiler. Bu sorunu önlemek için elyaflar, özel kimyasallarla kaplanır. Cam elyaflar, kimyasal özelliklerine göre, E, C, D ve S camı olarak sınıflandırılmaktadır. Tablo 4'te E camı ile karbon elyaflarının özellikleri gösterilmektedir (Gemi, 2014).

Özellikler	E camı	Karbon (12K A-42)
Yoğunluk, ρ (g/cm ³)	2,6	1,75
Elastiklik modülü, E (GPa)	73	230
Çekme dayanımı, σ (GPa)	2,4	3,5
Çekme uzaması, (%)	4	1,5
Özgül modül, E/ ρ ((MN/m)	28	131
Özgül dayanım, σ/ρ (MN/m/kg)	0,93	2

Tablo 4. Cam elyaf özellikleri

3.3.3. Karbon elyaf

Gelişmiş polimer matrisli kompozitler içinde en fazla kullanılan yüksek performansa sahip takviye malzemesi Karbon Elyaftır. Yüksek özgül rijitlik ve özgül dayanım özelliklerine sahiptir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda çekme modülünü ve mukavemetini koruma yeteneği ile öne çıkar. Karbon elyaflar, oda sıcaklığında nemden veya kimyasal maddelerden etkilenmezler. Takviye malzemesinde karbon fiber kullanılan tabakalı kompozitler mühendislik uygulamalarında spesifik özellikleri ortaya çıkarır. Uygun maliyetli ve kompozit imal yöntemlerine uygun elyaf teknikleri geliştirilmiştir. Takviye elemanı karbon elyaf olan kompozitler uzay sanayisinde (yakıt tankları, roket dış çerçevesi), savunma sanayisinde (İHA, SİHA ve savaş uçaklarının bazı ekipmanlarında), otomotiv sektörü uygulamalarında karşımıza çıkmaktadır. Karbon fiberler ile imal edilen kompozitleri iki grupta inceleyebiliriz. Petrol türevleri kullanılarak oluşturulan zift katkılı elyaflar, dayanım gerektirmeyen uygulamalarda karşımıza çıkar. Takviye malzemesi genellikle polyacrylonitrileden (PAN) imal edilmiş elyaflar tercih edilir. Bu grubun özellikleri ele alınırsa yüksek mukavemetli fiber türleri karşımıza çıkar. Karbon elyafların kullanılması malzemenin yüksek dayanımlı olması üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Karbon elyafları kimyasal olarak incelediğimizde grafit ile karbon atomları güçlü kimyasal bağ kurmalarıyla yüksek elastisite çekme mukavemet dayanımına sahiptir. Grafit tabakalarının, elyaf eksenine paralel olarak dizildiği koşullarda mukavemet özellikleri en yüksek değere ulaşır (Gemi, 2014).

3.4 Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozitler, tarihte bilinen ilk kompozit malzeme türlerinden biridir. Birbirinden farklı iki veya daha fazla plakanın tabakalar şeklinde dizilmesiyle oluşturulan malzeme tabakalı kompozit malzeme olarak bilinir. Ek olarak, tabakalı yapıları sayesinde her tabaka bağımsız bir kompozit malzeme özelliği gösterebilir. Tabakalı kompozitler, tasarım, üretim, standartlaştırma ve kontrol açısından diğer kompozitlere göre daha kolaydır. Özel gereksinimlere yanıt verebilmek için birden fazla tabaka bir arada kullanılabilir. Bu tür kompozitler, sandviç malzeme olarak da adlandırılır. Tabakalama işlemi sayesinde malzeme mukavemet, sertlik, aşınmaya karşı dirençli ve ısının korunması gibi özellikler ayarlanabilir (Gemi, 2014).

3.5. Kompozit Malzeme Üretimi

Kompozit parçaların imal etme aşamasında parçayı oluşturan parçanın özellikleri, şekilleri, boyutları, tasarım detaylarına ve nihai kullanım amaçlarına göre belirlenir. Her ürünün kendine göre üretim metodu değişiklik gösterebilir. Üretim sürecinin seçiminde, kullanılacak matris tipleri malzeme için önemlidir. Fiber takviyeli kullanılarak üretilen plastikler ve matrisi metal olan kompozit malzemeler ile yapılan helikopterin pervanesinin imali için farklı süreçler vardır. Kompozit malzemede matris fazı aynı kullanılsa bile üretim parametreleri değişebilir. (Sinha 2006), (Gemi, 2014).

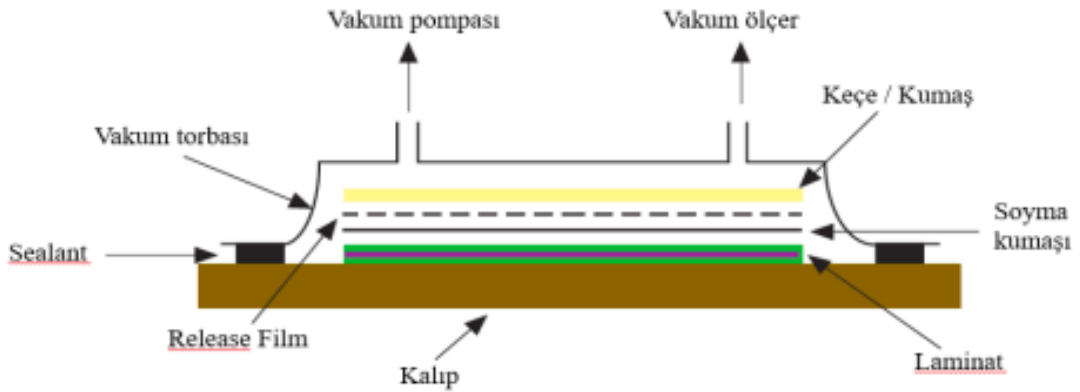
3.5.1. Fiber takviyeli kompozit laminat imal yöntemleri

Fiber takviyeli kompozit laminat üretimi, birçok kompozit üretim tekniğiyle yapılabilir, lakin bu imalatta lamine adı verilen tek kat kumaş fiber takviyeli elyaflar kullanılır. Kumaşlar, tek yönlü, çift yönlü veya bunlardan değişik olarak farklı dokuma tekniklerine göre dokunmuş olabilir. El yatırma, vakum torbalama, doğrudan herhangi bir kalıp üzerine uygulanıp vakumla işlenmesi ve/veya otoklava yerleştirilmesi, sıcak pres kalıplama gibi yöntemlerle üretilebilir. Üretim esnasında kalıba bulunduğu ortamdan etkilenebilecek olan sıcaklık, hava basıncı, ortamın havasının kalitesi, kalıp levhaların sıcaklığı vb dış faktörlerin haricinde matris elamanı olarak kullanılan reçinenin iç etkenleri de sıvıya karşı göstermiş olduğu direnç ve sıcaklık gibi faktörlerde önemli rol almaktadır. İlk etap üretimi tamamlanıp akabinde, otoklav işlemi veya sıcak kalıplama işlemleri sırasında vakum uygulaması ya da cihazların malzeme üzerinde oluşturduğu sıcaklıklar ve işlem süreleri de son derece önemlidir.

3.5.1.1. Vakum torbalama

Vakum torbalama metodunda, el yatırma metoduna benzerlik göstererek reçine elyafın üzerine yayılarak emdirilir. Vakum torbalamanın el yatırması yönteminden ayrı kılan özelliği ise elyaflara reçineler iyice yedirildikten sonra torbalanarak vakumlanır. Bu yöntemle beraberinde hem elyafa yedirilen fazla reçinenin vakum vasıtasıyla yapıdan uzaklaştırmak hem de laminat'a doğrudan basınç uygulayabilmektir. Elyafın üzerine bir release film serilir ve ekseriyetle bunun üzerine polyesterden yapılmış bir keçe yerleştirilir. Keçenin buradaki vasfı, vakum sırasında torba içindeki havanın düzgün bir

şekilde dağılmasına yardımcı olur ve fazla reçinenin üzerinde toplanmasını sağlar. Bu yöntemde, el yatırma yöntemine benzer şekilde kürlenme, atmosfer koşulları altında tamamlanır. Kürlenme süreci nihayete erdikten sonra release film ve üzerindeki keçe yapıdan ayrıştırılır ve sonucunda kompozit laminat elde edilir. Vakum torbalama yöntemi, aynı el yatırma yönteminde olduğu şekilde bütün reçine sistemlerine uygulayabilmek mümkündür. Ancak, vakum torbalama yöntemi, fazla reçineyi toplama imkânı sunduğundan dolayı fiber oranları daha yüksektir. Bunun yanı sıra, vakum ve vakumun oluşturduğu basınç yardımıyla, yapı içerisindeki boşluk oranı daha az hale gelir. El yatırma metodunda kullanılan polyester ve Vinil ester reçinelerinin üretim sırasında meydana gelen zararlı gazlar, vakum torbalama yönteminde havaya karışma oranı çok daha düşüktür. Bu sayede, çevresel etkiler ve sağlık riskleri azaltılmış olur. Vakum torbalama yöntemi, el yatırma yönteminden ayırıcı özelliği sarf malzemeleri kullanılması gerektiğinden dolayı meblağsı daha yüksektir. Vakum torbalama yöntemi, el yatırma yöntemine kıyasla daha zor çalışılabilir ve öğrenilebilir olup, çalışanın becerisini gerektirir. Bu yöntemin görseli Şekil 1'de sunulmuştur. Semerciöz,2021).

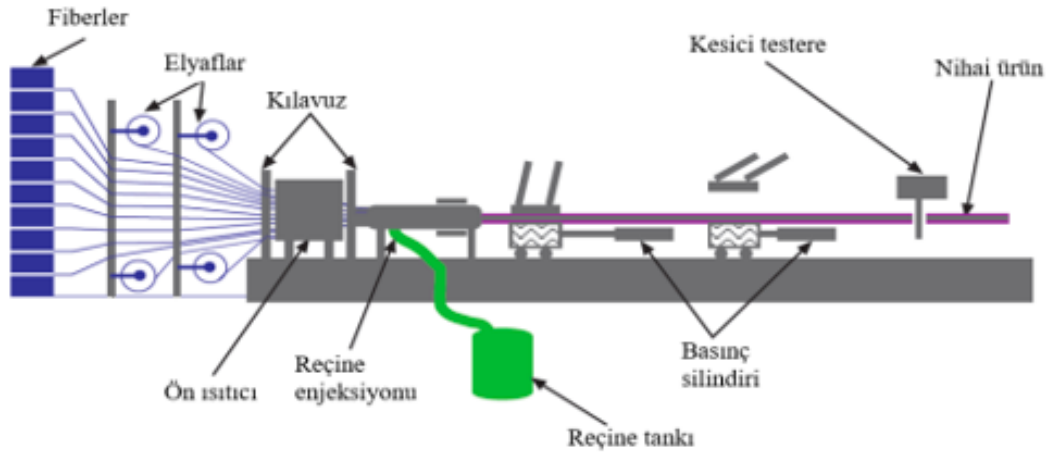


Şekil 1. Vakum torbalama yöntemi (Gurit Holding AG,2000)

3.5.1.2. Pultrüzyon

Pultrüzyon yönteminde, fiberler bobin askısından çekildiği esnada ilk olarak reçine banyosuna batırılır, ardı sıra önceden ısıtılmış kalıptan geçirilir. Burada kalıp,

reçineyle emdirilen elyafın reçine miktarını kontrol etmede önemli bir rol oynar. Bunun yanı sıra, geometrik görünümün son halini kalıp vasıtasıyla şekillendirilir. Fiber yönlerini belirlemek için bu aşamada bir kılavuz kullanılabilir. Isıtma işlemi, kürlenme sürecini tamamlamak için uygulanır. Üretim hattının sonunda bulunan kesici takım ise kompozit laminatı istenilen boyutlarda keser. Şekil 2.'de pultrüzyon yönteminin görseli paylaşılmıştır. Şekil 2. Pultrüzyon yönteminde fiber tercihi olarak genellikle cam fiber tercih edilirken matris elemanı olarak da polyester reçine kullanılmaktadır. Pultrüzyon yöntemi, oldukça hızlı ve kesintisiz üretim sürecidir. Sürekli besleme sağlandığında, kürlenme işlemi de hızla gerçekleştiğinden maliyet bakımından uygun bir yöntemdir. Bu süreçte ham maddeler haricinde maliyetin büyük bir kısmını ısıtılacak kalıp üretiminden kaynaklanır. Ayrıca, bu yöntemde sayesinde reçine miktarı kontrol edilebilir, bu da yüksek fiber oranlarına ulaşmayı ve dolayısıyla üstün mekanik özellikler elde etmeyi mümkün kılar (Gurit Holding AG,2000).



Şekil 2. B. Pultrüzyon yöntemi (Gurit Holding AG,2000)

3.5.1.3. Otoklav ile üretim

Bu yöntemde Otoklav dışı prepregler kullanılır. Otoklav torbalama yöntemi ile prepreglerin otoklav öncesi işlemleri birbirine yakınlık göstermektedir. Bu prepregler, 60-120°C arasında kürlenebilen reçine kimyasal sistemlerine sahiptir. Genellikle epoksi reçineler, bu yöntemde kullanılan prepreglerde matris sistemi olarak tercih edilir. Otoklava uygun olan prepreglere göre, bu tür prepreglerin kullanım ömrü daha kısadır

lakin bu durum çeşitli katalizörlerin eklenmesiyle bu ömür uzatılabilir. Bu yöntemde tercih edilen prepreglerin reçine sistemlerinin akışkanlık özellikleri, otoklav kullanımına gerek duyulmasını engeller. Torbalama işlemi esnasında uygulanan vakum basıncı yeterliyken, otoklav harici basınca gerek duymaz. Otoklav torbalama metodunda olduğu gibi bu yöntemde de bütün avantajlar geçerlidir. Dış basınca gerek kalmadan ve düşük sıcaklıklarda kürlenme işlemi meydana gelebildiği için tahta benzeri daha uygun kalıp malzeme uygulaması mümkündür. Ayrıca otoklav torbalama üretimiyle karşılaştırıldığında bütçesel olarak daha uygun enerji sunmaktadır (Gurit Holding AG,2000).

Otoklav kalıplama metodu, önceden reçine ile emprenye edilmiş elyafların, yeniden reçine enjeksiyonuna gerek duyulmadan, yüksek sıcaklık ve basınç altında kürlenmesine dayanan bir prosesdir. Otoklav kalıplama yöntemi, ekseriyetle havacılık sektöründe en çok tercih edilen yöntemlerden biridir ve bu sayede karmaşık şekilli parçalar, yüksek fiber oranıyla birlikte sorunsuz bir şekilde üretilebilir. Bu yöntemde, prepregler istenilen boyut ve şekillerde kesilerek kalıplara tasarıma uygun şekilde yerleştirilir ve ardından vakum torbası ile kaplanır. Vakumlama işleminin ardından, basınçla beraberinde sıcaklığa maruz bırakılarak otoklav aşaması tamamlanır. Otoklav kalıplama metodunun işçilik süresi, diğer yöntemlere kıyasla daha vakit alıcıdır. Bu yöntemde en yaygın kullanılan malzeme karbon fiber prepreglerdir. Bor fiber, cam fiber veya aramid fiber prepregler de bu metotta kullanılabilir; ancak oranları karbon fiber prepreglere kıyaslandığında daha sınırlıdır. Karbon fiber prepreglerden elde edilen kompozit yapılar hem yüksek dayanıklılık hem de hafiflik sundukları için tercih edilmektedir. Bu özellikler sebebiyle de tercih edilmenin temel nedeni oluşur. Bu vesilesi ile de kütle tasarrufu sağlanabilmektedir. Havacılık sektöründe ağırlığın en kritik faktörlerden biri olması, karbon fiber prepreglerin tercih edilmesinin başlıca nedenlerinden biridir. Prepreg sistemlerinde epoksiye ilave olarak Polisiyanat, BMI ve Poliimid gibi sıcaklığa karşı koyabilen reçine entegrasyonları kullanılmaktadır. Otoklav kalıplama yönteminde, vakum torbalama işlemine uygun açık kalıplar kullanılmaktadır. Bu kalıplar ekseriyetle çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerden imal edilir. Kompozit malzemeler içerisinde cam/epoksi, karbon/epoksi ve karbon/BMI sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. (Mazumdar,2001).

Otoklav kalıplama yöntemine uygun olan prepregler, soğuk oda koşullarında -18 °C'de saklanır. Üretim aşamasında kullanılmadan önce, soğuk odadan çıkarılarak

prepreglerin oda sıcaklığına ulaşması beklenir. İstenilen sıcaklığına geldiğinin akabinde, prepregler arzu edilen boyut ve şekillerde kesilir, ardından serim istasyonuna iletilerek tasarıma uygun şekilde kalıplar üzerine yerleştirilir. Bu işlemlerin tamamı, toz, basınç ve sıcaklık gibi çevresel koşulların kontrol edildiği temiz odalarda uygulanır. Prepreg üretiminde aksi bir durum olmadığı sürece tek yönlü UD (0°) malzemeler çalışılır. Lakin kompozit ürünlerin tasarımı baz alındığında gerektiği zamanlarda fabric diye nitelendirilen dokuma elyaf formunda da tercih edilebilir. Bazı belli katmanlar prepreg serim esnasında yenilenerek ara sıkıştırma işlemleri vakum desteğiyle yapılır. Bu işlemin amacı, prepreglerin aralarındaki yapışmayı arttırmak ve ön görülemeyen kusurları gidermektir. Tüm serim işlemi tamamlandıktan sonraki son adım torbalama işlemi gerçekleştirilir ve ardından otoklav sürecine geçilir. Torbalama ve laminasyonu bitmiş yapının, konsolidasyon ve kütleme prosesleri için otoklav düzeneğine koyulur. Otoklavlar torbalaması tamamlanmış kalıplara belli bir düzeyde sıcaklık ve basınç veren mekanizmadır. Matris sisteminin çeşidine, numunenin et kalınlığına ve malzemenin geometri şekline bağlı olarak basınç ve sıcaklık belirlenir (Mzumdar,2001).

Laminata uygulanacak iki tür basınç vardır. Bunlardan biri torbalama sırasında yapılan vakum, ikincisi ise dışarıdan uygulanan basınçtır. Otoklav içerisinde kullanılan havayı destekleyen iki materyal vardır, bunlardan ilki basınç diğeri azot desteğidir. Yüksek sıcaklıkta meydana gelen kütleme olaylarında yangın veya yanma gibi istem dışı olayların önüne geçebilmek için azot kullanılır. Otoklav dışında bulunan bilgisayar destekli programlarla yardımıyla otoklav içerisindeki basınç ve sıcaklık etkenleri takip edilir. Basınç seviyesi, kullanılan prepreglere bağlı olarak değişir ve genellikle alt sınır 3,2 bar, üst sınır 7 bar aralığında ayarlanır. Otoklav üretim aşamalarında sıcaklık genellikle 180 °C ayarında olması istenir ve oda sıcaklığından istenilen bu 180 °C' ye, genellikle 2 °C/dakika hızla yükseltilir. Talep edilen sıcaklığa ulaşan laminat, belli bir zaman bu sıcaklıkta bekletildikten sonra %100 kürlenme sağlanır. Ardından, sıcaklık oda sıcaklığına sabit bir hızla düşürülür. Günümüzde, prepreglerin kalıplara yerleştirimi esnasında insan elinden kaynaklı hataların önlenmesi amacıyla fiber yerleştirme makineleri ile yapılmaktadır. Prepregler sayesinde fiber oranı yüksek kompozit malzemelerin üretimine katkı sağlar. %60'tan fazla fiber oranına sahip olan kompozit malzemeler, bu sayede çok daha iyi mekanik özellikleri sergiler. Otoklav yöntemlerinden olan torbalama sistemi yalnızca kolay geometrik şekiller değil en zor şekillere kadar imalat imkânı sunar. Bu avantajlarının yanı sıra dezavantajı ise yatırımı maliyet açısından külfetlidir. Buna ilaveten prosesin işçiliği zaman almakla birlikte kuru elyaflara kıyasla

pregregler daha maliyetlidir. Bu neticelerin sonucunda üretimden kaynaklanacak hatalarının en aza düşürülmesi istenir.

3.5.1.4. Otoklav harici pregreg

Bu metotta, otoklav dışı prepreglerin kullanılmasıyla birlikte, prepreglerin otoklav öncesindeki prosesi otoklav torbalama yöntemine benzer şekilde yapılır. Prepregler, 60°C ile 120°C aralığındaki sıcaklıklarda kürleşebilen reçine kimyasal sistemlerine sahiptir. Matris sistemi elamanı olarak bu metotta ekseriyetle epoksi reçine seçilmektedir. Bu tür prepreglerin kullanım ömrü, otoklavda kullanılan prepregler ile kıyaslandığında daha kısa olup, belli katalizörler eklenerek ömrü uzatılabilir. Bu metotta, prepreglerin reçine sistemlerindeki akışkanlık özelliği, otoklav kullanımını gereksiz kılar. Bu yöntemde, otoklav torbalama prosesindeki gibi dış basınca gereksinime gerek yokken; torbalama esnasında uygulanan vakum basıncı kâfi gelmektedir. Otoklav torbalama yönteminin sunduğu bütün artı özellikler bu metotta da aynı şekilde devam etmektedir. Kürlenme işlemi dış basınç etkisi altında olmadan ve düşük sıcaklıklarda gerçekleşebildiğinden dolayı daha uygun maliyetli tahta gibi kalıp malzemesi kullanmaya imkan sunarken de daha ucuz enerji maliyeti de yanında getirir. (Gurit Holding AG,2000)

3.6. Düşük Hızlı Darbenin Mekanikliği

İki cisim çarpıştığında, çarpışan yüzeyler temas ettiğinde, temas noktalarında basınç artar. Bu artan basınç, yüzeylerde yerel deformasyon ve nüfuziyet (indentation) oluşmasına neden olur. Darbe sırasında, her bir an için temas alanındaki basınç, cismin zıt doğrultularda bir etki ya da tepki kuvveti oluşturmasına yol açar. Bu kuvvet, cismin yüzeylerinin birbirine geçmesine karşı direnç gösterir, yani cismin deformasyona uğramasına engel olur. Başlangıçta etkinin artmasıyla beraber temas kuvveti de artar. Bu kuvvet, cisimlerin birbirine yaklaşan hızlarını düşürür. Darbe anında, temas kuvvetlerinin yaptığı iş, her iki cismin hızını sıfırlayarak durmalarına yol açar. Bu noktada, sıkışma sırasında biriken enerji, cisimleri birbirinden ayırmaya zorlar. Sonuç olarak, bu iki cisim, karşılıklı olarak bir izafi hızla uzaklaşırlar. Yerel deformasyonlar, katı cisimlerin kendi aralarındaki çarpışmada temas kuvveti iki nesnenin birbirine temas alanı oluşturabilmesinden dolayı oluşur. Darbe sırasında meydana gelen yerel deformasyonlar, her ne kadar çarpışan nesnelere sertliği önemli olduğu gibi ilk temas başlangıçtaki izafi

çarpma hızı da önem arz etmektedir. Düşük hızlı çarpışmalarda, çarpma sonucu ortaya çıkan temas basınçları genellikle küçük deformasyonlara yol açar. Bu küçük deformasyonlar, sadece temas alanının çevresinde sınırlı bir bölgeyi etkiler. Ancak yüksek hızlarda, temas alanı çevresinde plastik akma (plastik deformasyon) sonucu büyük deformasyonlar meydana gelir. Bu büyük yerel deformasyonlar, krater oluşumu (cratering) ve dalma (penetration) gibi belirgin şekillerde ortaya çıkar ve genellikle gözlemlerle kolayca tespit edilebilir. Deformasyonlar, her durumda, çarpışan nesnelere hızlarında değişikliğe sebep olan temas kuvvetlerinin bir parçası olarak meydana gelir. (Stronge 2000).

3.7. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Bir cisme veya malzemeye anlık olarak düşük, orta veya yüksek hızda etki eden ani dış kuvvete darbe denir. Kullanılan alana ve uygulama amaca bağlı olarak darbelerde değişik şekiller meydana gelebilir. Darbeler genel olarak ikiye ayırarak olursak düşük hızlı darbeler ve hızlı darbeler olarak gruplayabiliriz. Ancak, bu iki kategori arasında net bir sınır bulunmamaktadır. Yapılan çalışmalar, bu geçişin kesin olarak belirlenmesi konusunda henüz net bir sonuca ulaşamadığını göstermektedir. Bu alanda yapılan çalışmalar neticesinde düşük hızlı darbeye malzemenin özelliklerine, çarpan cismin kütleline ve iki cisminde rijitliğine bağlı olarak 1 m/s ile 10 m/s aralığında değişen hızlar olarak kullanılması gerektiğini öne sürülmektedir. (Ceyhun ve Turan 2003).

Düşük hızlı darbelerin en basit örneği, imalat veya bakım sırasında kompozit malzeme üzerine kazara bir parçanın düşmesidir. Bu tür darbeler, genellikle çarpışma temas anında malzemenin iç yapısında deformasyona neden olan darbelerdir. Düşük hızlı darbe bazen düşük enerjili darbe diyerekten isimlendirilir. Düşük enerjili darbeye, parçanın iç yapısında maruz kaldığı darbeye karşı tepki gösterebilmek için ihtiyaç duyulan süre yeterlidir. Bu sebeple hedef malzemenin dinamik yapısal dönütü oldukça kritik öneme sahiptir. (Mili ve Necip 2001).

Deneysel olarak yaklaşık 74,1 m/s'ye kadar olan darbe hızları, yüksek hızlı darbeler olarak kabul edilir ve bu darbeler balistik limitte gerçekleşir. (Jenq ve Mo 1996).

Yüksek hızlı darbelere örnek olarak, bir uçağın inişi sırasında yahut kalkışı sırasında iskelet kısmına bir taşın çarpması verilebilir. Bu tür darbelerde, düşük kütleli bir cismin yüksek hızla çarpması bahsi geçen konudur. Böyle bir durumda, çarpan cisim kompozit malzemeye girebilir ya da malzemeyi yırtıp geçebilir. Darbeye karşı verilen

tepki, malzemenin özelliklerine bağlıdır. Örneğin, metal ve metal alaşımlarında darbeye verilen cevap, plastik deformasyon ve elastik uzama olarak ortaya çıkar. Bu tür malzemelerde darbe hasarı genellikle temas edilen yüzeyde oluşur ve oluştuğu anda kolayca keşfedilebilir. Metal ürünlerde darbe hasarı ekseriyetle ciddi bir tehdit olarak algılanmaz. Bunun nedeni, metallerin plastik deformasyon yetenekleri sayesinde yüksek ölçüde enerjiyi soğurabilmeleridir. Ayrıca metaller, gerilmelerin stabil olduğunda, yapı sertleşmeden önce oldukça büyük uzamalara ulaşabilir. Bu sebeple, oluşabilecek ani ve beklenmedik şekilde kopmalar gerçekleşmez. Kompozit malzemelerde darbe sonucu meydana gelen hasar, çarpmanın türevine bağlı olarak hasar alan yüzeyde oluşabileceği gibi hiç darbe almamış yüzeyde de ortaya çıkabilir. Bu tür hasarlar, genellikle malzemenin içyapısında delaminasyonlar (tabakalar arası ayrılmalar) şeklinde başlar. Bu sebeple kompozit yapıya gelebilecek düşük hızlı darbe yahut hızlı darbelerin, yapıda oluşturabileceği tahribatı tahmin etmek, önden simülasyonunu kurgulamak ve bunlara ait malzemenin teknik özelliklerinin (kırılma tokluğu, enerjiyi emme kabiliyeti, mukavemet endeksi, çentik hassasiyeti vb) belirlenmesi gerekir.

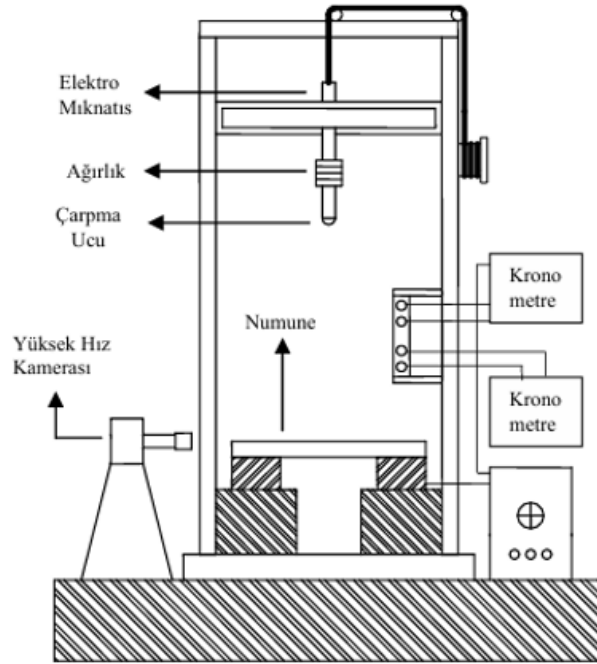
3.8. Darbe Testi

Kompozit yapıların darbeye karşı davranışlarını analiz etmek için standart kabul edeceğimiz bir test tekniği yok ve farklı milletler, kurumlar ile araştırmacılar arasında genel geçer kabul edilen bir yöntem mevcut bulunmamaktadır. Bu durum çeşitli araştırmalar ve çalışmaların neticeleri kıyaslandığında kompozit materyallerin darbeye karşı vermiş oldukları tepkiler modelleme çalışmalarında problem oluşturmaktadır. Bu dezavantajlarına karşın, kompozit materyallerde darbe özelliklerini belirlemek için bu zamanda çeşitli test yöntemleri ve cihazlar sıklıkla uygulanmaktadır. Bunlar;

- Sarkaç testleri (Izod, Charpy ve Pendulum)
- Ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu
- Ağırlık düşürme testleri
- Yüksek hızlı darbe testleri (Basınçlı hava ve Split-Hopkinson) şeklindedir.

3.8.1. Ağırlık düşürme testi

Izod ve Charpy test metotları yerine artık malzemenin dinamik özelliklerini ortaya koymada ağırlık düşürmeli darbe testleri kullanılmaktadır. Charpy ve Izod ve test yöntemlerinde darbenin sınırı belirlidir lakin, Ağırlık düşürmeli darbe testinde ise malzemeye uygulanan darbe enerjisi ve çarpma hızı arzu edilen biçimde ayarlanabilir. Ayrıca, belirli bir ağırlığın istenilen mesafeden malzeme üzerine düşürülmesi mümkün hale gelir. Bazı Ağırlık düşürmeli test cihazları ise yer değiştirme veya ivmeyi ölçmektedir. Böylece, çarpma anındaki yük, yer değiştirme ve ivme değişimleri kaydedilebilir. Bunun sayesinde yer değişimi, çarpma esnasındaki değişim ve yük kayıt altına alınabilir. Elde edilen bu neticeler, darbe enerji-zaman ve darbe yük-zaman grafiklerine dönüştürülebilir. Bu verilere dayanarak, malzemede meydana gelen en tepedeki yük ve absorbe edilen enerji gibi hasar gelişimleri ile bağlantı kurulabilir. Geleneksel ağırlık düşürme test makinası Şekil 3' te detaylı hali bulunmaktadır.



Şekil 3. Tipik bir ağırlık düşürme test düzeneği

Kompozit materyallerinin darbe niteliklerini etkileyen bazı özellikler bulunmaktadır. Bunları da şu şekilde açıklayabiliriz:

- Darbe test cihazı (sarkaç, serbest ağırlık düşürme v.b),
- Çarpan cismin özelliği (cismin içi dolu ya da boş, geometrik yapısı ve boyutu v.b),

- Çarpan cismin enerjisi,
- Materyalin oluşturulması (geometrisi, numuneni dayandığı noktaların sabitlenmesi).

Bu tür faktörlerden dolayı kompozit materyallerin darbe özellikleri göz önüne alındığı vakit bütün bu maddelerin dikkate alınması gerekmektedir (Ceyhun ve Turan 2003).

3.8.2. Yüksek hızlı darbe testi

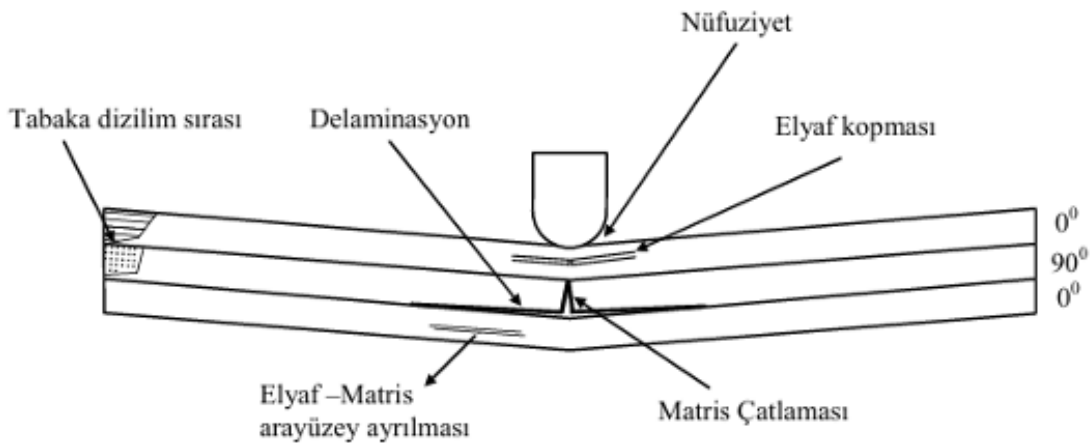
Yüksek hızlı darbe test yöntemleri, yüksek hızda hareket eden fakat düşük ağırlıklı parçaların cisimlere ya da malzemeler üzerindeki etkilerini test etmek için kullanılır. Split-Hopkinson basınç çubuğu ve basınçlı hava ile darbe testi bu test yöntemleri arasında bulunmaktadır. Basınçlı hava ile darbe testi, ağırlığı 250 gr' dan az ve hızı 100 m/s'den yüksek vurucular için kullanılabilir bir testtir. Split-Hopkinson basınçlı çubuk testi ise materyallerin değişik frekanslardaki dinamik davranışlarının araştırmak ve malzemedeki yüksek şekil değiştirme-hızı etkisini incelemek için sıklıkla uygulanan testtir (Abrate 1998).

3.9. Tabakalı Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasar Modları

Kompozit malzemeler darbe uygulanması sonucunda farklı hasar modları oluşur. Özellikle malzemeye yatay eksen (plaka veya elyafa dik yönde yapılan yükleme) boyunca herhangi bir takviye ile güçlendirilmediğinde malzeme ağır deformasyonlara uğrar. Bunun nedeni, takviye ve matris fazının kompozit malzemeye dikey yöndeki yüzey mukavim yapıda ancak kalınlık boyunca malzemenin zayıf olmasıdır. Kompozit malzemelerin darbe yüklerine verdiği tepki oldukça karmaşıktır. Bu tepki, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin bireysel özelliklerinin yanı sıra malzemenin yapılandırılmasına da bağlıdır. Ayrıca, darbe tepkisi çarpan cismin geometrisi, hızı ve kütlesi gibi faktörlerden de etkilenir. İfade edilen bu faktörler, enine uygulanan yüklemenin toplamda malzemede bıraktığı etkiyi bulmada önemlidir. Darbe uygulanması sırasında, vurucu kütle gözle fark edilemeyen ya da zayıf şekilde seçilebilen nüfuziyetinden daha belirgin hasarlara kadar farklı hasar modları ortaya çıkabilir. Düşük hızlı darbeler, yüzeyde gözle görülür bir hasar oluşturmayabilir. Ancak tabaka içerisinde matris fazında çatlak, tabakalar arası ayrılma ve elyafta kopma yaşanması gibi hasarlara

sebeptir. Deformasyonlar, malzemenin mukavemetinde ciddi bir düşüşe yol açar. Sertlikte düşme de olabilir ancak ihmal düzeyindedir. Tabakalar arasında oluşan kesme ve normal gerilmeler tabakalar arası yapışma mukavemetinin az olduğundan kaynaklı matriste kopmaların olduğu gerilmeler ile gerçekleşir. Darbe uygulanmasıyla birlikte malzemeye aktarılan enerji seviyesinin miktarı, malzeme bu enerjiyi emilebilmesi adına meydana gelecek hasar modlarını belirlemiştir (Ceyhun ve Turan 2003).

Kompozit malzemeye darbe uygulanması enerji seviyesinin artmasıyla tabakalar arası ayrılma ve elyaf hasarları ile devam eden süreçte çarpan kütleinin numuneye saplanarak sonunda da numunenin delinmesi sonucu gerçekleşir. Şekil 4'te, farklı hasar modları şematize edilmiş resmidir.



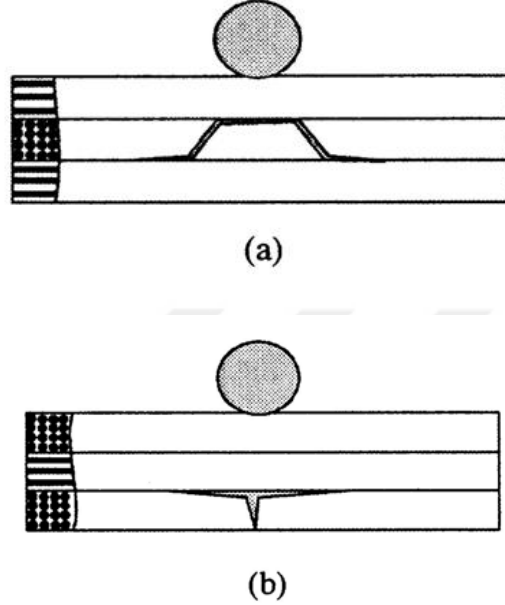
Şekil 4. Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006)

Üründe meydana gelen hasarların tespit edilmesi, yalnızca darbe olayını anlamak için değil, aynı zamanda yapının dayanıklılığı hakkında bilgi edinmekte son derece önem taşır. Hasar türleri arasındaki etkileşimi kavramak, hasarın oluşumunu ve ilerleyişini anlamak için kritik bir rol oynar.

3.9.1. Matris hasarı

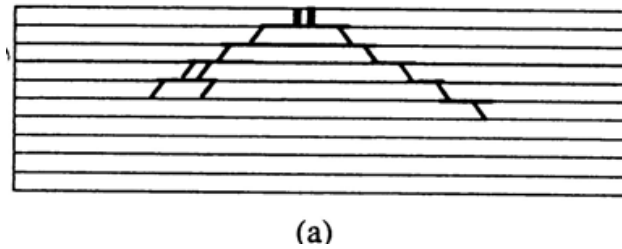
Matriste meydana gelen deformasyon, düşük hızlı darbe deney sonucunda ortaya çıkan birinci hasar türüdür. Darbe deneyinden sonra, genellikle deformasyonlar tahmin edilemeyecek kadar zor ve karışık bir durumda matriste çatlamlar meydana gelmiştir. Deformasyon matris çatlama ile başlayıp ardından tabaklar arasına yayılarak delaminasyona sebep olur. Matriste 2 çeşit çatlak oluşur; çekme kaynaklı çatlama ve

kayma kaynaklı çatlama (Şekil 5). Çekme kaynaklı çatlamlar, düzlemdeki normal gerilmeler sonucunda tabakanın enine kayma mukavemetinde artış olduğu zaman gerçekleşir. Kayma kaynaklı çatlamlar orta düzleme belli bir açıyla gelmesi sonucunda yatay eksenli gerilmeler sonucunda çatlakların oluşumunda önem atfetmektedir.

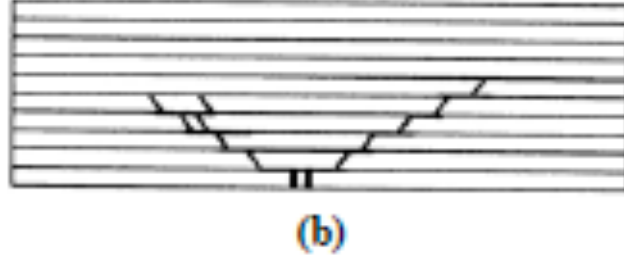


Şekil 5. Matris çatlaklarına ait iki tip çatlak oluşumu, (a) Çeki çatlağı, (b) Kayma çatlağı (Abrate 1998)

Tabakalı kalın kompozitlerde, vurucunun temas ettiği ilk katmanda oluşan yüksek yerel gerilmeler sebebiyle matris çatlakları meydana gelir. Hasarın yapısı, tepeden tabana ilerleyerek çam ağacı şeklinde bir görüntü oluşturur (Şekil 6a). Tabakalı ince kompozitlerde, en tabandaki katmanda matris çatlağına neden olan durum kompozitin arka tarafındaki eğilme ve gerilmelerdir. Oluşan bu durum ise delaminasyonları ve matris çatlaklarını meydana getirerek ters görünümlü çam ağacı görüntüsü oluşmasına neden olur (Şekil 7b) (Abrate 1998).



Şekil 6.a Hasarın üst tabakadan alt tabakaya doğru çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi,



Şekil 7. Hasarın alt tabakadan üst tabakaya tersine dönmüş çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi (Abrate 1998)

Bir kompozit malzemenin darbesi hasara yol açan başlangıç kinetik enerjisi, büyük ölçüde matrisin mekanik özelliklerinden etkilenir, ancak esasen elyafın özelliklerinden (örneğin tabakalandırma veya örgü/örgüsüz elyaf kullanımı) bağımsızdır Griffin (1987).

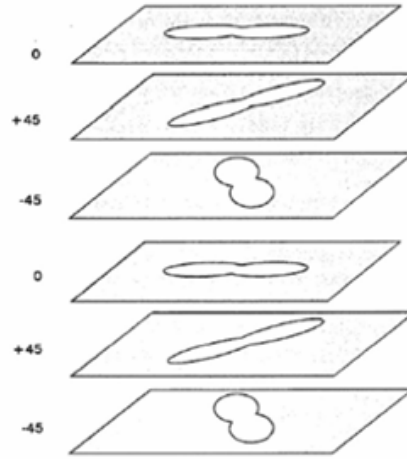
Takviye fazı 5 farklı şekilde ve matrisleri aynı olmak koşulu ile darbe deney uygulamaları yapılmıştır. Deneyler neticesinde ortaya çıkan veriler hasarda başlangıç enerji seviyesinin aynı olması ve hasarın matris-ağırlıklı olduğu gözlenmiştir. Ek olarak tabakalı polimer kompozitler ile ilgili çalışmalarda deformasyona uğramış kompozitlerin darbe performansı reçine sistemi ile malzemenin tokluk özelliği geliştirilmesinde önem atfetmektedir. Deneyler termoplastik matrisli kompozitlerin yüksek tokluk özelliği sergilediği bulunmuştur. (Dorey ve diğ. 1985).

Genel anlamda matrisi termoplastik olan kompozit malzemelerde termoset kompozitlere göre matris çatlaması kıyasla az olduğu görülmektedir. (Sierakowski ve Chaturvedi 1997).

3.9.2. Delaminasyon

Delaminasyonlar, matris ile takviye fazındaki yapışma mukavemetinin azalmasıyla birlikte tabakaların ayrılması anlamına gelir. Yapılan çalışmalar neticesinde tabakalar arası ayrılmanın farklı elyaf serim açılarına sahip plakalar arasında geldiği sonucuna varılmıştır. Bitişik olan iki elyaf aynı serim açısına sahip ise tabakalar arası ayrılma yaşanır. Tabakalı kompozit malzemelerde, plakalar arası farklı elyaf serim açılarından kaynaklı eğilme sertlikleri birbirinden farklı çıkmıştır. Tabakalar arası ayrılmanın nedenlerinden önemlisi, tabakaların farklı eğilme sertliği ve eğilmeden kaynaklı kesme etkileridir (Abrate 1998).

Kompozit malzeme üst yüzeyden hasara uygulanması ile farklı serim açıları ile malzemenin ara yüzeylerinde ayrılmayla yerfıstığına benzer bir şekilde yapılar meydana gelmiştir. Bu anlatıma uygun şematize edilmiş resim Şekil 8’de görülmektedir.



Şekil 8. Delaminasyon alanlarının elyaf yönlendirme açalarına göre şekilleri (Abrate 1998)

Tabakaların ayrılma başlangıcına yol açan kinetik enerjisinin başlangıç değerini belirlemek için farklı deney ve çalışmalar yapılması gerekmektedir. Ayrıca, oluşabilecek ayrılma türlerinin genellikle farklı olduğu ve bu şekillerin yönelimlerini belirlemenin oldukça güç olduğu unutulmamalıdır. Matris çatlakları ile delaminasyonlar arasında güçlü bir bağlantı bulunmaktadır. Delaminasyonlar, tabakalar arasındaki ara yüzey bölgelerinde oluşur. Enine darbeye maruz kalan $0^\circ/90^\circ/0^\circ$ tabakalarda, ayrılma ve matris fazında çatlama arasındaki etkileşime dikkat edildiğinde, yukarı katmanlarda oluşan eğimli çatlamlar iç kısımlara ulaştıklarında sona erdirilir ve plakaların birbirinden ayrılması şeklinde devam eder. Çatlakların iç kısımlara ulaştığında sona erdirilmesi, takviye fazının yönlendirilmesindeki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Bu ayrılma, orta kısımdaki enine çatlamanın etkisiyle yükü taşımada zorluk çeker ve düşey eğilme çatlaklarının artması ile, zorlanmamış en son yüzeyde delaminasyonu başlatır. Tabakalar arası ayrılma, matris çatlaklarının sebep olduğu yüksek düzeydeki düzlem dışından gelen hasar gerilmeleri ve iç kısımlarda plakalar arası kayma gerilmeleri nedeniyle Mod I olarak başlar. Tabakalar arası ayrılma boyutu, C-scan ultrasonik tarama cihazından ölçülen, deforme olmuş hasarlı alanlar belirlenir. Genel anlamda kompozit malzeme içindeki hasarı, tabakalar arası birkaç iç kısımda gözlenir ve tarama cihazından alınan gözlem verileri sonucunda bir düzlem üzerinde çıktı olarak alınır. Bir düzlemde alınan veriler ile

Bu çalışmaların sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki önemli noktalar öne çıkarılabilir:

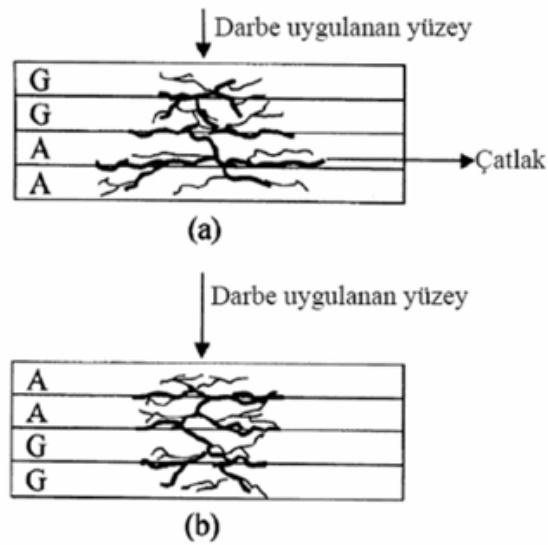
- Çekme ve basma mukavemetleri, darbe hasar büyüklüğü arttıkça düşer ve bu düşme, doğrusal olmayan bir ilişki gösterir.
- Delaminasyon hasarının boyutu, darbe seviyesinin artışıyla birlikte artar ve çarpan kütleinin hızının belirli bir sınır değerine ulaşarak malzemenin delinceye değin devam eder. 2 farklı sınır verisi sonuçlanmıştır: biri darbe seviyesi ile, diğeri ise darbe hızına bağlıdır. Bu sınır değerleri, gözlemlenebilir deformasyon adına küçük sınır ve en büyük deformasyon alanı adına üst bir sınır değerini tanımlar.
- Deformasyonun tespitiyle ilgili anlamlı detay, kompozit türüne ve geometrik koşullara bağlıdır. Bu faktörler arasında takviye, reçine ve takviye-reçine arasındaki yapışma mukavimliği, çatlama toleransı, kırılma tokluğu, elyaf dizilimi, plakalar arası bağlar, sınır koşulları, kompozite uygun enerji emilimi gibi unsurlar yer almaktadır.

3.9.3. Darbe ile elyaf hasarı

Kompozit malzemelerde darbe uygulanması ile fiberin kırılıp birbirinden ayrılması, önce matrisin darbeyi karşılayıp matris çatlaması ile tabakaların ayrılması ile bu gerçekleşir. Elyafın deformasyona uğraması, darbe hasarı ile deforme olan yüzeyde çarpan kütleinin malzemeye batması sonucunda oluştuğu gibi, hasara uğramayan bölgeler ise yüksek eğilme gerilimleri sebebi sonucu olmuş olabilir. Araştırılan çalışmalarda, elyaf türünün deformasyona uğraması matris fazı çatlaması ve tabakaların ayrılma evresinde bir etkisinin görülmediğini ortaya koymuştur. Ancak yüksek hızlı darbe uygulamalarında elyafın özelliği ve tabakaların serim sırası üretime göre önem arz etmektedir. Kompozit imalinde elyaf hasarının kontrol edilmesi aşamasında ve hasar eğiliminin geliştirilmesinde önemlidir (Park ve Jang, 2001).

Aramid elyaf/cam elyaf kompozit malzemelerde yapılan düşük hızlı ve yüksek hızlı darbe enerji seviyelerinde, kevlar ile imal edilmiş kompozitte hasar gören ve hasar görmeyen bölgelerde önemli hususlar ortaya çıkmıştır. Önemli hususlar gösterir ki, malzeme kalın imal edildiğindeki hasar, çarpan cisimin yüzeydeki bıraktığı etki merkeze yakın bölgelerde kısmi gerilmelerden kaynaklandığını gösterir. Açıkçası darbe ile tüm yüzeyin deformasyona uğramadığını anlarız. Deformasyon sebebiyle, bir alt tabaka

tarafından kısıtlandığı bir kısmının da enerji Emilimi ile yutulduğunu gösterir. Şöyle bir varsayım yaparsak aramid elyafın darbe uygulanan yüzeyin altında olması, aramid elyafın darbe sonucu enerjinin büyük çoğunluğunu emdiğini gösterir (Şekil 10'a). Eğer aramid elyaf tabakalar hasara ilk uğrayan bölgede bulunur alt tabakasında kırılğan yapıda olan cam elyaf olursa, cam elyaf aramid elyaf olan tabakada yayılacak olan deformasyonu sınırlama etkisi göstererek deformasyonun ilerlemesini engeller (Şekil 10 b).



Şekil 10. Darbe uygulamanın yüzeye göre hasar yayılışı, (a) Cam yüzeyden, (b) Aramid yüzeyden (Park ve Jang, 2001)

Elyaf ile takviye edilmiş tabakalı kompozitler arasında cam elyaf/epoksi, karbon elyaf/epoksi ve aramid elyaf /epoksi kompozit malzemelerin darbe deneyi sonucunda davranışlarına ilişkin ortaya çıkan bulgular aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Sierakowski ve Chaturvedi 1997);

- Yukarıda ifade edilen 2 li kompozit malzemelerin darbe deney sonucunda mukavemetteki düşme, sertlikteki azalmadan daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır.
- Kompozit malzemelerin deney yapılırken faktör olarak; elyafların yönelim sırası, kompozit çeşidi ve darbe deney hızıdır.
- Takviye fazının matris fazından ayrılması, matris fazının etkilenip fiberin kırılması ile ilgilidir. Tabakalar arasındaki ayrılma, elyaf-matris bağlarının yapışma dayanımı, elyafın kırılma şekliyle doğrudan ilişkilidir. Yukarıda ifade edilen kompozit

malzemeler kıyaslar isek; cam elyaf /epoksi> aramid elyaf/epoksi> karbon elyaf/epoksi şeklinde ifade edilir.

- Cam elyaf/epoksi reçine ve kevlar elyaf/epoksi reçine kompozit malzemeleri arasında, cam elyaf/epoksi reçine kompozit malzemelerin matris fazının kırılma yoğunluğu kevlar elyaf/epoksi kompozit malzemeye göre daha büyüktür.
- Yukarıda ifade edilen kompozit malzemeler için delinme dirençleri bakımından sıralama yapılırsa; kevlar elyaf /epoksi> karbon elyaf /epoksi> cam elyaf /epoksi şeklinde ifade edilir.

3.9.4. Elyaf-matris ara yüzey ayrılması

Takviye elemanı elyaf ile matris ara yüzeyindeki ayrılma hasarı düşük hızlı darbe sonucu kompozit plakanın verdiği tepkidir. Elyaf-matris ara yüzeyindeki ayrılma, matrisin önemi kompozit malzemedeki darbenin ilk matris karşıladığından dolayı elyafa yük aktarımının azalması yada yükün ortadan kaldırılması ile yapılabilir.

3.9.5. Nüfuziyet

Nüfuziyet, darbe uygulanması ile birlikte kütlenin malzemeye verdiği hasarı makro boyutta görülebilen ve kütlenin malzeme üzerindeki dalma yeteneği ya da delme miktarı olarak tarif edilebilir. Hacimsel olarak baktığımızda aynı elyafa sahip ama farklı boyutta olan malzemeler kıyas edildiğinde çarpan kütlenin delinme miktarı benzer olduğu çalışmalarda görülmüştür.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

4.1.1. Aramid elyaf

Aromatik poliamidin kısaltılarak ifade edilen elyaf mekanik olarak hacimsel anlamda düşük, yüksek dayanım gibi özelliklerin yanında maliyetin fazla ve üretimde yaşanan yetersiz yapışma dezavantaj olarak bilinir (Nunes & Silva, 2016).

Çalışmada; Kevlar 49 çeşidi ve para-aramid yapısıyla, 300 gr/m² fiber kumaş kullanılmıştır. Bölgesel yoğunluklu, twill örgülü, 0.3 mm kalınlıktadır. Ağırlığı, 300g/m² genişliği, 100cm dir.

Kevlar yüksek yoğunluklu ışınlar karşı ve su emilimi gibi dezavantaja sahip bir yapıdadır. Kevlar piyasada 2 tür çeşidi ile bulunup üstün rijitliğe sahip “keklar 49” ve düşük rijitliği ile bilinen “keklar 29” malzemeleridir. Uzay sanayinde, kolluk kuvvetleri birtakım üretimlerde (miğfer, çelik yelek) halat ve salmastra yapımında kullanılır (Kevlar,D),(Sulaiman,2017).

Aramid elyaf kumaşların sıradan makaslarla kesilmesi zordur kumaşa tahribat verebilir bunun için özel üretilmiş Kevlar-Aramid makasların kesim sırasında kullanılması gerekir.

Çalışmada 2*2Twill 300g/m² kumaş kullanılmıştır. Kumaşa ait özellikler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Fiber Malzeme	g/m ²	Dokuma	Atkı	Çözgü	Atkı Dağılımı	Çözgü Dağılımı	Genişlik (mm)
Aramid Elyaf	300	Twill	4,4 ends/cm	4,4 ends/cm	150g/m ²	150g/m ²	1000/1200

Tablo 5. Aramid elyaf kumaş özellikleri

4.1.2. Vinil ester reçine

Vinil ester matrisin, epoksi matrisin sağladığı avantajlara ek olarak, doymamış polyester reçinelerin rahat işlenebilirlik ve çabuk sertleşmesi gibi parametreler göz önünde bulunduracak şekilde tasarlanmıştır. Vinil esterler mekaniksel olarak dayanımlı ve yüksek kimyasal dayanımı önemli hususlardır. (Cam Elyaf, 2004).

Yoğunluk	1,044 g/cm ³
Kürleme Sıcaklığı	80 oC
Elastik Modülü	3200 MPa
Eğilme Dayanımı	160 MPa
Çekme Dayanımı	80 MPa

Tablo 6. Vinilestere ait teknik özellikleri

4.1.3. Karbon nanotüp

Karbon nanotüp tek ve birden fazla çok duvara sahip olarak iki kısımda ele alabiliriz. Çap olarak 3 ile 30 nm değerlerinde uzaması, birkaç cm büyüklüğündeki silindire benzeyen nano yapılarıdır. Çok duvarlı karbon nanotüp iç içe geçmesi ile dış çapının küçük ve sert olmasından kıyasla tek duvarlı karbon nanotüpe göre ayırt edici bir özellik taşır (Kukovecz vd., 2013).

Çok duvarlı karbon nanotüplerin yapısı itibari ile kompleks bir yapıda olup tek duvarlı ile çok farklı durumdadır. İki veya daha fazla yapının iç içe geçmesiyle oluşturulan bir yapıdır çok duvarlı karbon nanotüpler (Abdallah vd., 2020). Karbon nanotüp katkı malzemesi, EGE Nanotek Ltd. Şti' den temin edilmiştir.

Özellikler	Değer
Safılık	92%
Yoğunluk	2.4 g/cm ³
Dış çap	8-10 nm
İç çap	5-15 nm
Elektrik iletkenliği	98 S/cm

Tablo 7. Çok duvarlı karbon nanotüp'ün mekanik ve elektiriksel özellikleri

4.1.4. Zirkonya

Zirkonya nano katkısı kimyasal olarak zirkonyum elementi ile oksijen elementinin bağ kurmasıyla meydana gelir. Kimyasal bileşim sonucu termal olarak iletkenliğin düşük olması, çatlak direnci ve seramik malzemelerin başında gelen oda şartlarında dayanım olarak yüksek olması karşımıza çıkar. Zirkonya nano katkı malzemesi, EGE Nanotek Ltd. Şti' den temin edilmiştir.

Özellikler	Değer
Boyutu	20 nm
Safılık	99.80%
Morfoloji	Küresel
Yüzey alanı	20-60 m ² /g
Yoğunluk	5.89 g/cm ³

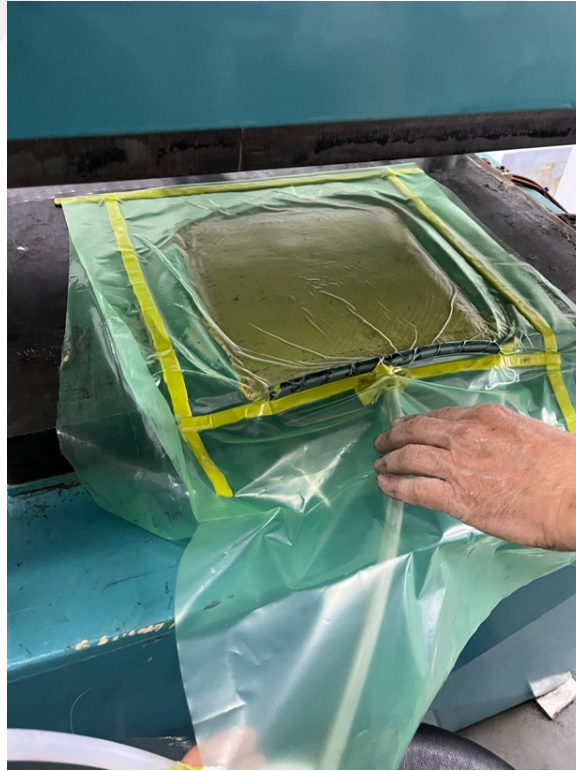
Tablo 8. Çalışmada kullanılan zirkonya'nın özellikleri

4.2. Yöntem

Aramid kumaş, 300 mm x 300 mm boyutlarında aramid makas ile kesilmiştir. Üretimde kullanılan vinilester reçine ağırlıkça %2 sertleştirici ile karıştırılarak el yatırma yöntemi için hazırlanmıştır. Üretime başlarken ilk önce vakum naylonu üzerine on kat gelecek şekilde saf kumaş serilerek ve katlar üzerine hazırlanmış olduğumuz sertleştirici vinilester reçine rulo fırça yardımıyla emdirilmiştir. Reçine sertleştirici miktarını üretime

başlamadan önce aramid kumaşlar için, aramid kumaşları tam bir şekilde ıslatacak reçinenin çalışması yapılmış ve bu çalışma sonucunda kumaş tam ıslanma miktarı 500 gr olarak tespit edilmiştir.

Üretim yapılırken sertleştiricili reçine rulo fırça ile uygulanmasında vinilester reçinenin jelleşmesini (bozulma) için, ortam sıcaklığı 20 °C ve herhangi bir hava akımına kapılmadan çalışma gerçekleştirilmiştir. Son kat olarak vakum naylonu kapatılarak 0.6 bar vakum altında sıcak pres uygulaması yapılmadan önce sıcak pres 30 °C sıcaklığa ısıtılmış vakum naylonuna alınan malzeme sıcak prese konulduktan itibaren 80 °C sıcaklık ve 5 Bar basınç uygulanarak 2 saat 80 °C sıcaklıkta malzeme kürlenme işlemine tabi tutulmuştur. Pres kapatılarak ve kaldırılarak 50 °C geldikten sonra fan yardımıyla soğutulmuştur. Kürlenme işlemi bittikten sonra presten çıkartılan numune kenarındaki çapaklar temizlenerek kıl testere ile ASTM-D 7136 standardı baz alınarak 100x150 mm boyutlarında kesilme işlemiyle darbe deney numunesi hazırlanmıştır. ASTM-D 3039 standardı baz alınarak 25x250 mm boyutlarında çekme testi için numuneler hazırlanmıştır. Saf numune yukarıda anlatıldığı gibi üretilmiştir.



Şekil 11. Sıcak pres vakum torbalama (açık hali)



Şekil 12. Sıcak pres vakum torbalama (kapalı hali)

Katkılı numune üretiminde, katkısız numune üretimine ek olarak belirlenen miktarlarda çok duvarlı karbon nano tüp ve zirkonya nano katkısını önce mekanik karıştırıcı ve ultrasonik karıştırma aşamaları uygulanmıştır. Ağırlıkça %3 ve %5 karbon nanotüp ve yine ağırlıkça %3 ve %5 zirkonya nano katkıları ayrı ayrı olarak 15 dk mekanik karıştırıcı ile karıştırılarak daha sonra 10 dk'lık periyodlar halinde 2 defa ultrasonik karıştırıcı uygulaması yapılmıştır. Ultrasonik karıştırıcı yapılırken malzeme kimyasal tepkimeye girerek ısınıyor. Bu durumu önlemek için buzlu su yardımı ile katkılı reçine 40 °C kadar soğutulmuştur. Ultrasonik karıştırıcı karıştırıcı işlemini yapmamızdaki maksat nano katkılarının reçine içerisinde homojen dağılmasını sağlamaktır. Hazırlanan katkılı reçine, katkısız numunedeki gibi katlar üzerine rulo fırça ile uygulanan işlem tatbik edilmiştir. Son olarak vakum naylonu içine alınarak sıcak presleme işlemi katkısız numunedeki işlem gibi yapılmış malzemenin kenarındaki çapaklar temizlenerek kıl testere ile darbe ve çekme numuneleri katkısız numunedeki gibi işlemler gibi yapılmıştır.



Şekil 13. Ultrasonik karıştırıcı (soğuk su ile)



Şekil 14. El yatırma yöntemi

4.3. Düşük Hızlı Darbe Testi

Darbe testi yerçekimine karşı bir etki uyandırarak ağırlık düşmesiyle birlikte, yatak sürtünmelerinin ihmal edilebilecek kadar az olduğu bir deney ünitesinde uygulanmıştır. Çarpma düzeneği yarım küre olup alt kesit ölçüsü 12 mm çapında ve kütlesi 5,6 kg dır. Kuvvetin malzeme üzerindeki değişimleri sensör yardımıyla milivolt birimi şeklinde okur. Sensörden gelen sinyaller ile bilgisayara çalışan veri kartına aktarılır. Çarpma düzeneği ve darbe numuneleri aralarındaki etki-tepki kuvvetin zamana göre değişmesi aşağıda NI Labview Signal Express yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

Aşağıdaki resimlerde deney seti ve düzenek gözükmektedir.



Şekil 15. Deney test düzeneği (Genel görünüş)



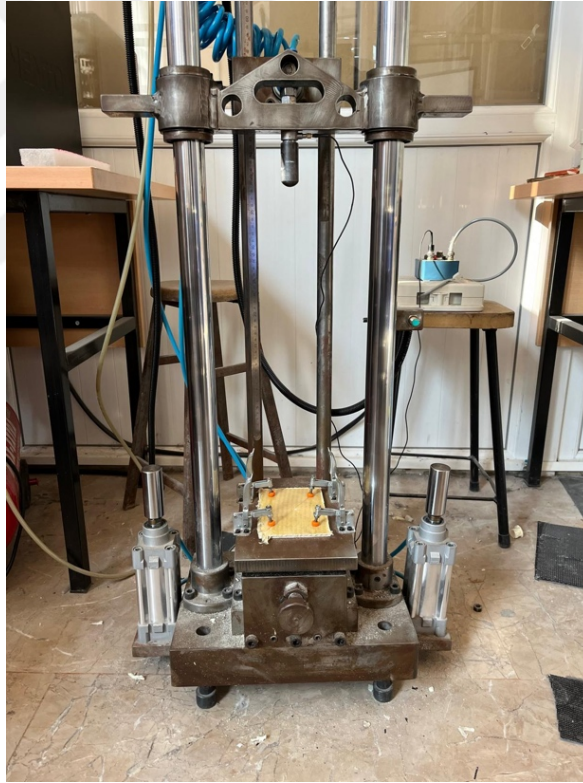
Şekil 16. Labview Signal Express yazılımı



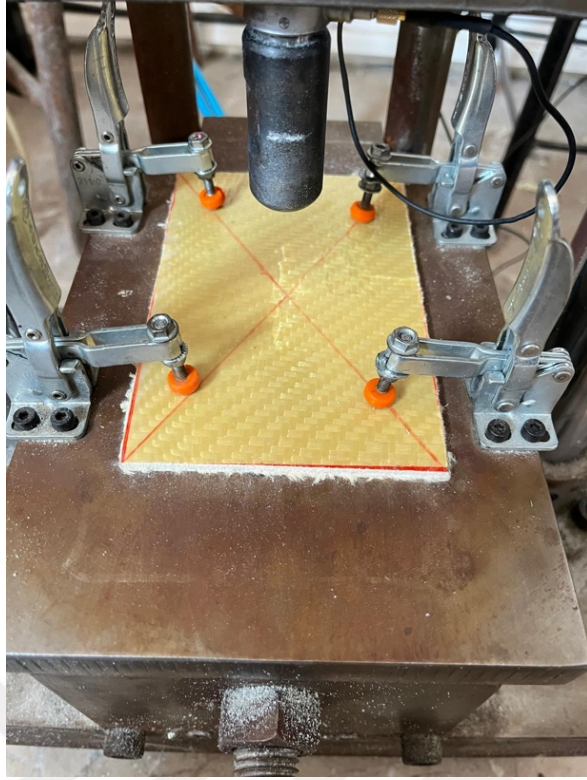
Şekil 17. Sensör algılayıcısı

Sistemin veri toplarken örnekleme hızı 25kHz dir. Testler, aynı içeriğe sahip iki deney numunesinden ayrı ayrı bir şekilde 15 ve 25 m/s olmak kaidesi ile saf ve dört adet farklı nano katkıya sahip numuneye uygulanarak on adet deney verileri elde edilmiştir. Veri kartından alınan verileri ASTM D-7136 standardında ifade edildiği üzere hesaplamalar yapılmıştır. Hızın artması ile zaman değişmesi fonksiyonuna bakıldığında ilk parametre olarak hız ve ikinci parametre olarakta yer değişimleri elde edilmiştir (Gemi vd., 2018).

Çarpma düzeneği numunelere uygulandığında, çarpma düzeneğinin kinetik enerjisinin bir kısmı malzemeye kalan kısmı geri tepme yani tepki enerjisi olarak geri alınır. Çarpa tertibatında deney yapılması esnasında darbenin ikinci defa numuneye temas etmesini engellemek için iki adet piston yardımı ile çarpa tertibatı durdurulur ve malzeme ikinci defaya deformasyona maruz kalmadan deney sonlandırılır.



Şekil 18. Darbe deneyi



Şekil 19. Darbe deneyi numune görüntüsü

4.4 Çekme Deneyi

Çekme testini tanımlarken malzemenin elastik ve plastik bölgedeki davranışlarını tespit etmek için sabit yük altında yapılır. Bu ifadeye uygun şekilde standartlar çerçevesinde uygun ölçülere göre hazırlanarak deney numunesi çekme test cihazına dikey eksen yönünde çeneler ile numune tutturularak kuvvet uygulanır.



Şekil 20. Çekme deney testi

Üstte ve altta bulunan çeneler tarafından numune zıt hareket edilerek kuvvet ve yer değiştirmeyi kayıt altına almasıyla (ASTM D3039/D3039M, 2017) deney yapılmaktadır.



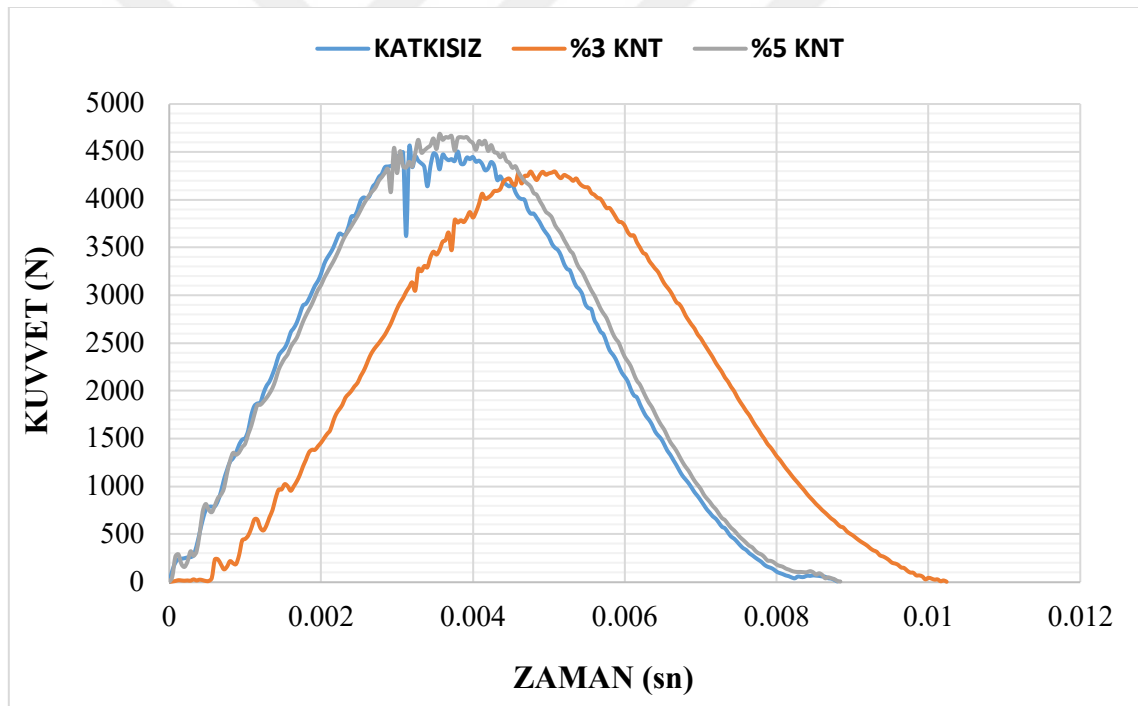
Şekil 21. Çekme deney testi numune görüntüsü

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

5.1. Düşük Hızlı Darbe Deney Grafikleri

5.1.1. 15J Enerji seviyesindeki darbe testi grafikleri

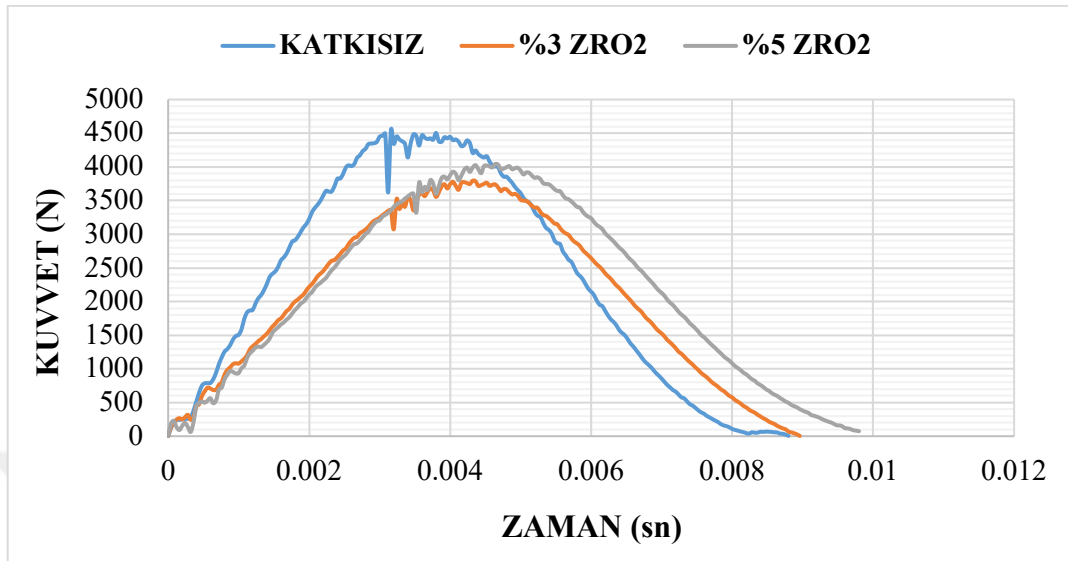
15J enerji uygulamasında ciddi fiber kırıkları oluşmasıyla darbe kuvveti maksimum da iken darbe sönümlenmesi başlamıştır. Ağırılıkça%3 knt katkılı kompozit malzemede düşük oranlı fiber kırıkları ve yüzey matris çatlakları gözlemlenmiştir. Ağırılıkça %5 knt katkısının mukavemet artışı için yeterli olmadığı grafikten anlaşılmaktadır. Fiber kırıkları enerjinin erken sönümlenmesine sebep olmuştur. Bu durum tablo 9' da görülmektedir.



Tablo 9. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Zaman Grafiği (15J)

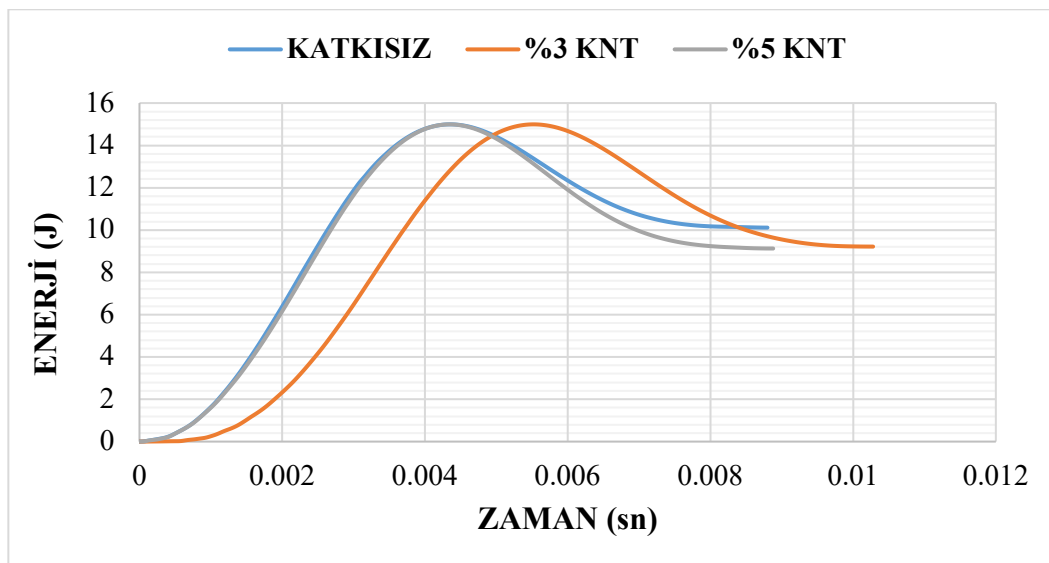
15J enerji uygulamasında saf numunede ciddi fiber kırıkları oluşmasıyla darbe kuvveti maksimum da iken darbe sönümlenmesi başlamıştır. Enerji seviyesi olan 15 J'de %3 zirkonya katkılı malzemede yüzey matris kırıkları meydana getirmiş herhangi bir fiber kırığına ciddi oranda sebep olmamıştır. 15J seviyesinde malzemenin absorbesi

katkılı numunede artmış ancak orta katmanlarda ciddi fiber kırıkları meydana gelmiş malzeme sünekleşmiştir. Bu durum tablo 10' da görülmektedir.



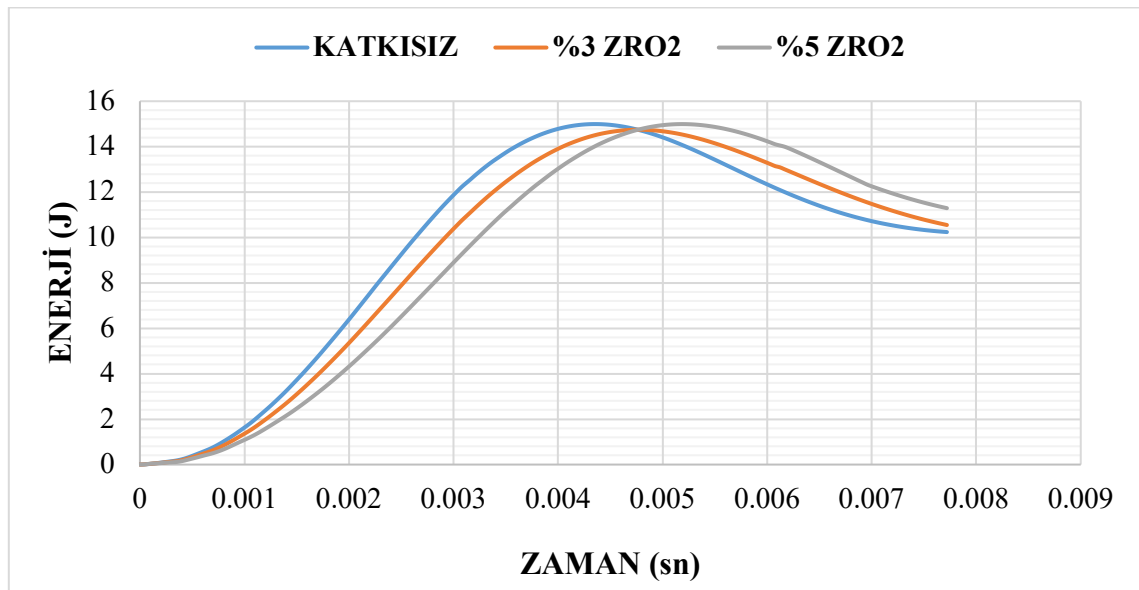
Tablo 10. Katkısız, %3 ZrO₂, %5 ZrO₂ Kuvvet-Zaman Grafiği (15J)

15J enerji seviyesinde ağırlıkça %5 lik karbon nanotüp katkısının darbe dayanımını azalttığı, geri tepme oranında artış sağlandığı enerji sönümlemeyi de azalttığı gözlemlenmektedir. 15J enerji seviyesinde ağırlıkça %3 lük karbon nanotüp katkısının enerji sönümlemesini arttırdığı ve malzemeye gevreklik kazandırdığı görülmektedir. Katkısız malzeme ile geri dönüş seviyelerinde farklılık göstermemektedir. Bu durum tablo 11' de görülmektedir.



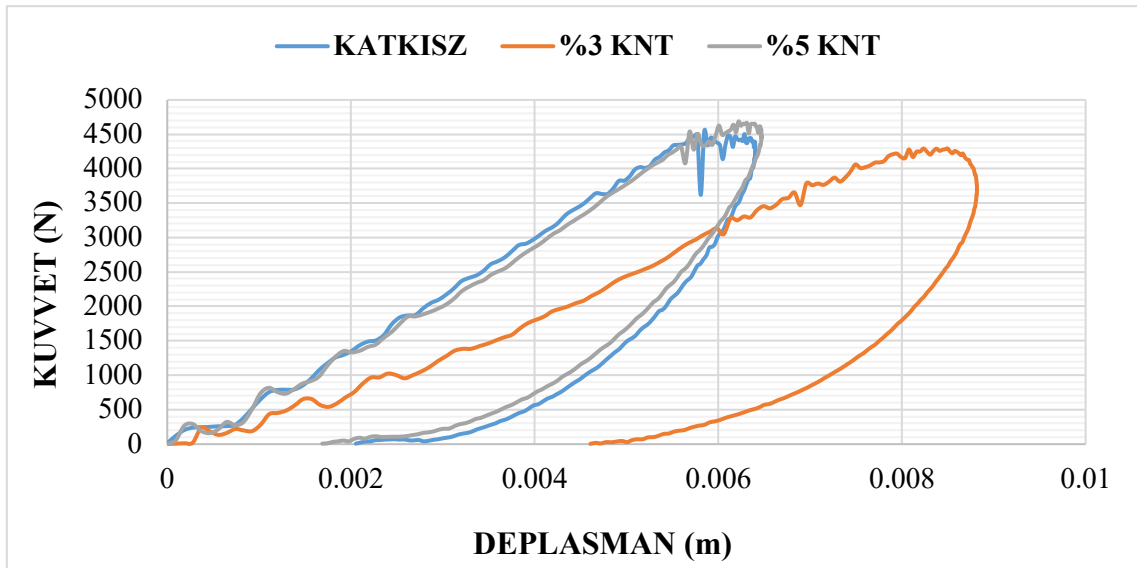
Tablo 11. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Enerji-Zaman Grafiği (15J)

Ağırlıkça %3 zirkonya katkılı numune 15J enerji seviyesinde darbe dayanımını arttırdığı enerji sönümlemede kısmen artış geri tepme oranında düşüş sağlandığı görülmektedir. Ağırlıkça %3 zirkonya katkısı katkısız malzemeye göre enerji seviyesinde düşme gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %5 zirkonya katkılı numune 15J enerji seviyesinde darbe dayanımını arttırdığı enerji sönümlemede kısmen artış geri tepme oranında düşüş sağlandığı görülmektedir. Bu durum tablo 12' de görülmektedir.



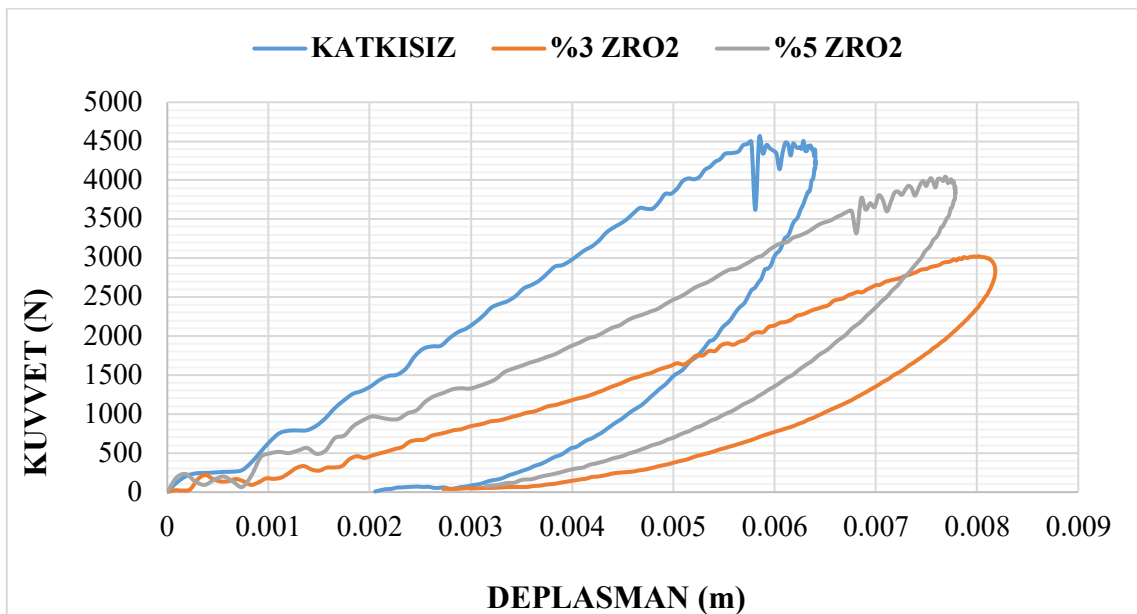
Tablo 12. Katkısız, %3 ZrO₂, %5 ZrO₂ Enerji-Zaman Grafiği (15J)

15J enerji seviyesinde ağırlıkça %3 karbon nanotüp katkılı kompozit malzemede mukavemet olarak artış görülmemiş ama ani matris ve fiber kırıkların azalmasında etkili olmuştur. Ağırlıkça %5 karbon nanotüp katkılı numunede yüzeysel matris kırılmalar ve fiber kırılmaları olurken katkısız numuneye göre mukavemette ciddi bir değişme sağlanmamıştır. Bu durum tablo 13'te görülmektedir.



Tablo 13. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Deplasman Grafiği (15J)

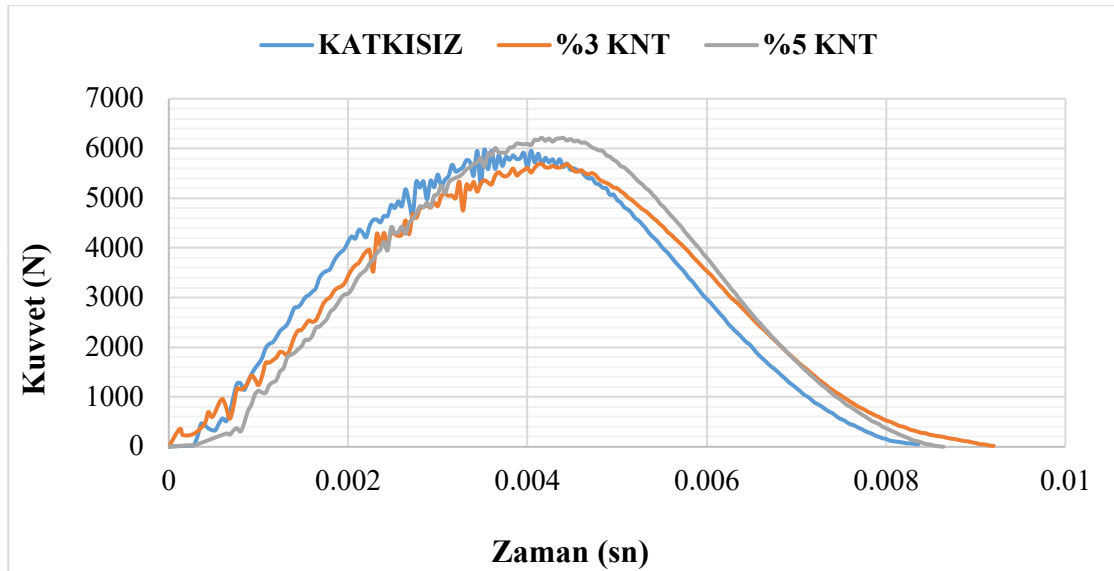
15J enerji seviyesinde ağırlıkça %3 zirkonya katkılı malzeme katkısız malzemeye nazaran daha dengeli bir halde olduğu yüzeysel matris ve fiber kırılmaları görüldüğü aynı zamanda katkısız numuneye göre daha az mukavim yapıda ve katkının malzemeye süneklik kazandırdığı gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %5 zirkonya katkılı numunede, 15J enerji uygulamasında ani matris kırılmaları ve fiber kırıkları oluşurken zirkonya mukavemetinde düşüş, süneklikte artış sağlamasında etkili olmuştur. Bu durum tablo 14'te görülmektedir.



Tablo 14. Katkısız, %3 ZrO₂, %5 ZrO₂ Kuvvet-Deplasman Grafiği (15J)

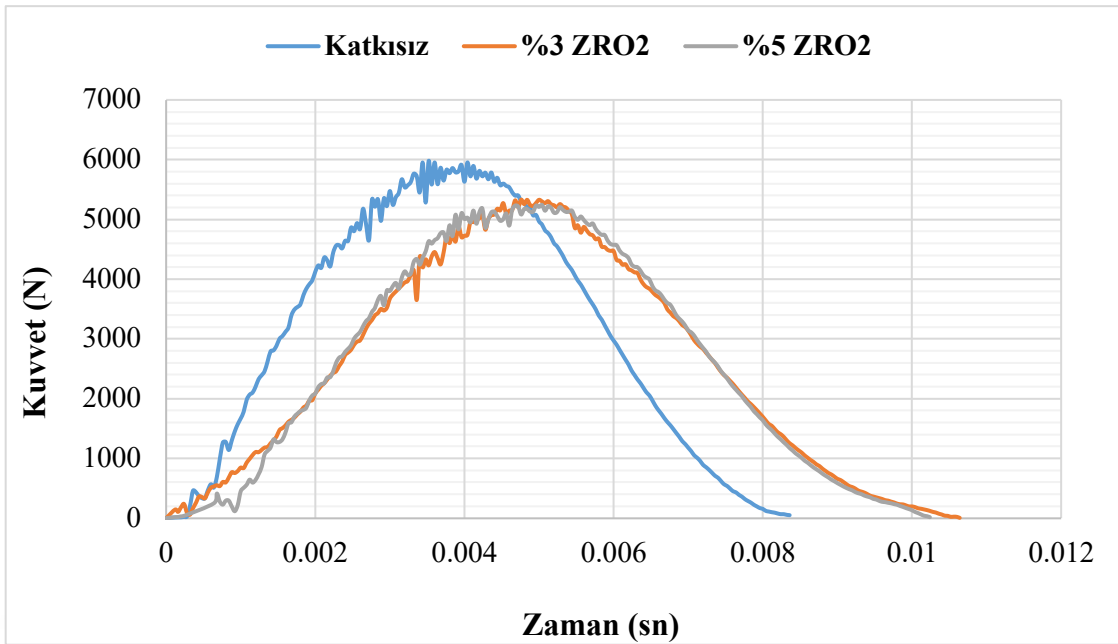
5.1.2. 25J Enerji seviyesindeki darbe testi grafikleri

Enerji seviyesi arttırıldığında yüzey fiber kırıkları ve matris kırıklarıyla beraber delaminasyon artmaktadır. Ağırlıkça %5 karbon takviyesi malzemenin mukavemetini ve enerji absorbe etme kabiliyetini arttırmıştır. Yüzey matris kırıkları seviyesinin düşmesi ağırlıkça %3 karbon takviyesinin bir sonucudur. Bu durum tablo 15’te görülmektedir.



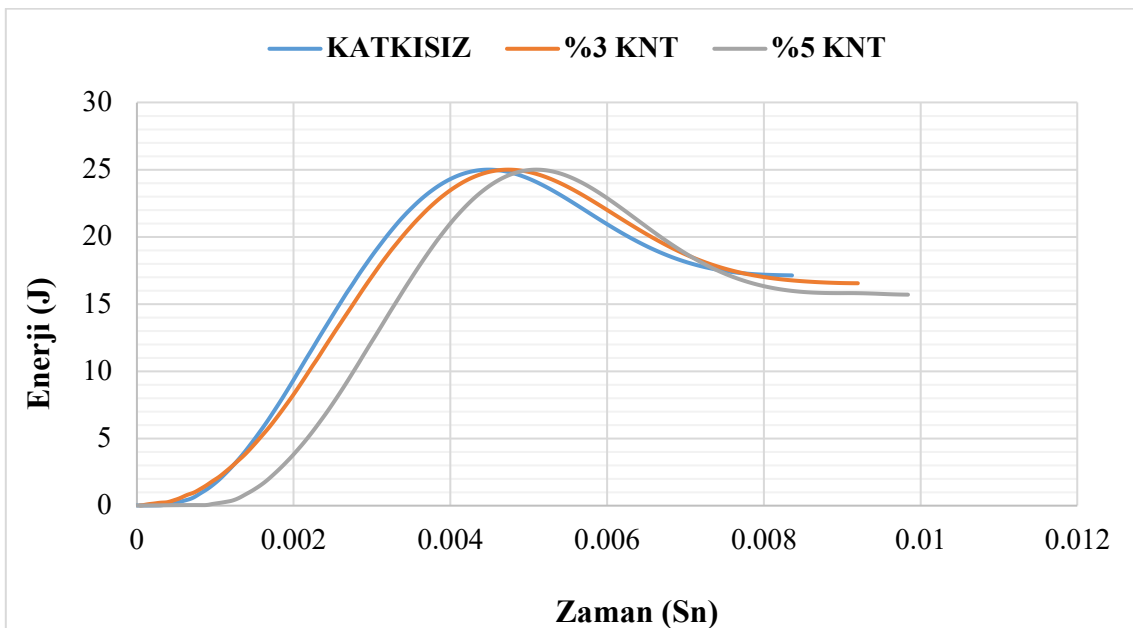
Tablo 15. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Zaman Grafiği (25J)

Şekilde ve grafikte gözüktüğü üzere Vinil ester reçineli aramid kumaş kompozit malzeme oldukça stabil kısmi yüzey matris kırıkları gösteren dengeli bir hasar moduna sahiptir. Şekilde daire içinde belirtilen kısımlarda matris kırıkları gözükmemektedir. İlk enerji boşalması yüzey fiber kırıkları sayesinde gerçekleşmiştir. Darbe enerjisinin sönmülmesinde dengeli bir enerji boşalması gerçekleşmiştir. Ağırlıkça %3 zirkonya katkısının darbe mukavemetine etkisi olmadığını ancak enerji sönmülmede süneklik etkisi oluşturduğunu grafikten görmekteyiz. İntra-laminer yüzeylerde delaminasyon ve fiber kırıklarının gözlemlendiği görülmektedir. Ağırlıkça %5 zirkonya Fiber kırıkları ve delaminasyonlar gösteriyor ki herhangi bir mukavemet artışı sağlamamıştır. Ancak darbe sönmülme kabiliyeti artmıştır. Bu durum tablo 16’da görülmektedir.



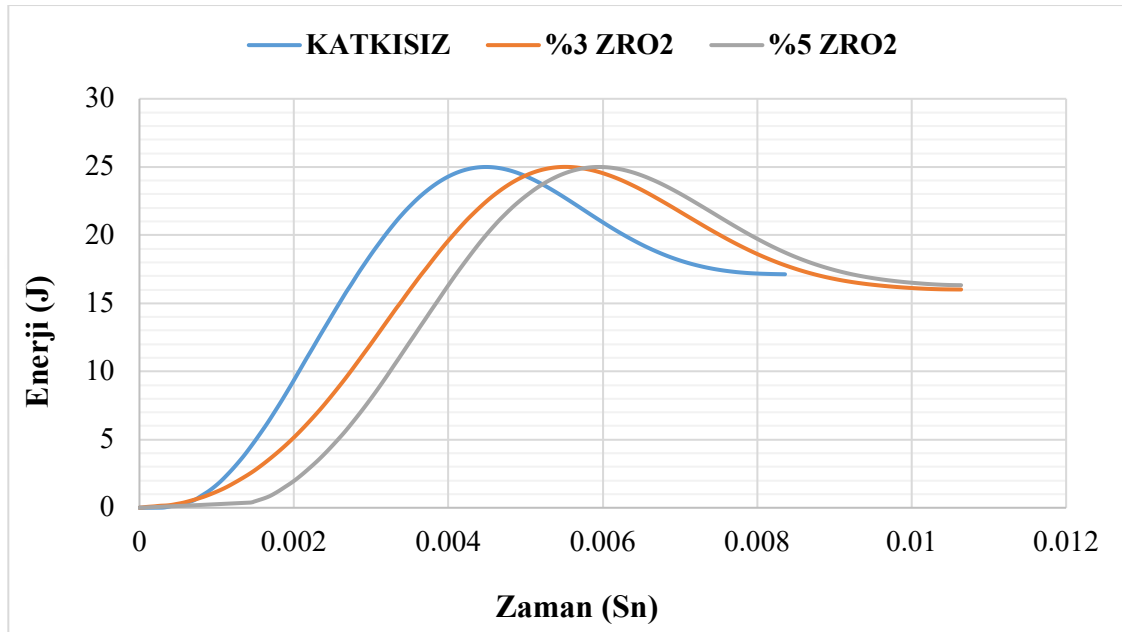
Tablo 16. Katkısız, %3 ZrO₂, %5 ZrO₂ Kuvvet-Zaman Grafiği (25J)

25J enerji seviyesinde enerji sönümlemede ağırlıkça %3 karbon nano tüp katkısı açık bir şekilde görülmektedir ancak geri tepme oranlarında herhangi bir değişiklik olmamıştır. 25J enerji seviyesinde enerji sönümlemede ağırlıkça %5 karbon nano tüp katkısı açık bir şekilde görülmektedir ancak geri tepme oranlarında herhangi bir değişiklik olmamıştır. Ağırlıkça %5 karbon nano tüp enerji sönümlemede iyileşme sağlanmıştır. Bu durum tablo 17’de görülmektedir.



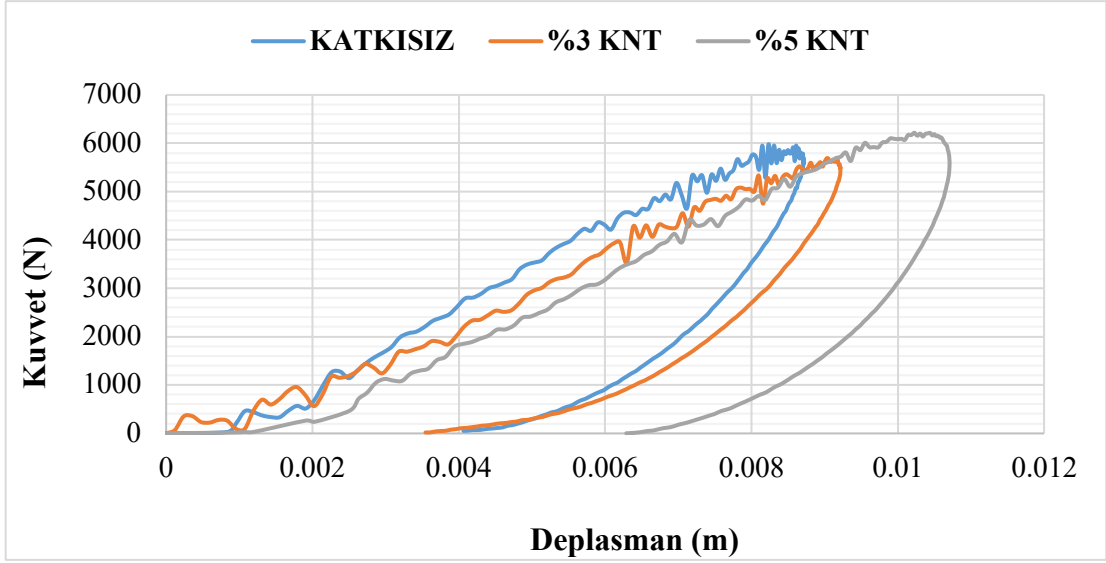
Tablo 17. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Enerji-Zaman Grafiği (25J)

25J enerji seviyesinde ağırlıkça %3 zirkonya katkısı malzemenin sünekliliğinde artış göstermiş aynı zamanda enerji sönümlemenin iyileşmesinde de etkisi olmuştur. 25J enerji seviyesinde ağırlıkça %5 zirkonya katkısı malzemenin sünekliliğinde artış göstermiş ağırlıkça %5 zirkonya aynı zamanda enerji sönümlemenin iyileşmesinde de etkisi olmuştur. Bu durum tablo 18’de görülmektedir.



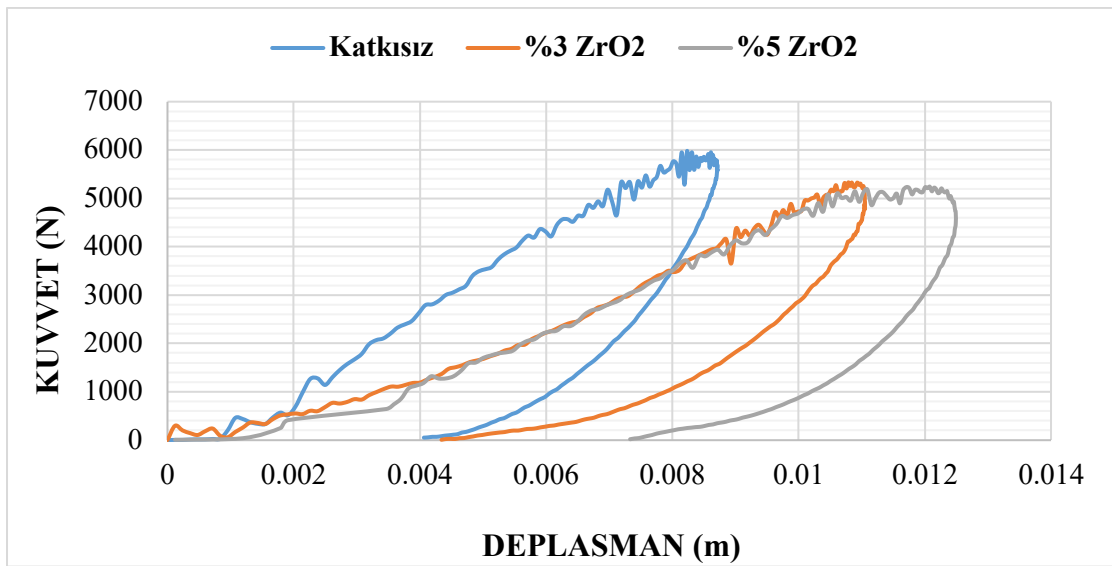
Tablo 18. Katkısız, %3 ZrO₂, %5 ZrO₂ Enerji-Zaman Grafiği (25J)

25J seviyesinde ise; katkısız numune, önemli matris kırılmaları ve kısmi fiber kırılmaları ile 6000 N kuvvete dayanım göstermiş ve ani gerçekleşen fiber kırılmaları ile hasar meydana gelmiştir. Bu durum katkısız numunenin bu enerji seviyesinde, gevrek durum gösterdiği sonucuna varılmıştır. Ağırlıkça %3 karbon nanotüp katkısı ile malzemeye gevreklik kazandırarak ani matris kırılmaları ve fiber kırılmasıyla birlikte mukavemette kısmi düşüş, fakat deplasmanının daha geç gerçekleşmesi ve geri tepme enerjisinin daha erken oluştuğunu göstermektedir. Ağırlıkça %5 KNT ilavesi hem malzeme mukavemetini hem malzeme stabilizasyonunu arttırmış ve kalıcı deplasman katkısız numune ile kısmen yakın seviyelerde seyretmiştir. Bu durum tablo 19’da görülmektedir.



Tablo 19. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Kuvvet-Deplasman Grafiği (25J)

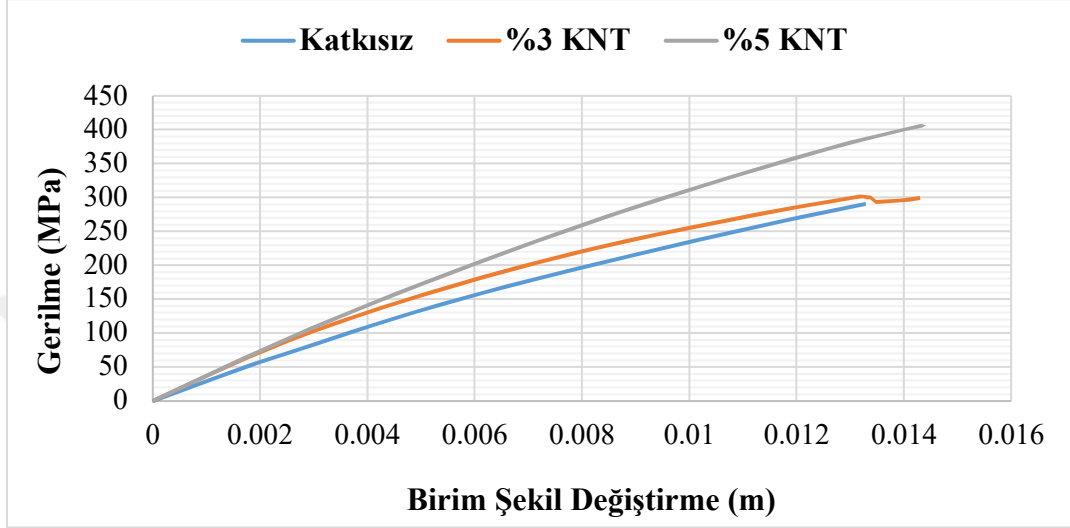
25J enerji seviyesinde ağırlıkça %3 zirkonya katkılı numunede matris çatlakları ve fiber kırılmaları meydana gelirken mukavemette düşüş sağlanmış deplasman seviyelerinde kısmen aynı seviyede gerçekleşmiştir. Katkısız numunede ise ani matris kırılmaları ile 4000 N değerinden itibaren ciddi fiber kırılmaları yaşanmıştır. Katkısız numune katkılı numuneye göre daha mukavim bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Ağırlıkça %5 zirkonya katkısı ise malzemede matris kırıkları ile 3000 N üzerinde fiber kırıkları oluşurken mukavemette düşüş görülmüş, malzeme elastik davranış göstermiştir. Bu durum tablo 20’de görülmektedir.



Tablo 20. Katkısız, %3 ZrO₂, %5 ZrO₂ Kuvvet-Deplasman Grafiği (25J)

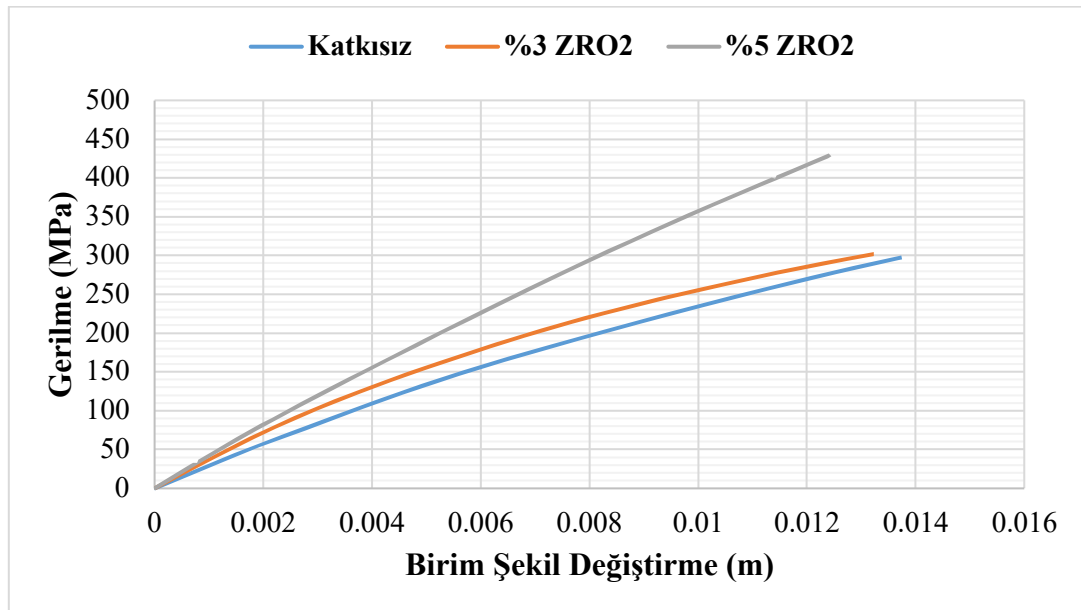
5.2. Çekme Deneyi

Grafikten görüleceği üzere ağırlıkça %3 oranındaki knt takviyesi herhangi bir dayanım artışı sağlamamaktadır. Takviye sınır oranı ağırlıkça %3 ve üzeri olmalıdır. Bu durum tablo 21’de gözlemleyebiliriz.



Tablo 21. Katkısız, %3 KNT, %5 KNT Çekme Deneyi Grafiği

Zirkonya takviyesinde ise malzeme takviye oranı yine ağırlıkça %3 ün üzerinde olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu durum tablo 22’de gözlemleyebiliriz.

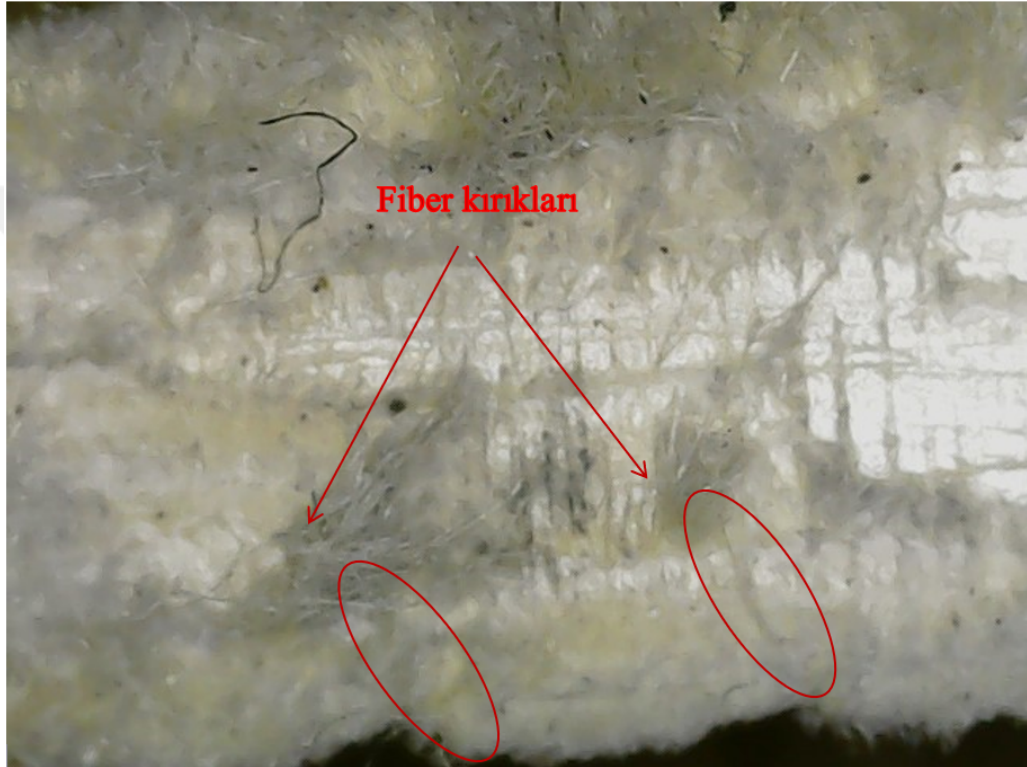


Tablo 22. Katkısız, %3 ZrO2, %5 ZrO2 Çekme Deneyi Grafiği

5.3. Darbe Hasar Görüntüleri

5.3.1. 15J Enerji seviyesindeki katkısız malzeme hasar görüntüsü

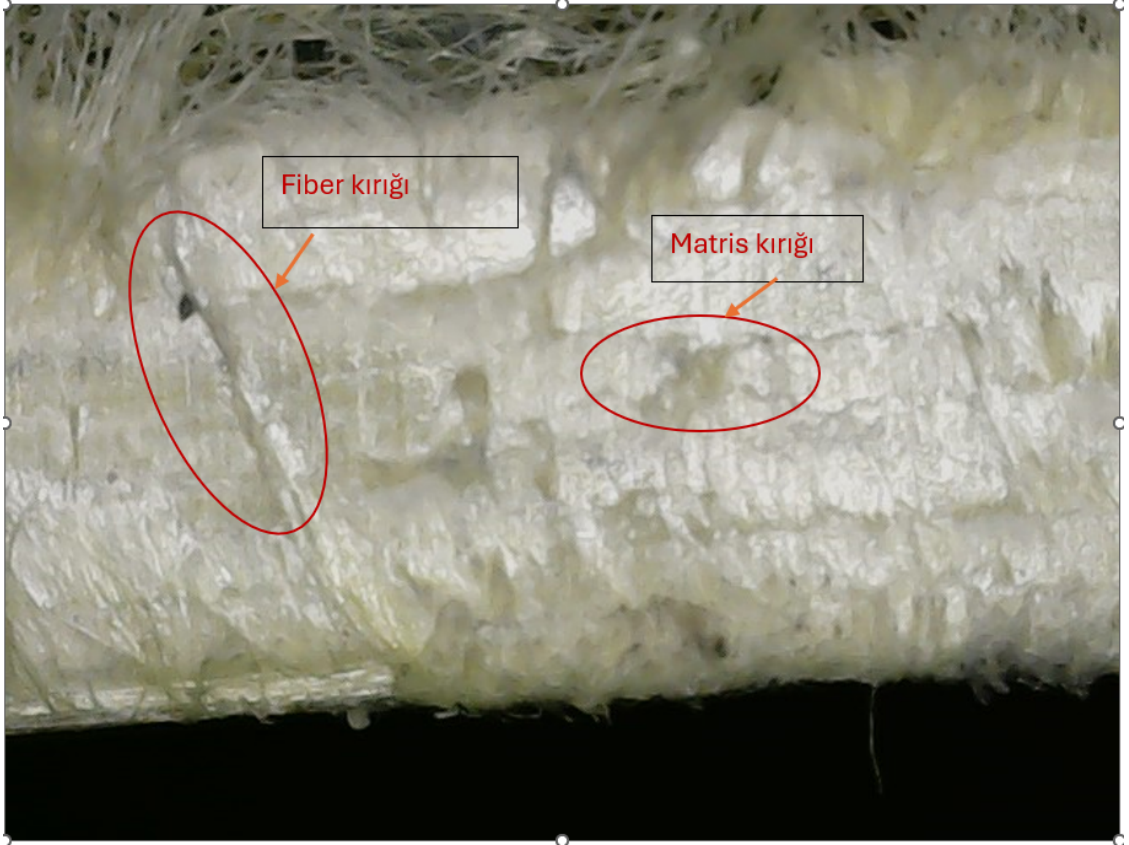
Saf vinilester reçine matrisli ve tabakalı aramid kompozit malzeme 15J'Jeki hasar görüntüsün de kısmi delaminasyon ve fiber kırıkları oluşmuştur. Şekil 22' de makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.



Şekil 22. 15J-Katkısız Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.2. 15J Enerji seviyesindeki %3 Karbon nanotüp katkılı malzeme hasar görüntüsü

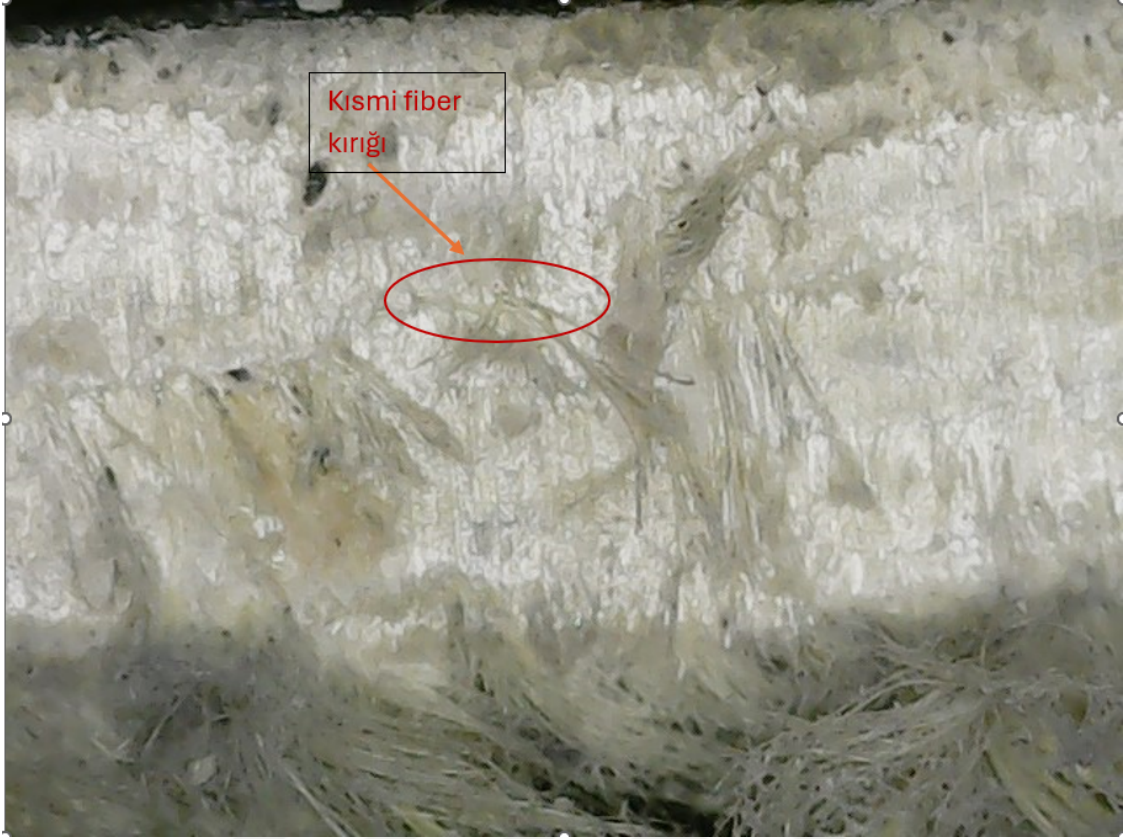
Enerji seviyesi 15J olarak uygulandığında matris kırıkları ile başlayıp fiber kırıkları ile malzeme deformasyona uğramıştır. Katkısız numune ile kıyas yapıldığında malzeme daha gevrek davranmıştır. Enerji seviyesi arttığı zaman hasar mekanizmaları da farklılık gösterecektir. Şekil 23' te makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.



Şekil 23. 15j-%3 KNT Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.3. 15J Enerji seviyesindeki %5 Karbon nanotüp katkılı malzeme hasar görüntüsü

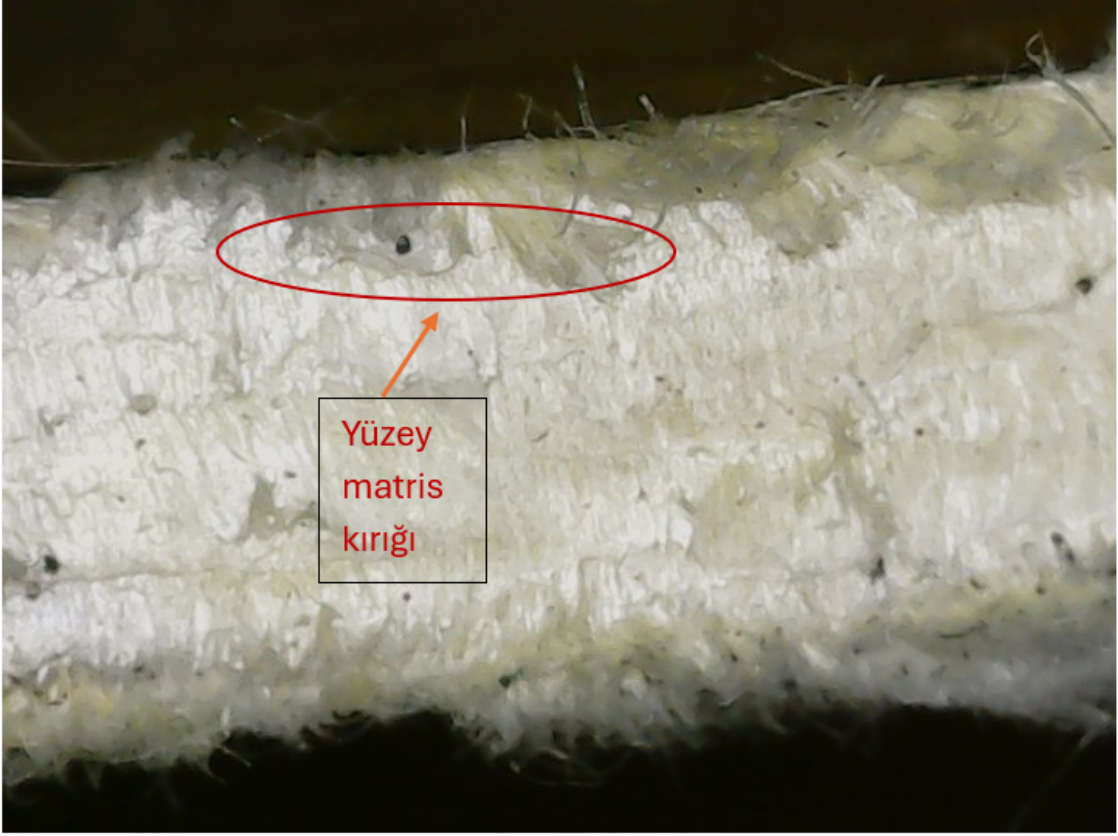
Enerji seviyesi 15J olarak uygulandığında nano katkını ağırlıkça %5'e çıkarılmasıyla kısmi fiber kırıkları ile malzeme kısmi deformasyona uğramıştır. Ağırlıkça %3 nano katkılı malzeme ile kıyas yapıldığında malzeme daha stabil davranmıştır. Nano katkının artmasıyla malzeme sağlamlık kazandığı sonucuna varılabilir. Şekil 24' te makro görüntüleriyle bu durum gösterilmektedir.



Şekil 24. 15J-%5 KNT Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.4. 15J Enerji seviyesindeki %3 Zirkonya nanopartikül katkı malzeme hasar görüntüsü

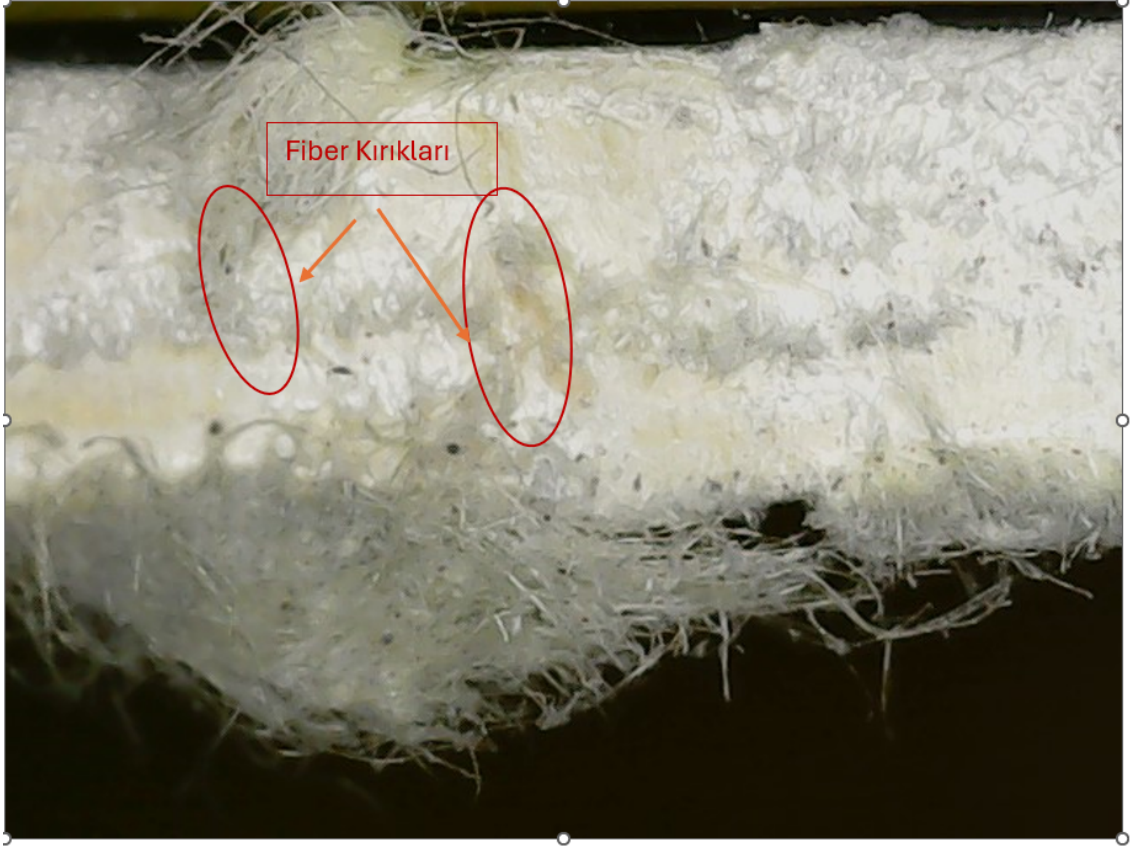
Ağırlıkça %3 zirkonya katkısı malzemeye süneklik kazandırarak enerji seviyesi 15J olarak uygulandığında yüzey matris kırıkları görülmüştür. Şekil 25' te makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.



Şekil 25. 15J-%3 ZrO₂ Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.5. 15J Enerji seviyesindeki %5 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme hasar görüntüsü

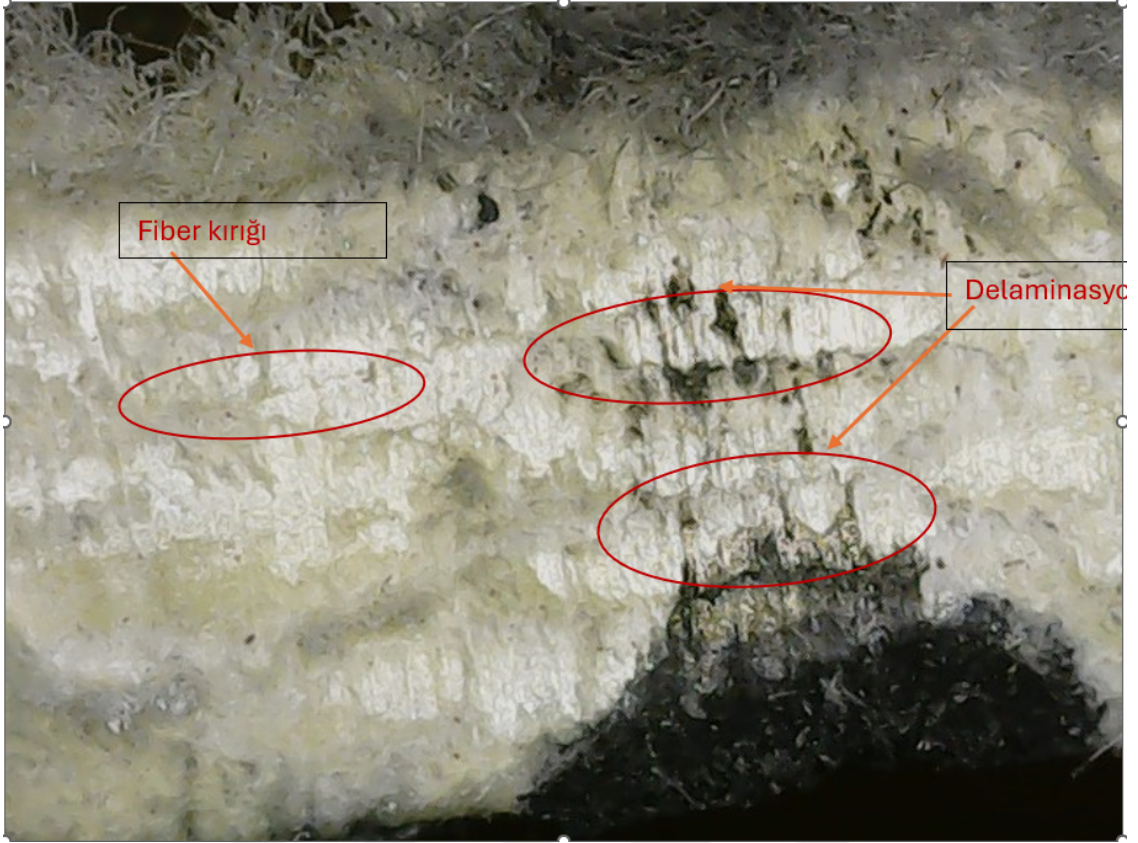
Ağırlıkça %5 zirkonya katkısı malzeme darbe enerji emilimi ağırlıkça %3 zirkonya katkısına göre daha fazla olmuştur. Fiber kırıkları iç yapıda görülmüştür. Şekil 26' da makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.



Şekil 26. 15J-%5 ZrO₂ Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.6. 25J Enerji seviyesindeki katkısız malzeme hasar görüntüsü

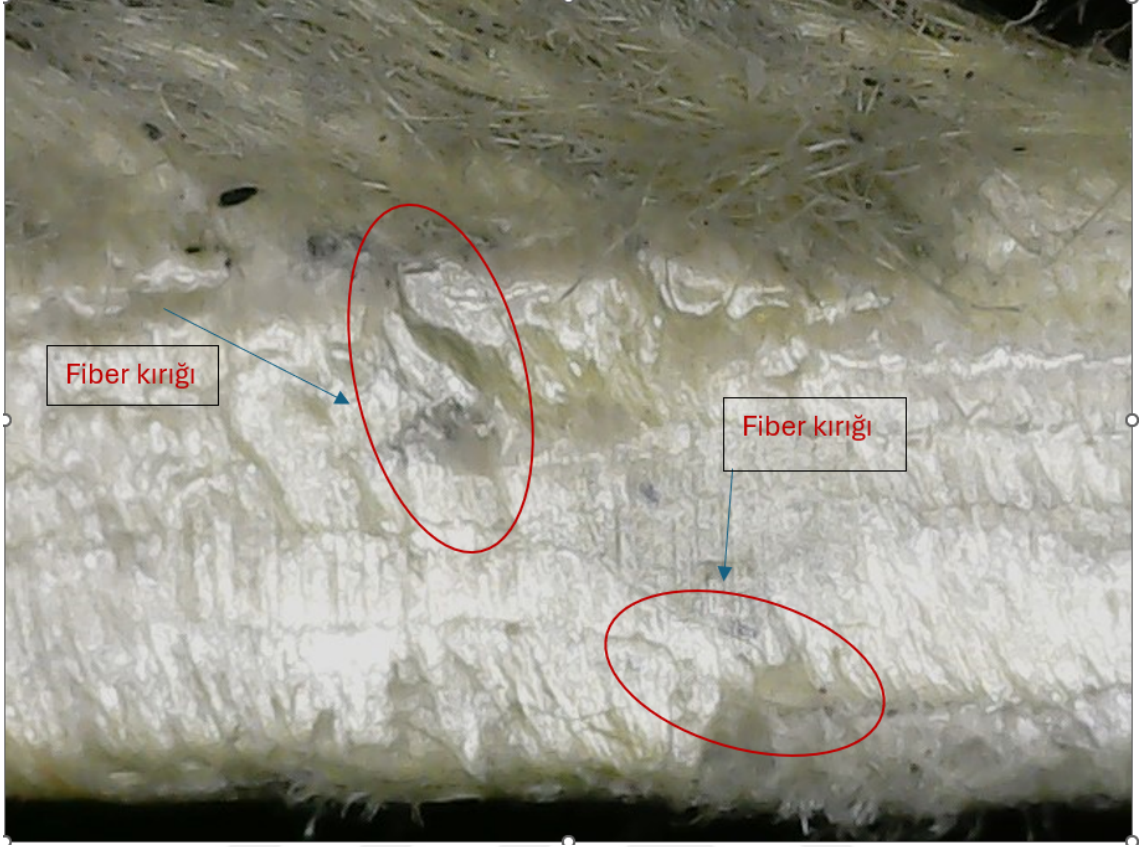
Enerji seviyesi 25J olarak gerçekleştirildiğinde fiber kırıkları ve malzemenin iç kısımlarında tabakalar arası ayrılma görülmüştür. 15J enerji seviyesinde katkısız numune ile kıyas yapıldığında malzemede deformasyon artmıştır. Şekil 27' de makro görüntüleriyle bu durum görmekteyiz.



Şekil 27. 25J-Katkısız Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.7. 25J Enerji seviyesindeki %3 Karbon nanotüp katkılı malzeme hasar görüntüsü

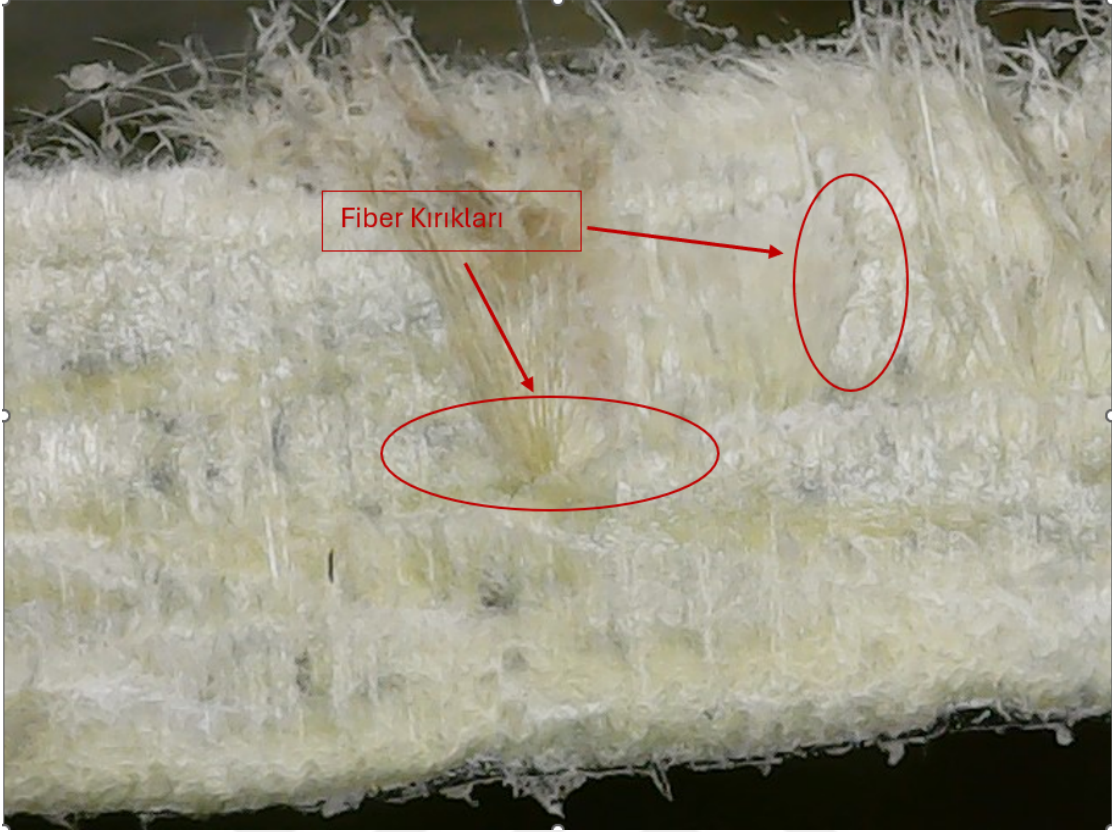
Enerji seviyesi 25J olarak gerçekleştirildiğinde fiber kırıklarıyla birlikte nano katkının etkisi sağlamlık olarak gözükmemektedir. Şekil 28' de makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.



Şekil 28. 25J-%3 Karbon Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.8. 25J Enerji seviyesindeki %5 Karbon nanotüp katkı malzeme hasar görüntüsü

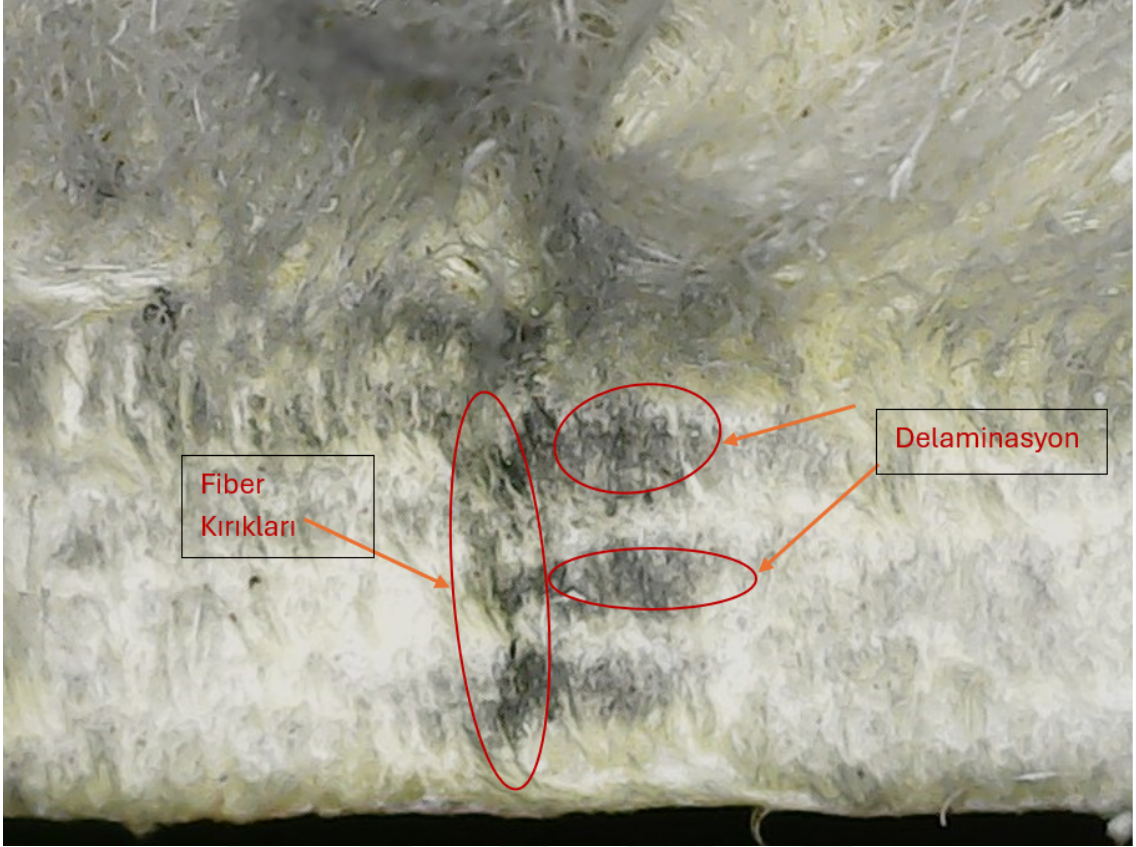
Enerji seviyesi 25J olarak gerçekleştirildiğinde fiber kırıkları görülmektedir. Ağırlıkça %5 karbon nanotüp katkının etkisi hafif fiber kırıkları şeklinde olurken, ağırlıkça %3 nano katkıdan daha fazla dayanım gerçekleştirdiği hasar görüntüsünde açık bir şekilde görülmüştür. Şekil 29' da makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.



Şekil 29. 25J-%5 Karbon Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.9. 25J Enerji seviyesindeki %3 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme hasar görüntüsü

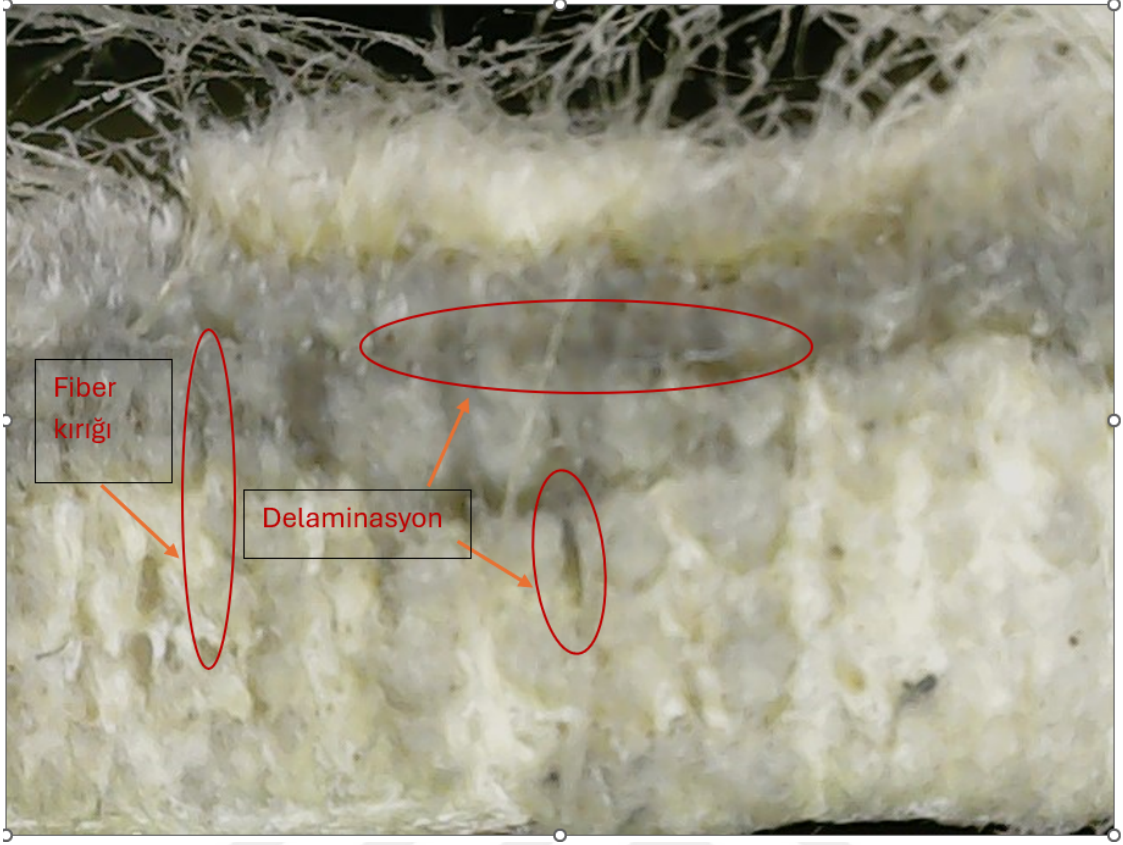
Ağırlıkça %3 zirkonya katkısı 25J darbe enerjisi malzemeye herhangi bir etkisi görülmemiştir. Malzemede darbe enerjisinin 25J olarak uygulanmasıyla fiber kırıkları ve tabakalar arası ayrılmalar gözükmemektedir. Şekil 30' da makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.



Şekil 30. 25J-%3 Zirkonya Darbe Hasar Görüntüsü

5.3.10. 25J Enerji seviyesindeki %5 Zirkonya nanopartikül katkı malzeme hasar görüntüsü

25J seviyesinde ağırlıkça %5 zirkonya katkısı malzemenin dayanımında bir etkisi görülmez iken darbenin malzemedeki deformasyon etkileri fiber kırıkları ve delaminasyon şeklinde oluşmuştur. Şekil 31' de makro görüntüleriyle bu durum ifade etmektedir.

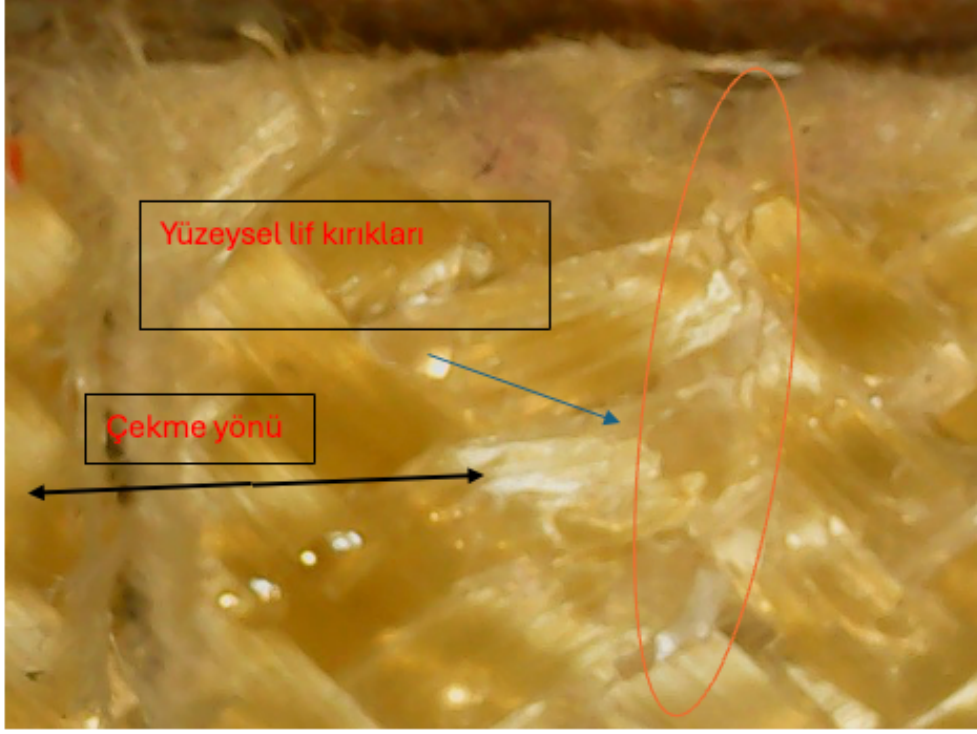


Şekil 31. 25J-%5 Zirkonya Darbe Hasar Görüntüsü

5.4 Çekme Hasar Görüntüleri

5.4.1. Katkısız malzeme çekme hasar görüntüleri

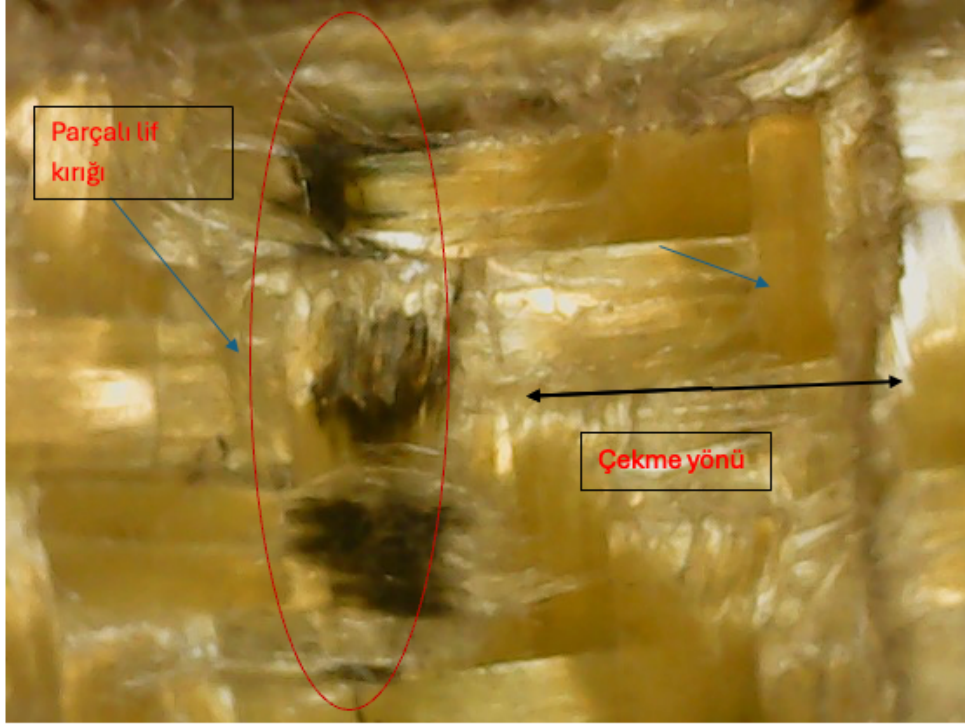
Çekme deney sonucunda yüzeysel lif kırıkları yoğun bir şekilde görülmektedir. Lifli kırık miktarı azdır. Çekme testi sonuçları makro görüntüleri Şekil 32 'de görülmektedir.



Şekil 32. Katkısız Çekme Hasar Görüntüleri

5.4.2. %3 Karbon nanotüp katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü

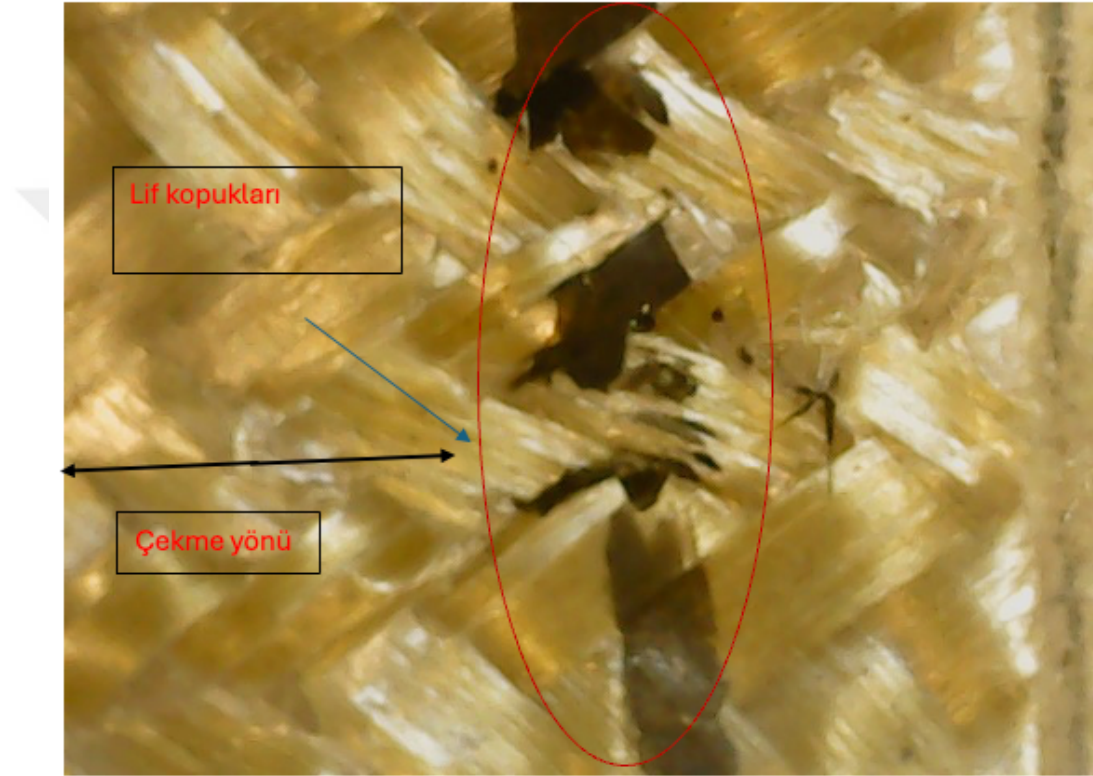
Ağırlıkça %3 Knt katkısı ile hem çekme kuvvetinde bir artış hem de lif kopmalarında kumaş yapıdan dolayı çekme yönündeki hasar lifsel olmuştur. Çekme testi sonuçlarını makro görüntüleri Şekil 33 'te görülmektedir.



Şekil 33. %3 KNT Çekme Hasar Görüntüleri

5.4.3. %5 Karbon nanotüp katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü

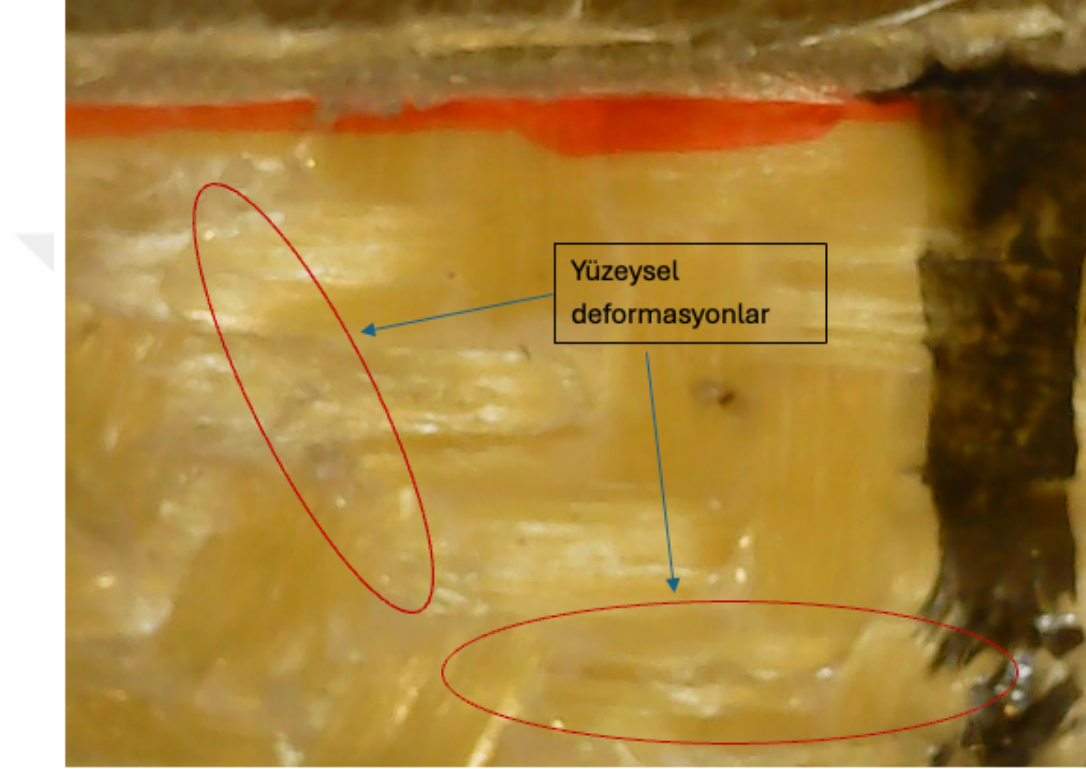
Ağırlıkça %5 knt takviyeli numunede atkı yönünde ciddi lif kopukları çözüğü yönünde ise ciddi kayma gerilmeleri oluşmuştur. Çekme testi sonuçları makro görüntüleri Şekil 34 'te görülmektedir.



Şekil 34. %5 Karbon Çekme Hasar Görüntüleri

5.4.4. %3 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü

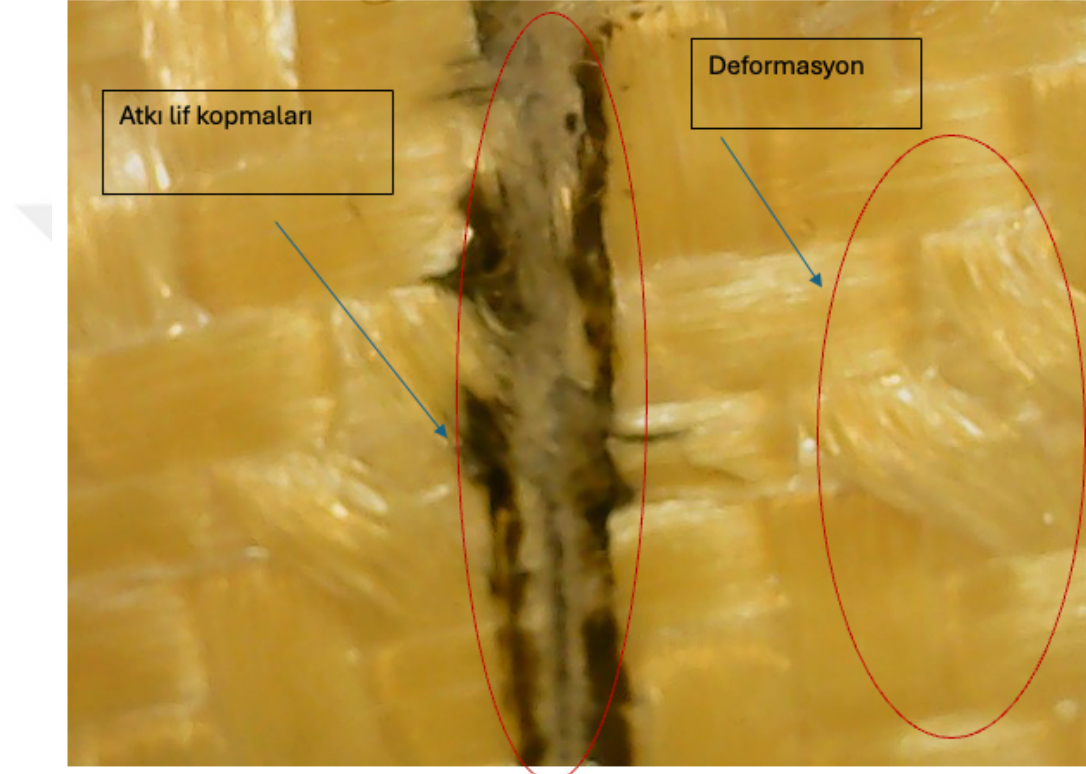
Ağırlıkça %3 zirkonya katkısında liflerde hafif yön kayıpları ve lifsel kırılmalar mevcuttur. Çekme testi sonuçları makro görüntüleri Şekil 35 'te görülmektedir.



Şekil 35. %3 ZrO₂ Çekme Hasar Görüntüleri

5.4.5. %5 Zirkonya nanopartikül katkılı malzeme çekme hasar görüntüsü

Ağırlıkça %5 zirkonya katkısı numunede yüzeysel lif deformasyonları ve atkı lif kopmaları görülmekte, kırık yüzeyler stabildir. Çekme testi sonuçları makro görüntüleri Şekil 36 'da görülmektedir.



Şekil 36. %5 ZrO₂ Çekme Hasar Görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, aramid/vinilester tabanlı kompozit malzemeler üzerinde gerçekleştirilen mekanik testler ile farklı katkı maddelerinin (karbon nanotüp ve zirkonya) malzeme performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

6.1.1. 15J Darbe Testi Bulguları

- **Katkısız numunede**, ciddi fiber kırıkları meydana gelmiş ve darbe sönümlemesi kuvvetin maksimum seviyeye ulaşmasından sonra başlamıştır.
- **%3 Karbon Nanotüp (KNT) katkılı numunede**, düşük oranlı fiber kırıkları ve yüzey matris çatlakları gözlemlenmiş, ancak enerji absorpsiyonu artmıştır.
- **%5 Karbon Nanotüp katkılı numunede**, mukavemet artışı gözlenmemiştir. Fiber kırıkları enerjinin erken sönümlenmesine neden olmuştur.
- **%3 Zirkonya (ZrO₂) katkılı numunede**, yüzey matris çatlakları oluşmuş, ancak fiber kırılmaları belirgin şekilde azalmıştır.
- **%5 Zirkonya katkılı numunede**, ani matris kırılmaları ve fiber kırıkları meydana gelmiştir, bu da malzemenin sünekliğini artırmış ancak mukavemetini düşürmüştür.

6.1.2. 25J Darbe Testi Bulguları

- **Katkısız numunede**, 6000 N kuvvete kadar dayanım gösterilmiş ancak ani fiber kırıkları meydana gelerek malzeme hasar almıştır.
- **%3 Karbon Nanotüp katkılı numunede**, ani matris kırılmaları gözlemlenmiş, ancak deplasman daha geç gerçekleşmiş ve geri tepme enerjisi daha erken oluşmuştur.
- **%5 Karbon Nanotüp katkılı numunede**, mukavemet artmış ve malzeme stabil hale gelmiştir.
- **%3 Zirkonya katkılı numunede**, matris çatlakları ve fiber kırılmaları meydana gelmiş ancak mukavemet düşüşü yaşanmıştır.

- **%5 Zirkonya katkı numunede**, 3000 N üzerinde fiber kırıkları meydana gelmiş, süneklik artışı sağlanmış ancak mukavemet azalmıştır.

6.1.3. Çekme Testi Bulguları

Çekme testleri ASTM D3039 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

- **Katkısız numunede**, yüzeysel lif kırıkları yoğun bir şekilde gözlemlenmiştir, ancak lifli kırık miktarı düşüktür.
- **%3 Karbon Nanotüp katkı numunede**, çekme kuvvetinde artış kaydedilmiş ve lif kopmaları düzenli bir şekilde gerçekleşmiştir.
- **%5 Karbon Nanotüp katkı numunede**, atkı yönünde ciddi lif kopmaları ve çözgü yönünde kayma gerilmeleri oluşmuştur.
- **%3 Zirkonya katkı numunede**, liflerde hafif yön kayıpları ve lifsel kırılmalar gözlenmiştir.
- **%5 Zirkonya katkı numunede**, yüzeysel lif deformasyonları ve atkı lif kopmaları meydana gelmiştir.

6.1.3. Katkı Türü ve Oranın Etkisi

- Karbon nanotüp katkıları, darbe dayanımı ve enerji absorbe etme kapasitesi açısından daha etkili olurken, zirkonya katkıları süneklik özelliklerini iyileştirmiştir.
- Yapılan deneyler neticesinde optimum katkı oranının %3 ve üzeri olduğu sonucuna varılmıştır.

6.2 Öneriler

Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar, endüstriyel uygulamalarda kullanılacak yeni kompozit malzeme tasarımlarına ışık tutabilir. Özellikle, karbon nanotüp katkı malzemelerin yüksek dayanım gerektiren alanlarda uygulanabilirliği değerlendirilebilir.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı katkı türlerinin bir arada kullanıldığı hibrit kompozitler üzerinde araştırmalar önerilmektedir.

Darbe ve çekme testlerinin yanı sıra, uzun süreli yüklenme altındaki davranışları incelemek için yorulma testleri yapılabilir.

Endüstriyel ölçekli üretime geçiş öncesinde, farklı imalat yöntemlerinin malzeme özelliklerine etkisi değerlendirilmelidir.



7. KAYNAKLAR

- Abdallah, B., Elhissi, A. M. A., Ahmed, W., & Najlah, M. (2020). Carbon nanotubes drug delivery system for cancer treatment. *Advances in Medical and Surgical Engineering*, 313–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819712-7.00016-4>
- Abrate S.,1991, “Impact on laminated composite materials”, “Appl Mech Rev”, 44(4):155– 90.
- Abrate S.,1998, *Impact on Composite Structures*. Cambridge Press University;
- Anderson KL, Evans KE.,1992, Low velocity transverse impact of filament-wound pipes- Part 1- Damage due to static and impact loads. *Compos Struct* ; 20:37-45.
- Arıkan, H.,2002, “Çelik tel takviyeli polimer kompozitlerin kırılma davranışı” Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya
- Asi, D., 2018, *Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel Ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması*, Yüksek lisans Tezi, Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Uşak, 174s.
- Bakkal M., 2011, “Kompozitler”, *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Sekizinci baskıdan çeviri, Kenan Genel, Nobel Yayınevi,Türkiye, 629-655.
- Bandaru, A.K, Chavan, V.V, Ahmad, S., Alagirusamy, R. (2016). Ballistic impact response of Kevlar® reinforced thermoplastic composite armors. *International Journal of Impact Engineering*, 89, 1–13.
- Cam Elyaf Sanayii A.Ş. 2004, *CTP Teknolojisi*. 15-47.
- Cantwell, W.J., 1988, The influence of target geometry on the high velocity response of CFRP, *Composite Structures*, 10 (3): 247-265.
- Ceyhun, V., Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.
- Chawla, K.K., 2011, “Composite Materials Science and Engineering, Third Edition” Springer , New York, USA, 11-140.
- Cho JU.,2006, Dynamic fracture analysis at strip with composite materials. *J Korea Academia-Industrial Coop Soc* ;7(3):265-70.
- Corbett GG, Reid SR.,1994, Failure of composite pipes under local loading with a hemispherically tipped indenter. *Int J Impact Eng* 1994; 15:465-90.
- Das, S., Shaw, J.A, Pal, A. (2015). Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact. *Composite Structures*, 120, 129–140.

- Deniz ME, Karakuzu R.,2012, Seawater effect on impact behavior of glass–epoxy composite pipes. *Composites: Part B* 43 1130–1138
- Dorey, G. Bishop, S., Curtis, P., 1985, On the impact performance of carbon fibre laminates with epoxy and PEEK matrices, *Composites Science and Technology*, 23 (3): 221-237.
- Doğan, A.F., 2022, Kumaş Sarım Metodu İle Üretilen Aramid Fiber Boruların Darbe Dirençlerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 78s.
- Gemi, L., 2014, Düşük Hızlı Darbe Hasarlı Filaman Sarım Hibrid Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 153s.
- Gemi L., Şahin Ö.S., Akdemir A., 2017,, Experimental Investigation Of Fatigue Damage Formation Of Hybrid Pipes Subjected To Impact Loading Under Internal Pre-stress, *Composites Part B* 119, 196-205.
- Griffin, C.F., 1987, Damage tolerance of toughened resin graphite composites. *ASTM STP*, 937: 23-33.
- Gurit Holding AG. (2000). Guide to Composites. In Available in URL: <http://www.netcomposites.com/> <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>
- Jenq, S.T., Mo, J.J., 1996, Ballistic impact response for two-step braided three dimensional textile composites. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 34 (2): 375-384.
- Kang KW, Lee SP, Lee JS, Koh BK. Statistical evaluation for residual strength of impacted composite materials. *J Korea Academia-Industrial Coop Soc* 2010;11(2):426-34.
- Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı , Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 93s.
- Kara, M., 2012, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım Ctp Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 141s.
- Kevlar, D. Technical guide DuPont advanced fiber systems
- Kukovecz, Á., Kozma, G., & Kónya, Z. (2013). Multi-Walled Carbon Nanotubes BT - Springer Handbook of Nanomaterials (R. Vajtai (Ed.); ss. 147–188). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20595-8_5
- Kumar, S., Gupta, D.S, Singh, I., Sharma, A. (2010). Behavior of kevlar/epoxy composite plates under ballistic impact. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29, 2048-2064.

- Kurtman, Ş. ve Göktaş, G., “Termoplastik Elastomerler” Lisans Bitirme Tezi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi, Zonguldak (2006).
- Lee J, Kong C, Soutis C. Modelling of low velocity impact damage in laminated composites. *J Mech Sci Technol* 2005;19(4):947-57.
- Malvern, L.E., Sun, C.T., Liu, D., 1987, Damage in composite laminates from central impacts at subperforation speeds, in *Recent Trends in Aeroelasticity, Structures and Dynamics*, University of Florida Press, Gainesville, FL, 298-312.
- Mazumdar, S. K. (2001). Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering. In *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*.
- Mazumdar, S. K., 2002, “Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering”, CRC Press, London, 20-39.
- Mili, F., Necib, B., 2001, Impact behaviour of cross-ply laminated composite plates under low velocities, *Composite Structures*, 51: 273-244.
- Mishra, R., Behera, B.K., Militky., J. (2014). Impact simulation of three dimensional woven Kevlar-epoxy composites. *Journal of Industrial Textiles*, 45, 978-994.
- Nunes, J. P., & Silva, J. F. (2016). Sandwiched composites in aerospace engineering. *Advanced Composite Materials for Aerospace Engineering*, 129–174. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100037-3.00005-5>
- Park, R., Jang, J., 2001, Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: Effect of stacking sequences, *Polymer Composites*, 22 (1): 80-89.
- Reid SR, Peng C, Ashton JN. Tolerance of composite pipes to local impact damage. *Proc Instn Mech Engrs, Part E; J Process Eng* 1996;210(3):181-92.
- Reis, P.N.B., Ferreira, J.A.M., Zhang, Z.Y., Benameur, T., Richardson, M.O.W. (2013). Impact response of Kevlar composites with nano clay enhanced epoxy matrix. *Composites: Part B*, 46, 7–14.
- Schweitzer, P.A., “ Corrosion of polymers and elastomers”, *Corrosion Engineering Handbook*, CRC Press, New York (2006).
- Semerciöz, S.M. (2021). “Bor Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Sierakowski, R. L., Chaturvedi, S. K., 1997, Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites, John Wiley & Sons, Inc., United States of America, 252 s.
- Singh, T.J, Samanta, S. (2015). Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 2, 1381 – 1387.

- Sinha, P.K., 2006, Composite materials and structures, Composite Centre of Excellence, AR&DB, Department of Aerospace Engineering I.I.T. Kharagpur.
- Stronge, W.J., 2000, Impact mechanics. Cambridge, Cambridge University Press, 1-26.
- Sulaiman, B.H., 2017, Vibration Damping Property, Tensile And Flexural Behaviour Of Kevlar-Carbon/Epoxy/Nanographene Composite, M.S. Thesis, University of Gaziantep, Gaziantep
- Taraghi, I., Fereidoon, A., Taheri-Behrooz, F. (2014). Low-velocity impact response of woven Kevlar/epoxy laminated composites reinforced with multi walled Carbon nanotubes at ambient and low temperatures. *Materials and Design*, 53, 152–158.
- Töre, C. (2010). Kompozit malzeme temelleri. Makine Mühendisleri Odası.
- William, D.C, David, G.R. (2014). *Materials Science and Engineering*, Wiley, 9th Edition SI Version.
- Yalçın, E.B., 2012, “Farklı kumaş ve farklı yöntemlerle üretilmiş CTP kompozitlerin balistik davranışlarının incelenmesi” Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Yang, L., Yan, Y., Kuang, N. (2013). Experimental and numerical investigation of Aramid fiber reinforced laminates subjected to low velocity impact. *Polymer Testing*, 32, 1163–1173.
- Zou Z, Reid SR, Li S, Soden PD. Application of a delamination model to laminated composite structures. *Compos Struct* 2002; 56:375-89.
- Şahin, Ö.S., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP kompozit boruların korozif ortamda yorulma davranışı, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 150s.