



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**BAZALT ELYAF TAKVİYELİ FİLAMAN
SARIM KOMPOZİT BORULARIN DÜŞÜK
HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ DÜŞÜK
İÇ BASINÇ ALTINDA İNCELENMESİ**

UĞUR YOZGAT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim
Dalı**

Temmuz-2019
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Uğur YOZGAT tarafından hazırlanan “Bazalt Elyaf Takviyeli Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Düşük İç Basınç Altında İncelenmesi” adlı tez çalışması 03/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi İlyas ŞAVKLIYILDIZ

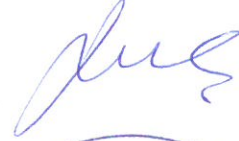
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Yakup KARA
Enstitü 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 materials and results that are not original to this work.



Uğur YOZGAT
03/07/2019

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****BAZALT ELYAF TAKVİYELİ FİLAMAN SARIM KOMPOZİT BORULARIN
DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞLARININ DÜŞÜK İÇ BASINÇ ALTINDA
İNCELENMESİ****Uğur YOZGAT****Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ****2019, 73 Sayfa****Jüri****Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ
Dr. Öğr. Üyesi İlyas ŞAVKLIYILDIZ
Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ**

Gerçekleştirilen bu çalışmada, $\pm 55^\circ$ filaman sarım bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların düşük iç basınç altında düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Kompozit boruların düşük hızlı darbe testleri 15J, 20J ve 25J darbe enerji seviyelerinde ASTM D 7136/7136M standardına göre gerçekleştirilmiştir. İçi boş, içi yağ dolu basınçlandırılmamış (0 bar) ve içi yağ ile basınçlandırılmış (5 bar) olmak üzere üç farklı kompozit boruların maksimum darbe kuvvetleri, deplasman değişimleri ve yutulan enerji miktarları belirlenmiştir. Deneysel sonuçları incelendiğinde, artan darbe enerji seviyesi ile tüm BTP/Epoksi kompozit boru numunelerinde maksimum temas kuvveti, temas süresi, deplasman değerleri ve maksimum yutulan enerji değerleri artmaktadır. Aynı darbe enerji seviyesinde; en yüksek maksimum kuvvet ve en düşük deplasman 5bar basınçlandırılmış deney numunelerinde görülürken, en düşük maksimum kuvvet ve en yüksek deplasman değerleri ise içi boş BTP numunelerde tespit edilmiştir. Bu durumda 5bar iç basınçlandırma ile kompozit tabakaların eğilmeye karşı direncinin arttığı yorumlanmıştır. Artan enerji seviyesi ile birlikte yutulan enerji miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. İçi yağ dolu basınçlandırılmamış (0 bar) ve içi yağ ile basınçlandırılmış (5 bar) BTP kompozit numunelerde enerji absorpsiyonunun benzer değerler gösterdiği görülmüştür. Darbe enerji seviyesindeki artışın, BTP/Epoksi kompozitlerde meydana gelen hasarların artmasına neden olduğu belirlenmiştir. Kompozit boruların basınçlandırılmasıyla birlikte oluşan hasar miktarlarının azaldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bazalt elyaf, düşük hızlı darbe, düşük iç basınç, filaman sarım kompozit boru.

ABSTRACT**MS THESIS****INVESTIGATION OF LOW SPEED IMPACT BEHAVIOR OF BASALT FIBER
REINFORCED FILAMENT WINDING COMPOSITE TUBES UNDER LOW
INTERNAL PRESSURE****Uğur YOZGAT****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Metallurgical and Materials Engineering****Advisor: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ****2019, 73 pages****Jury****Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ****Dr. Öğr. Üyesi İlyas ŞAVKLIYILDIZ****Dr. Öğr. Üyesi Mustafa KOCABAŞ**

In this study, $\pm 55^\circ$ filament winding basalt fibre-reinforced composite tubes were examined under low internal pressure at low speed impact behavior. Low-speed impact tests of composite tubes were performed according to ASTM D 7136 / 7136M standard at 15J, 20J and 25J impact energy levels. The maximum impact force, displacement and absorbed energy values of oil unfilled (hollow), oil filled and non-pressurized (0 bar) and internal pressurized (5 bar) three different composite tubes were determined. When the test results are examined, maximum contact force, contact time, displacement values and maximum absorbed energy values are increased in all BFR / Epoxy composite tube samples with increasing impact energy levels. While the highest maximum force and the lowest displacement were found in the oil pressurized (5 Bar BTP) samples at same impact energy level, the lowest maximum force and the highest displacement were observed on oil unfilled (hollow) composite tube samples. It was commented that oil internal pressurization of composite tube samples have provided to bending resistance of laminated composite tube internal wall. It was observed that the amount of absorbed energies increased by increasing impact energy levels. Similar absorbed energies have been observed for internal pressurized (5 bar) and oil filled and non-pressurized (0 bar). It was determined that the increasing impact energy levels cause the raised the impact failures of all composites. However, internal pressurization decreased the amount of failures.

Keywords: Basalt fiber, filament winding composite tube, low speed pulse, low internal pressure.

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın yapılmasında ve tamamlanmasında her türlü desteği esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ hocama en içten dileklerle minnet ve şükranlarımı sunarım.

Çalışmanın yapılması sırasında, tez yazım sürecinde bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, deneysel çalışma metotlarında bize yardımcı olan ve laboratuvar imkanlarını sağlayan Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN hocama yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak, tüm eğitim hayatım ve çalışmalarım boyunca büyük bir sabırla maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen arkadaşım Buket BAYRAK ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Uğur YOZGAT
KONYA-2019



İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Kompozit Malzemeler	3
2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	3
2.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler	4
2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	5
2.3.1. Filaman sarım tekniği	6
2.3.1.1. Helisel sarım makineleri	6
2.3.2. Filaman sarım kompozit borular ile ilgili literatür çalışmaları	7
2.4. BTP/Epoksi Kompozit Boruya Etkiyen Gerilmeler	10
2.5. Polimer Malzemeler	11
2.5.1. Termoplastikler	12
2.5.2. Termosetler	12
2.5.2.1. Epoksi	13
2.6. Polimer Malzemelerde Kullanılan Elyaf lar	13
2.6.1. Bazalt elyaf lar	13
2.6.2. Bazalt elyaf lar ile ilgili literatür çalışmaları	16
3. DÜŞÜK HIZLI DARBE VE HASAR ANALİZİ	21
3.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekanik i	21
3.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları	21
3.1.2. Normal temas kuvvetinin iş i	22
3.1.3. Serbest düşme hareketi	23
3.1.4. Darbe enerjisi	23
3.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranış ı	24
3.3. Darbe Testleri	25
3.3.1. Ağırlık düşürme darbe testi	25
3.4. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Darbe Sonrası Görülen Hasar Türleri	26
3.4.1. Matris hasarları	27
3.4.2. Delaminasyon	29
3.4.3. Elyaf hasarı	31
3.4.4. Elyaf-matris ara yüzey ayrılması	32
3.4.5. Nüfuziyet	32
3.5. Kompozit Malzemelerde Düşük Hızlı Darbe Uygulamaları	33

4. MATERYAL VE METOT.....	36
4.1. BTP/Epoksi Kompozit Boruların Üretimi	36
4.2. Kompozit Borular İçin Düşük Basınç Şartlarının Sağlanması	38
4.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri	39
4.3.1. Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı	40
4.3.2. BTP/Epoksi boru yataklaması	41
4.3.3. Elektronik kontrol ünitesi	41
4.4. BTP/Epoksi Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi	42
4.4.1. Kuvvet-deplasman (F-d) eğrileri	42
4.4.2. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri	43
4.4.3. Absorbe edilen enerji-zaman (E_a -t) eğrileri	44
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	46
5.1. BTP/Epoksi Borularının Mekanik Özellikleri	46
5.2 Düşük İç Basınç ve Basınçsız BTP/Epoksi Borularının Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları	46
5.2.1. Temas kuvveti-zaman değişimi	46
5.2.2. Temas kuvveti-deplasman değişimi.....	51
5.2.3. Enerji-zaman değişimi	55
5.3. Düşük Hızlı Darbe Hasar Analizi	58
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	66
6.1 Sonuçlar	66
6.2 Öneriler	67
KAYNAKLAR	68
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

- E: Elastiklik modülü
 E_a: Yutulmuş enerji
 ρ: Yoğunluk
 ρ_f: Elyafın yoğunluğu
 ρ_c: Kompozitin yoğunluğu
 σ: Çekme dayanımı
 σ_t: Teğetsel gerilme
 σ_a: Eksenel gerilme
 σ_n: Dik yönde etki eden gerilme
 α: Boyuna termal genleşme katsayısı, filaman sarım açısı
 G: Kayma modülü
 F: Temas kuvveti
 N:Newton
 J: Joule
 °C: Santigrat derece
 V: Hız
 V₀: Vurucunun ilk hızı
 V_f: Elyafın hacimsel oranı
 V_y: İzafi hız
 W_f: Elyafın kütlesi
 W_c: Kompozitin kütlesi
 W_n: Normal bileşenin yapmış olduğu iş
 p: Basınç
 r: İç yarıçap
 δ: Yer değiştirme
 Π: Darbe enerjisi
 d: Deplasman, yer değiştirme
 t: Zaman
 g: İvme
 h: Serbest düşme mesafesi
 m: Vurucu kütlesi
 mm: Milimetre
 μm: Mikrometre
 m: Metre
 γ: Poisson oranı
 L: Boru numunesinin boyu
 d: Boru numunesinin iç çapı
 D: Boru numunesinin dış çapı
 t: Boru numunesinin et kalınlığı
 n: Boru numunesi tabaka sayısı

Kısaltmalar

BTP: Bazalt elyaf takviyeli plastik
CTP: Cam elyaf takviyeli plastik
KTP: Karbon elyaf takviyeli plastik
DAQ: Data Acquisition
NI: National Instruments
ASTM: American Society for Testing and Materials
CNC: Computer Numerical Control
PE: Polietilen



1. GİRİŞ

“Etrafımız malzemelerle çevrili; gördüğümüz ve dokunduğumuz her şeye özünü veren malzemedir. Türümüz – homo sapiens – diğer türlerden belki de en çok tasarlama, malzemelerden şeyler üretme ve şeylere dışsal formlarının ötesinde anlamlar atfedebilme becerisiyle ayrılıyor.” (Mike Ashby)

İnsanoğlunun ihtiyaçları zaman içerisinde çoğalmakta ve bu ihtiyaçların karşılanması hususunda malzeme üretimi ilk sırada yer almaktadır. Günlük hayatta kullandığımız malzemeler çoğunlukla metal ve plastik türevli ürünlerdir. Gelişen teknoloji ile birlikte istenilen ekonomik, hafif, dayanımı yüksek ve farklı özelliklerde malzeme ihtiyacı kompozit malzemelere başvurulmasını sağlamıştır.

Kompozit malzemeler en az iki farklı malzemenin makro boyutta birleştirilerek oluşturduğu yeni malzeme olarak tanımlanabilir. Ana yapı olarak matris ve takviye malzeme olarak iki bileşenden oluşurlar. Kuvvetin matris malzemedeki takviye malzemesine aktarıldığı bölge ara yüzeylerdir. Kompozit malzemelerde istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesinde ara yüzey ve ara fazlar önemli yer tutmaktadır.

Malzeme üretimi önemli bir husus olduğu gibi tasarımda mekanik özelliklerin üstünlüğü açısından oldukça önemlidir. Özellikle saniyede kullanılan malzemelerin kullanım koşulları dikkate alındığında, dışardan oluşacak bir darbe farklı sonuçlar doğurabilir. Genellikle darbeler düşük veya yüksek hızlı darbeler olarak adlandırılır. Bu ayrımın yapılmasında kesin bir çizgi olmamasına rağmen, 1 ile 10m/s arasındaki hızlar düşük hızlı darbe olarak adlandırılmaktadır (Ceyhan ve Turan, 2003).

Her malzemenin darbe şiddetine verdiği yanıt farklıdır. Metal alaşımlı malzemelerde darbe sonrasında oluşan hasar yalnızca darbeye maruz kalan yüzeyde gözlemlenir. Kompozit malzemelerde ise hasar, darbe şiddetine göre darbeye uğramayan yüzeylerde de görülebilir. Metal ve seramiklerde darbe sonucu oluşan hasar kopma ve kırılma şeklindeyken, kompozit malzemelerde birden çok formda hasar gözlemlenebilmektedir.

Birçok mühendislik uygulamasında kullanılan kompozitler, metal malzemelere göre daha yüksek hasar ilerleme hızına sahiptirler ve daha yüksek hasar sonucu bozulma davranışı gösterirler. Darbe sonrası kompozit malzemelerin davranışı geliştirilmeye oldukça müsait bir konudur. Bu sebeple düşük hızlı darbe sorunu, kompozit malzemelerin

önemli teorik ve pratik uygulamalarını temsil etmektedir. Kompozit malzemelerin üretiminde çeşitli yöntemler olmasına rağmen filaman sarım yöntemi en çok tercih edilen üretim çeşididir. Filaman sarım ile üretilen kompozit borularda cam elyaflar ve karbon elyaflar ön plana çıkmaktadır. İyi mekanik özellik ve ağırlık baz alındığında karbon elyafın üstün özellikleri göze çarpmaktadır. Karbon elyafın yüksek maliyeti ve daha iyi mekanik özellik arayışı çalışmaları doğal elyaflara yönlendirmiştir. Bu noktada kullanımı M.Ö. incelenen çalışmalara dayanan *bazalt elyaflar*, II. Dünya savaşından sonra çeşitli askeri ve hava uygulamalarında kullanılmış ve 1995 yılında sivil hayatın kullanımına açılmıştır. Doğada kayaç formunda bulunan bazalt elyaflar, 1350°C – 1700°C sıcaklık aralığında eritilip 9-13 µm çaplarında üretilebilmektedirler. Bazalt elyaflar cam elyaflarla kıyaslandığında daha yüksek korozyon direnci, daha iyi mekanik ve termal özellikler sergilemektedir.

Bazalt elyafların üstün özellikleri göz önüne alındığında, araştırma sahasında yeni bir malzeme olmasından dolayı yapılan tez çalışmasında filaman sarım yöntemiyle üretilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit borular tercih edilmiştir. Özellikle doğalgaz hatlarında 3-5 bar basınç kullanımı mevcut olduğundan (Palmer ve King, 2004), darbe davranışları iç basınçsız ve düşük iç basınç (5 bar) altında incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler iki veya daha fazla sayıda farklı malzemelerin daha iyi özelliklerini ortaya çıkarmak amacıyla makro, mikro ve nano yapıdaki birleşimleriyle elde edilen yeni bir malzemedir. Birleşme sırasında yapılan karışımlar homojen ya da heterojen olabilmektedir. Sonuçta elde edilen yeni yapıda destekleme görevini yapan malzemeye takviye malzemesi, takviye yapılan malzemeye ise matris adı verilir (Taşyürek, 2014). Kompozit malzemeler takviye ve matris malzemelerine göre iki ana malzemedir oluşabildiği gibi, bu malzemelere ek olarak bağlayıcı malzemesi de kullanılarak oluşturulabilmektedir (Uluşen, 2008).

Kompozit malzemelerde ana malzeme özellikleri istenilen özellikleri karşılamamakta, birleşim sonrasında elde edilen ürün en iyi özellikleri sunmaktadır. Kompozit malzemeler üretimi ile oluşturulabilecek özellikler aşağıda verilmiştir (Şahin, 2000; Samancı, 2004). Bunlar;

- Yüksek mukavemet
- Yüksek rijitlik
- Yüksek yorulma dayanımı
- İyi aşınma direnci
- Isıya karşı yüksek direnç
- İyi korozyon direnci
- Yüksek ısı ve elektrik iletkenliği
- Düşük yoğunluk
- Estetik, gösterişli görünüm ve iyi yüzey kalitesidir.

2.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

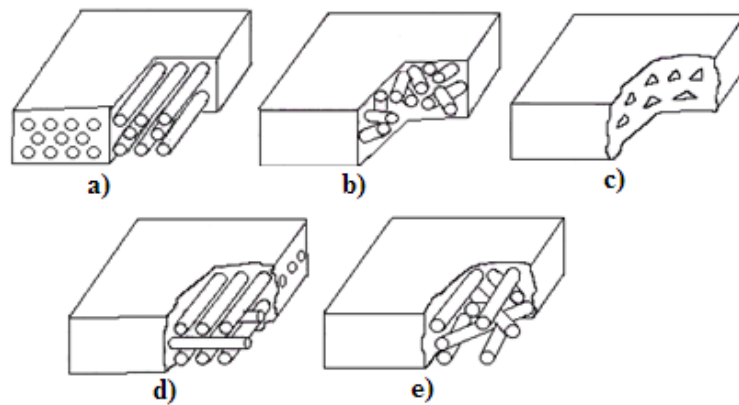
Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	
Matris malzemesine göre	Takviye malzemesine göre
➤ Metal matrisli kompozitler	➤ Elyaf takviyeli kompozitler
➤ Seramik matrisli kompozitler	➤ Parçacık takviyeli kompozitler
➤ Polimer matrisli kompozitler	➤ Tabaka takviyeli kompozitler

Yapılan çalışmada takviye elamanı olarak elyaf takviyeli polimer kompozitler incelenmiştir.

2.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitler, düşük dayanım-elastikiyet modülüne sahip olan matris yapı ile yüksek dayanım-elastikiyet modülüne sahip olan elyaf malzemelerin birleşimi ile oluşturulmaktadır.(Gemi, 2004). Bu kompozitlerin özellikleri farklı oranlarda elyaf-matris kullanılarak ve fazların sahip olduğu özellikleri düzenlenerek ayarlanabilir. Elyafların yönlerine göre değişen kompozit malzemeler anizotropik malzemelerdir. Bir malzemenin anizotropik olması, bu malzemenin davranışlarının izah edilebilmesi için çok sayıda parametre olduğunu gösterir. İzotropik malzemelerin elastik davranışı açıklayabilmek için iki parametre gerekirken, anizotropik malzemeler için 21 parametre, ortotropik malzemeler için 9 sabit parametre bulunması gerekmektedir. Elyaf takviyeli kompozitlerin çekme dayanımı, özgül modül, özgül dayanım ve yorulma dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmek için yumuşak matris malzeme içerisine sert, elastikliği yüksek elyaflar ilave edilmiştir (Samancı, 2004).

Elyaf takviyeli kompozitler Şekil 2.1' de görüldüğü gibi 5 ayrı sınıfta incelenmektedir.

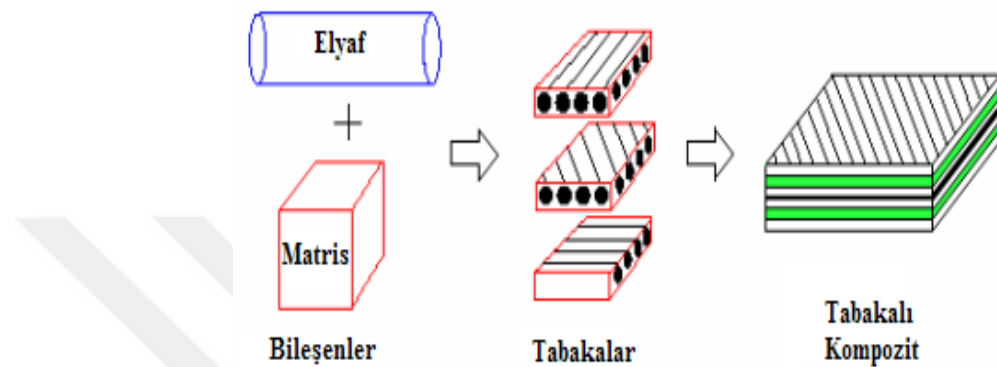


Şekil 2.1 a) Tek yönlü sürekli elyaflar b) Kırpılmış elyaflar c) Ortogonal elyaflar d) Çapraz dizilmiş sürekli elyaflar e) Rastgele dizilmiş sürekli elyaflar (Şahin, 2000)

Tabakalı kompozitler, iki veya daha fazla birbirinden farklı malzemelerin tabakalama yoluyla birbirine yapıştırılması ile oluşturulan kompozitler olarak

tanımlanabilmektedir. Tabakalı kompozitlerde, malzemeye özelliklerini veren sürekli faz ve sürekli fazı oluşturan tabakaları bir arada tutan bağlayıcı faz olmak üzere en az iki farklı faz tabakalar şeklinde yapının içerisinde yer almaktadır (Demirci, 2015).

Tabakalama yoluyla; mukavemet, düşük ağırlık, korozyon direnci, rijitlik, dayanıklılık, ısı izolasyonu ve görünüm gibi özellikler iyileştirilebilmektedir. Tabakalı kompozitlerin üretimi Şekil 2.2’de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Tabakalı kompozit üretiminin şematik gösterimi (Ekşi, 2007).

Elyaf takviyeli kompozitler günümüzde uzay, havacılık, otomotiv, askeri, yapı, kimyasal prosesler gibi çok fazla sahada kullanılmaktadır. Bu sahalarda tercih edilmesini kimyasal ve ısı direnç, düşük ağırlık-yüksek mukavemet özellikleri sağlamaktadır.

Elyaf takviyeli kompozitlerde takviye malzemesi olarak genellikle cam, karbon ve aramid elyaflar tercih edilmektedir. Son zamanlarda alternatif olarak bazalt elyaflarda kullanılmaya başlanmıştır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak termosetler için vinilester, epoksi ve polyeşter, termoplastikler için naylonlar, polipropilen, polietilen ve PEEK tercih edilmektedir (Demirci, 2015).

Tez çalışmasında takviye malzemesi olarak bazalt elyaflar, matris malzeme olarak da epoksi tercih edilmiştir.

2.3. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretiminde kullanılacak yer ve kullanım amacına uygun üretim metotları mevcuttur. Bu üretim metotları; elle yatırma, püskürtme, filaman (elyaf sarma), reçine transfer kalıplama RTM/ reçine enjeksiyonu, profil çekme, hazır

kalıplama, hazır kalıplama pestili (SMC), hazır kalıplama hamuru, vakumlama ve otoklavdır (Arıcasoy, 2006).

Yapmış olduğumuz çalışmada filaman sarım tekniği ile BTP/Epoksi kompozit boru üretimi yapılmıştır.

2.3.1. Filaman sarım tekniği

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan en yaygın yöntemlerden biri filaman sarım tekniğidir. Günümüzde depolama tankları, elektrik izolatör gövdeleri, uçak-helikopter parçaları, pnömatik-hidrolik silindirler, yapı elamanları, tork çubukları, roket namlu boruları ve çeşitli spor malzemeleri filaman sarım tekniği ile üretilmektedir (Samancı, 2004).

Özel olarak tasarlanmış sargı makineleriyle, kafa ve mandrel dönüş hızları istenilen şekilde ayarlanarak farklı sarım açılarında üretim yapılır. Sarım paternlerin tüm mandreli kaplaması ile gerçekleşir. Paternler yapışık bantlar ve tekrarlanan olmak üzere iki halde kullanılabilirler. Çalışılacak katman kalınlığı oluşana kadar farklı veya aynı sarım açılarında sarım yapılır. Sarım açıları 25° ile 90° arasında seçilebilir.

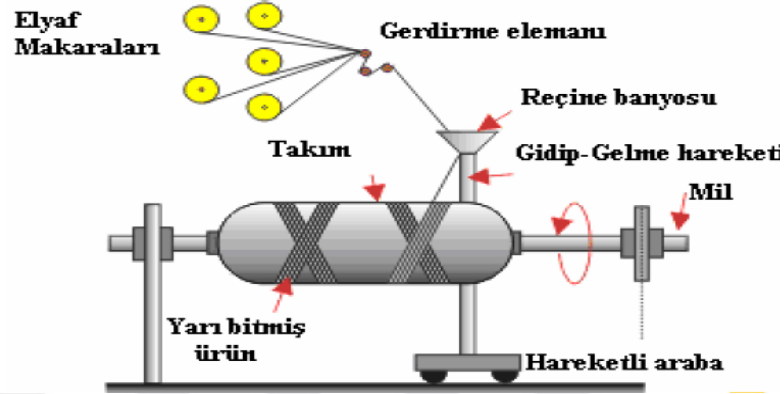
Filaman sarım tekniğinde elyaflar arasında yapıştırıcı olarak termoset reçineler (epoksi, polyester, vinilester) tercih edilmektedir. Sarım ıslak ve kuru olmak üzere iki yöntemle yapılır. Islak sarımda elyaf malzeme reçine malzemesinin içerisinden geçirilerek sarım yapılırken, kuru sarımda ise reçine önceden elyafa emdirilir. Sarımlama işlemlerinden sonra elde edilen kompozit malzemeler farklı sıcaklıklarda fırınlanmaktadır (Demirci, 2015).

2.3.1.1. Helisel sarım makineleri

Helisel sarım makineleri üzerinde bulunan kafanın ileri-geri hareketi (strok boyunca) ve mandrelin dönmesi prensibi ile çalışmaktadır. Elyafı yönlendiren kılavuz halkanın sarım yönüne göre değişen düşey eksen çevresinde veya mandrene dik ekseninde bir kızak tercih edilmesiyle sarım yönüne göre değişkenlik gösteren besleme deliğinin çevrilmesiyle dördüncü eksen oluşturulur. CNC işlevli filaman sarım makinelerinde bu eksenler görülmektedir (Şekil 2.3). Oluşan dördüncü eksen elyafların uç kısımlarına yerleştirilir. Helisel sarım makineleri mekanik kontrollü ve sayısal kontrollü olmak üzere iki başlık altında incelenebilir. Mekanik kontrollü makineler bağlantı zinciri, tahrik

vidaları ve sürücü sistemden oluşmaktadır. Sayısal kontrollü makineler ise sarım ekseninde mandrel motorları bulunmaktadır (Demirci, 2015).

Helisel sarım makinelerinde sarım esnasında reçine banyo ve oda sıcaklıkları, elyaf hızı-gerginliği-uzunluğu ve nem gibi parametreler sürekli takip edilmektedir.



Şekil 2.3 Filaman Sarım Makinesi (Ekşi, 2007).

2.3.2. Filaman sarım kompozit borular ile ilgili literatür çalışmaları

(Samanci ve ark., 2012) $[\pm 45]_3$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borulara farklı oranlarda çatlaklar açarak yorulma ve patlatma deneyleri uygulamışlardır. %30 ve %40 yükleme oranlarında su jeti şeklinde, %50 yükleme oranında patlatma hasar tipleri görülmüştür. Çatlak derinliğinin artmasıyla yorulma ömrünün düştüğünü belirtmişlerdir.

(Sari ve ark., 2012) $[\pm 55]_3$ sarım açılı kapalı uçlu CTP filaman sarım kompozit borulara, 0J, 5J, 7,5J ve 10J enerjilerinde düşük hızlı darbe testi yapmışlardır. Darbe enerjisinin artmasıyla yutulan edilen enerjinin, yer değişiminin ve temas kuvvetinin arttığını tespit etmişlerdir. Darbe enerjisinin artmasıyla statik iç basınç testlerinde basınç değerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir.

(Mertiny, 2012) $[\pm 60]_3$ sarım açılı kapalı uçlu bazalt elyaf filaman sarım kompozit borularda, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklıklardaki sızıntı hasarı oluşumunu iç basınç testleri ile incelemişlerdir. Kompozit borularda matris malzemesi olarak epoksi ve bismalemid matris malzemelerini tercih edilmiştir. Oda sıcaklığında epoksinin %-şekil değişiminin yüksek olduğu, artan sıcaklık ile birlikte %-şekil değişiminde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bismalemid ise artan sıcaklık ile birlikte %-şekil değişiminin arttığı görülmüştür. %-şekil değişiminin yüksek olması ile hasar dayanımının da yüksek olduğunu belirtilmiştir.

(Salavatian ve Smith, 2012) $\pm 40^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 50^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 60^\circ$ sarım açılarında kapalı uçlu kompozit borulara iç basınç testleri gerçekleştirmişler ve oluşan hasar tiplerini yorumlamışlardır. $\pm 40^\circ$, $\pm 45^\circ$ ve $\pm 50^\circ$ sarım açılarında delaminasyon hasarları, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 60^\circ$ de ise elyaflara fazla yük binmesiyle elyaf kırılması şeklinde hasar tipleri gözlemlenmiştir. Sarım açısının artmasıyla delaminasyonun azaldığı görülmüştür.

(Martins ve ark., 2012) $[\pm 45]_4$, $[\pm 55]_4$, $[\pm 60]_4$ ve $[\pm 75]_4$ sarım açılarında kapalı uçlu CTP filaman sarım kompozit borulara statik iç basınç testleri gerçekleştirmişler ve oluşan hasar tiplerini yorumlamışlardır. $\pm 45^\circ$, $\pm 55^\circ$ ve $\pm 60^\circ$ sarım açılarında patlamanın meydana geldiğini, $\pm 75^\circ$ sarım açısında ise sızıntı hasarının oluştuğunu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sızıntı hasarından önce terlemenin olduğunu, sızıntı hasarı oluştuktan sonra akışkan jetinin gözlemlendiği belirtilmiştir.

(Arikan, 2010) 0° , 15° , 30° , 45° , 75° ve 90° farklı açılarda çatlak açılan CTP filaman sarım kompozit borulara yorulma ve patlatma deneyleri yapmışlardır. Açılı artışı ile birlikte yorulma ömrünün arttığını, çatlak boyunun azaldığını ve çatlak dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Sonuç olarak elyaf kırılması ve patlatma hasar tiplerini gözlemlenmiştir.

(Gemi ve ark., 2009) $[\pm 75]_2$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borularda %30, %35, %40, %50, %60 ve %75 gibi maksimum gerilme oranlarında yorulma testleri yapmışlardır. Yüksek gerilmelerde sızıntı hasarı olmadan elyaf kırılması hasarını, düşük gerilmelerde ise iç yüzeyde ara yüzey ayrılması ve küçük bir oranda beyazlama hasar tipleri gözlemlenmiştir.

(Onder ve ark., 2009) $[\pm 45]_2$, $[\pm 55]_2$, $[\pm 60]_2$, $[\pm 75]_2$ ve $[\pm 88]_2$ sarım açılı kapalı uçlu CTP filaman sarım kompozit borulara statik iç basınç deneyi yapmışlardır. $\pm 55^\circ$ sarım açısında en yüksek patlama basıncı elde edilmiştir. Sıcaklık artışı ile birlikte oluşan termal gerilmelerin patlama basıncını düşürdüğü gözlemlenmiştir.

(Meijer ve ark., 2008) $[\pm 60]_3$ sarım açılı kapalı uçlu CTP filaman sarım kompozit borulara eksenel ve teğetsel gerilme oranlarında patlatma testleri yapmışlardır. Eksenel gerilme altında helisel çatlakların, teğetsel gerilme altında patlatma hasarlarının, teğetsel gerilmenin artmasıyla akışkan jeti şeklinde hasarların oluştuğunu gözlemlenmiştir.

(Samanci ve ark., 2008) $[\pm 75^\circ]_3$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borulara yüzey çatlakları açarak yorulma deneyleri yapmışlardır. Çatlak derinliği oranının artışıyla yorulma ömrünün azaldığını belirtmişlerdir. Çatlak hasarının delaminasyon hasarı ile ilerlediğini, delaminasyon hasarının çatlak boyunu geçmediğini gözlemlenmiştir. Oluşan delaminasyon hasarının yüklenme oranının artışıyla hızlandığını ifade etmişlerdir.

(Qi ve Cheng, 2007) $[\pm 35]_3$, $[\pm 55]_3$ ve $[\pm 70]_3$ sarım açılarında üretilen CTP filaman sarım kompozit borulara çekme-burulma ile çekme-çekme yorulma deneyi yapmışlardır. Yorulma dayanımındaki düşüşün çevrim sayısındaki artış ile paralel olduğunu tespit etmişlerdir. Filaman sarım kompozitlerde sarım açısının küçülmesiyle (eksenel yönde) yorulma dayanımının artacağını belirtmişlerdir.

(Mertiny ve Gold, 2007) $[\pm 60]_3$ sarım açılı kapalı uçlu CTP filaman sarım kompozit borularda dayanım-şekil değiştirme bağlantısının, sızıntı hasarına ve hasar sonucu oluşacak akışkan kaybına olan etkisini farklı yükleme oranlarında incelemişlerdir. Yükleme oranındaki artışın sızıntı hasarına neden olan akışkan geçirgenliğini etkilediğini gözlemlemişlerdir.

(Tarakcioglu ve ark., 2007) $[\pm 55]_3$ açılı CTP filaman sarım kompozit borulara farklı oranlarda çatlak derinliği açmışlar ve %30, %40, %50 gibi maksimum gerilme oranlarında yorulma deneyi yapmışlardır. Düşük çatlak derinliğinde delaminasyon hasarlarının, yüksek çatlak derinliğinde kompozit borunun 3 tabaklı boru şeklinde yorulma hasarı gözlemlenmiştir.

(Tarakçioğlu ve ark., 2005) $[\pm 55]_3$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borulara %30, %35, %40, %50, %60 ve %70 gibi maksimum gerilme oranlarında yorulma testi yapmışlardır. Yorulma deneylerinde % maksimum gerilme oranı arttıkça çevrim sayısının logaritmik olarak azaldığını gözlemlemişlerdir. Yapılan testte debonding, beyazlama hasarı, sızıntı başlangıcı ve patlatma şeklinde elyaf kırılması hasarları gözlemlenmiştir.

(Kaynak ve ark., 2005) $\pm 0^\circ$, $\pm 25^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açılı KTP ve CTP kompozit borulara çekme deneyi yapmışlardır. Sarım açısının artmasıyla maksimum çekme dayanımı ve çekme modülünün arttığını, KTP kompozit boruların daha iyi mekanik özellikler gösterdiğini, $\pm 60^\circ$ ve $\pm 90^\circ$ sarım açılarında elyaf kırılması, elyaf/matris ayrılması hasar tiplerini gözlemlemişlerdir.

(Kaynak ve ark., 2005) $\pm 55^\circ$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borulara aksenal doğrultuda %60, %70 ve %80 yükleme oranlarında ve çeşitli frekanslarda yorulma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Frekans artışı ile yorulma ömrünün yükseldiğini, yükleme oranının artışı ile yorulma ömrünün düştüğünü belirtmişlerdir. Elyaf kırılması çatlak oluşumu, çatlak ilerlemesi, elyaf/matris ayrılması gibi hasarlar gözlemlenmiş elyaf doğrultusunda çatlak yoğunlaşması olduğunu belirtmişlerdir.

(Ellyin ve ark., 2004) $[\pm 60^\circ]_3$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borularının, çeşitli su sıcaklıklarında hasar davranışlarını incelemişlerdir. CTP filaman sarım kompozit borularda nem soğurmasının, ara yüzey dayanımını düşürerek statik iç basınç dayanımının azalmasına neden olduğunu göstermişlerdir. Su sıcaklığının artışı ile ara yüzeylerde ayrılmanın ve nem soğurmasının arttığını belirtmişlerdir.

(Mertiny ve ark., 2002) $[\pm 60^\circ]_3$ sarım açılarında CTP filaman sarım kompozit borularının üretimi sırasında oluşan elyaf gerginliğinin çekme dayanımına ve hacimsel elyaf oranına etkisini gözlemlemişlerdir. Elyaf gerginliğindeki artış ile hacimsel elyaf oranının arttığını belirtmişlerdir.

(Tarakcioglu ve ark., 2001) $[\pm 45^\circ]_3$, $[\pm 55^\circ]_3$ ve $[\pm 75^\circ]_3$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borulara farklı oranlarda çatlaklar açarak statik iç basınç patlatma deneyi yapmışlardır. $\pm 45^\circ$ sarım açısındaki borularda çatlaksız boru özelliklerini gözlemlenmiştir. $\pm 55^\circ$ sarım açısındaki borularda çatlak uçlarında delaminasyon hasarlarının oluştuğu görülmüştür. $\pm 55^\circ$ ve $\pm 75^\circ$ sarım açısındaki borularda çatlak oranının artmasıyla teğetsel dayanımın arttığı gözlemlenmiştir.

(Martens ve ark., 2000) $[\pm 60^\circ]_4$, $[\pm 66^\circ]_4$, $[\pm 66^\circ]_4$ ve $[\pm 66^\circ]_4$ sarım açılı CTP filaman sarım kompozit borulara iç basınç testleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyde teğetsel-eksenel gerilmeler doğrultusunda oluşan sızıntı hasarlarını incelemişlerdir. Sızıntı başlangıcında matristlerdeki hasarların, sızıntının ilerlemesiyle makro çatlakların oluştuğunu ifade etmişlerdir. Teğetsel gerilmenin ekstenel gerilmeden çok olduğu durumlarda delaminasyon hasarlarının arttığını belirtmişlerdir.

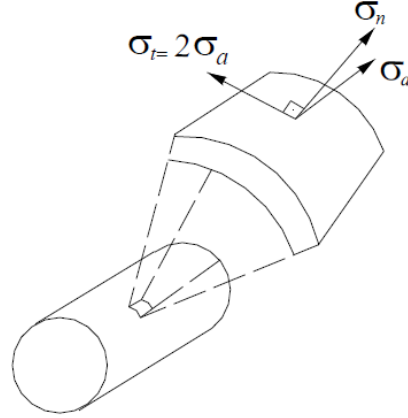
(Perreux ve ark., 1997) $\pm 55^\circ$ sarım açılı kompozit borularda frekansın yorulma ömrüne etkisini incelemişlerdir. Yüksek frekans ile yorulma ömrünün arttığını, düşük frekanslarda sürünme/yorulma etkileşiminin oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

(Perreux ve ark., 1995) $[\pm 55^\circ]_n$ CTP filaman sarım kompozit boruların çekme ve iç basınç testlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneyde doğrusal elastik -plastik davranışları incelemişlerdir. Matris malzemeden kaynaklı plastik şekil değiştirme olmadığını, tabakalar arası sürtünmeden dolayı hasar olacağını belirtmişlerdir.

2.4. BTP/Epoksi Kompozit Boruya Etkiyen Gerilmeler

Silindirik basınçlı ince cidarlı kaplarda 2/1 yükleme oranında teğetsel yönde σ_t ve ekstenel yönde σ_a gerilmeleri ile kapa dik doğrultuda etki den σ_n gerilmesi mevcuttur

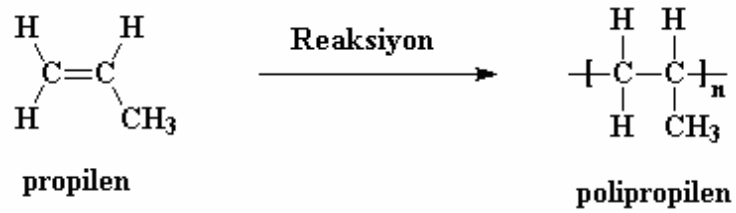
(Şekil 2.4). σ_n gerilmesi kabın dış kısmına doğru deformasyona sebep olur ve uygulamalarda kullanılmaz.



Şekil 2.4 İki ucu kapalı basınçlı kaptaki gerilmeler (Roberts, 1995).

2.5. Polimer Malzemeler

Polimerler çok sayıda makro molekülün kimyasal bağlar ile düzenli şekilde bağlanarak bir araya gelen yüksek molekül ağırlıklı bileşiklerdir. ‘Poli’ birden fazla, çok anlamında iken ‘mer’ adı verilen birimlerin tekrarlanması sonucu oluşan ürün polimerlerdir. Genel olarak polimerler, monomer birimlerinin bir araya gelmesiyle oluşurlar (Savaşçı ve ark., 1998).



Şekil 2.5 Propilen monomeri ve polipropilen polimeri (Ekşi, 2007)

Şekil 2.5’ de propilen monomerinin polimerizasyonu sonrasında polipropilen polimeri meydana gelmiştir.

Polimerler yapılarına göre üç farklı grupta incelenmektedir. Bunlar; tek bir monomerin tekrarlanmasından ile meydana gelen homopolimer, iki farklı monomerlerin

polimerizasyonu ile elde edilen kopolimer ve kimyasal üç farklı tekraralama sonucu oluşan terpolimerlerdir (Fried, 2014).

Polimerlerin hafif, kolay işlenebilir, iyi elektrik iletkenliği, korozyon direncinin yüksek olması, iyi bir ısı yalıtkanı olarak kullanılabilirliği ve yüzey kalitesinin iyi olması üstün özellikleridir. Bu özellikleri ile makine, elektrik-elektronik, uçak, ev aletlerinde çok fazla tercih edildiği gibi maliyetinin ucuz olmasından ambalaj sektöründe ve kolay işlenebilir olmasından dolayı da yapıştırıcı olarak kırtasiye sektöründe kullanılabilir (Demirci, 2015).

Polimerlerin ısı iletkenliğinin düşük olmasından dolayı, malzeme içerisinde sürtünme ve tekrarlanmanın neden olduğu ısı birikmesi sonucu ısı yorulmalara sebep olmaktadır. Bu negatif özelliği ortadan kaldırmak için polimerlere metal tozları veya çeşitli elyaflar (karbon ve cam elyaf) ilave edilir. İlave sonucu oluşan katkı polimerlerin ısı iletkenlikleri 10 kat daha yüksek bir değere sahip olmaktadır (Demirci, 2015).

Polimerler fiziksel olarak kristalin, kısmikristalin ve amorf olmak üzere üçe ayrılırken kullanım alanı olarak da kaplamalar, polimerler, elyaflar ve yapıştırıcılar olmak üzere dört grupta incelenirler (Akkurt, 1991).

Polimerlerin sınıflandırılmasında esas işleme yöntemlerine göre termoplastikler ve termosetler olarak iki başlık altında incelenmektedir.

2.5.1. Termoplastikler

Termoplastikler makro moleküller arasında kimyasal bağ bulunmayan, bu bağların bulunmaması sebebiyle tekrar işlenebilme imkanı olan, ısı ve basınç altında yumuşayan ve soğutulduğunda tekrar sertleşip katı hale gelen polimerlerdir. Termoplastikler kimyasal çözücülerde çözülebilme özelliğine sahiptirler (Akkurt, 1991; Demirci, 2009).

Termoplastik grubunu oluşturan en önde gelen polimerler; Polietereterketon, , Nylon (Poliamid), Polimid, ABS ve SAN, Akrilikler, Asetallar, Selülozikler, Floroplastikler (PTFE), Sıvı Kristal Polimerler, Polieterimid, Polioefinler (Poliyeten, Polipropilen), Polistren, Polivinil klorür ve Polikarbonat'lardır (Akkurt, 1991; Demirci, 2009).

2.5.2. Termosetler

Termosetler, ısı verilmesi sonrasında yalnız bir defa istenilen şekli alabilen polimerlerdir. İşlenmiş bir termoset polimerin yeniden ısı verilerek tekrar şekillendirmek mümkün değildir ve malzeme yeniden ısıtılma sonrası bozulmaya uğrar. Termosetler çapraz bağlı bir yapıya sahiptir. Termoset grubunu oluşturan en önde gelen polimerler; Alkidler, Amino, Epoksi, Feenolikler, Polyesterler, Poliüretanlardır (Akkurt, 1991).

Filaman sarım kompozit borular ile ilgili literatür çalışmaları kısmında görüldüğü gibi çalışmalarda en çok tercih edilen termoset polimerler; epoksilerdir.

2.5.2.1. Epoksi

Epoksiler; epoksi gruplarının amin, anhidrid ve novolak gibi maddelerle reaksiyona girerek veya kendi aralarında homopolimerizasyonu ile elde edilirler. İyi kimyasal, elektrik ve termik mukavemete sahip olan epoksiler, kuru durumda 220°C ve ıslak iken ise 140°C' ye kadar ısı dayanımı özelliği sergilerler. Kalıplama metodu ile üretilen epoksilerde sert ve kırılğan bir yapı olduğu ifade edilmiştir (Arıcasoy, 2006). İyi bir yapışma kapasitesi olan epoksiler de yapıştırılmış malzemelerde 230 °C' ye varan dayanımlar sergilenebilir. Oda sıcaklığında daha iyi özellikler sergilemektedir (Demirci, 2015).

2.6. Polimer Malzemelerde Kullanılan Elyaf lar

Polimerlere takviye edilen elyaf lar maliyet, özellik ve kullanım amaçlarına göre farklılıklar göstermektedir. Elyaf çeşitleri olarak cam, karbon ve aramid elyaf lar günümüzde tercih edilen elyaf lardır. Cam elyaf lardan daha iyi özellikler sergileyen ve son zamanlarda kullanımı yaygınlaşmış bazalt elyaf lar, epoksi matrise takviye malzemesi olarak kullanılarak tez çalışmamızda kullanılmıştır.

2.6.1. Bazalt elyaf lar

Polimer kompozitlerde cam elyaf yoğun bir şekilde tercih edilmektedir. Cam elyaf ların yeterli olmadığı durumlarda özellikle dayanımı arttırmak için doğal elyaf lar kullanılabilir. Doğal elyaf ların düşük yoğunluk, düşük maliyet, kullanılan ağırlığa göre yüksek dayanım, enerji absorpsiyonu, elyaf kırılma direnci ve geri dönüştürülebilir gibi özelliklere sahip olması kullanılabilirliğini arttırmıştır. Doğada elyaf formunda

bunulup sonradan elyaf haline getirilen doğal elyafların atık malzeme durumunda bile tekrar kullanımı mümkündür (Demirci, 2015).

Cam elyaflara göre daha üstün özellikler sergileyen karbon elyafların maliyeti göze çarpmaktadır. Karbon elyafların polimer matrisler ile yapışma eğilimi (adezyon) oldukça düşüktür. Tüm bu durumlar göze alındığında düşük maliyetli ve iyi mekanik özelliklere sahip bir malzeme arayışı ortaya çıkmıştır (Manikandan ve ark., 2012). Bu arayışları sonucunda takviye malzemesi olarak bazalt elyaflar ön plana çıkmıştır.

Bazalt; koyu veya siyah renkte, donmuş lav olan volkanik kayalardan elde edilen, dayanıklı ve tok elyaf üretimine uygun bir malzemedir. Bazalt kayalar ilk olarak Romalılar tarafından dayanıklılığından dolayı yol yapımında kullanılmıştır (Quagliarini ve ark., 2012). 1923 yılında A.B.D' de Paul Dhe tarafından patentlenen bazalt elyaflar, II. Dünya savaşından sonra farklı ülkeler tarafından ekstrüzyon yöntemi ile askeri, havacılık ve uzay sahalarında kullanılmıştır (Pavlovski ve ark., 2007; Colombo ve ark., 2012; Quagliarini ve ark., 2012). 1995 yılına kadar sivilleştirilmeyen bazalt elyaflar ile ilgili çalışmalara bu yıldan itibaren başlanmıştır (Colombo ve ark., 2012) .

Günümüzde A.B.D, Çin, Rusya ve bazı Avrupa ülkeleri tarafından bazalt elyaf üretimi gerçekleştirilmektedir. 1350°C-1700°C sıcaklıkları arasında platinyum/ rodyum potalarda eritilen bazalt kayaların, alt haznede bulunan meme deliklerinden akıtılıp iplik haline getirilmesi ile bazalt elyaflar elde edilir. İplik haldeki bazalt elyaflar 2000-5000 m/dk hızındaki tamburlar aracılığıyla sarılırlar. Hızlı soğutulmaları sonucunda ise camsı amorf yapıda olmaktadır. Elyaf çapları 9-13 µm aralıklarında bazalt elyaf üretimi gerçekleştirilebilmektedir (Colombo ve ark., 2012; Czigány ve Deák, 2012; Manikandan ve ark., 2012; Quagliarini ve ark., 2012; Zhu ve ark., 2012).

Bazalt elyafların üretiminde ilave katkı malzemesi içermemesi, ek maliyet getirmemesi ve çevre atığının az olması ile karbon ve cam elyaflara göre çevreci ve doğal bir üretim sağlamaktadır (Sfarra ve ark., 2013).

E-cam elyafların ana birleşiminde Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , SiO_2 bulunmakta iken bazalt elyaflarda Al_2O_3 , CaO , SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O , Na_2O ve TiO_2 bileşimleri yer almaktadır (Deák ve Czigány, 2009; Kim ve ark., 2011; Manikandan ve ark., 2012; Zhu ve ark., 2012). E-cam elyaflar ile bazalt elyaflar benzer kimyasal içeriklere sahiptirler. Mekanik özelliklerin farklılık göstermesinde bazalt elyafların içerdiği farklı bileşimler göz çarpmaktadır. Bazalt elyaftaki Fe_2O_3 bileşimi elyaf renginin koyu olmasını sağlamaktadır (Deák ve Czigány, 2009).

Bazalt elyaflar -200°C ile 600°C sıcaklık aralığında mekanik özelliklerinde minimum kayıp ile çalışma fırsatı sunmaktadır. Yüksek dayanım, elastisite molülü ve darbe direnci gibi özellikleri ile diğer elyaflara göre alternatif oluşturmaktadır (Kim ve ark., 2011; Manikandan ve ark., 2012).

Bazalt elyafların en önemli özelliklerinden biriside ısı dirençlerinin yüksek olmasıdır. Bu özelliğinden dolayı ısı yalıtım malzemelerinde tercih edilmektedir ve ses (gürültü) izolasyonu gibi alanlarda da kullanılarak diğer elyaflardan üstünlüklerinin ortaya koymaktadırlar. Elektrik yalıtımında kullanılabilir olması ile yer altı döşemelerinde, kimyasal dirençlerinin yüksek olması ve nem absorpsiyonunun düşük olmasından dolayı atık sanayisinde ve deniz ekipmanlarında kullanım sağlayarak avantajlarını arttırmışlardır (Colombo ve ark., 2012; Quagliarini ve ark., 2012).

Bazalt elyafların UV ışınlarına karşı yüksek direnç göstermesi ve bozulma direncinin iyi olması uygulama sahasını genişletmiştir.

Bazalt kayaçlar sadece elyaf formunda kullanılmamakta toz olarak balatalarda kullanılmaya başlanmıştır. Otomotiv sektöründe balatalarda sağlığa zararlı ve zehirli asbestonun yerine yüksek aşınma dirençli ve iyi ısı yalıtıma sahip bazalt tozlar tercih edilmektedir (Colombo ve ark., 2012).

Çizelge 2.1. Bazalt, Karbon ve E-Cam elyafların mekanik özellikleri ve birim maliyetlerinin karşılaştırılmaları (Pavlovski ve ark., 2007; Colombo ve ark., 2012).

Takviye Malzemeleri	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Uzama Miktarı (%)	Yoğunluk (gr/cm^3)	Maliyet (gr/\$)
Karbon Elyaf	4800	230	1,48	1,75	30
Bazalt Elyaf	3200	109	2,31	2,6-2,7	2,5
E-cam Elyaf	2600	74	2,05	2,5-2,6	1,1

Çizelge 2.1' de, bazalt elyaflar E- cam elyaflardan daha iyi mekanik ve termal özellikler sergilediği, karbon elyafların mekanik özelliklerinin yüksek olmasına rağmen maliyet ve hafiflik açısından bazalt elyafların alternatif olduğu görülmektedir (Wu ve ark., 2010).

Bazalt elyaflarda Al_2O_3 bileşimin fazla olması ve cam elyafların içermediği Fe_2O_3 , K_2O , MgO , Na_2O ve TiO_2 gibi seramiklerin fazlalığı, bazalt elyafların daha yüksek mukavemete sahip olmasını sağlamıştır. Bazalt elyafların elyaf çaplarının ($9-13 \mu\text{m}$) küçük olması daha yüksek mekanik özellikleri ihtiva etmesini sağlamıştır (Deák ve Czigány, 2009).

Bazalt elyaflar iyi bir elyaf/matris ara yüzey oluşturarak diğer elyaflara göre daha iyi adhezyon kuvveti sağlamaktadır (Wu ve ark., 2010). Bazalt elyafların % uzama miktarlarının fazla olması farklı bir avantaj sağlamaktadır (Wu ve ark., 2010; Sarasini ve ark., 2014).

Bazalt elyaflar ile E-cam elyafların ASTM 2343 standardına göre mekanik performansları incelendiğinde, bazalt elyafların daha iyi mekanik özellik ve daha yüksek elastisite modülüne sahip olduğu görülmüştür (Pavlovski ve ark., 2007).

Bazalt elyaflar ile ilgili literatür çalışmalarını incelediğimizde bazalt elyafların daha avantajlı özellikler sunduğunu görüyoruz. Bu avantajları göz önünde bulundurarak tez çalışmasında filaman sarım yöntemiyle üretilmiş bazalt elyaf takviyeli kompozit borular tercih edilmiştir.

2.6.2. Bazalt elyaflar ile ilgili literatür çalışmaları

(Shi ve ark., 2014) cam, karbon ve bazalt elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlere farklı çevrim sayılarında donma-erime çevrim deneyleri uygulamışlardır. Deney sonucunda çevre şartlarında donma-erime direncini, çekme ve kayma dayanımlarını belirlemişlerdir. Cam elyafların çekme ve kayma dayanımlarında en fazla kaybı gözlemlediklerini, 300 donma-erime çevrim sayısında bazalt elyafların en düşük kaybı gösterdiğini belirtmişlerdir.

(Subagia ve ark., 2014) bazalt ve karbon elyaf kumaşlarından farklı tabaklarda ürettikleri hibrit kompozitlere üç nokta eğme deneyi uygulamışlardır. Bazalt kumaşların ilavesi ile karbon elyafın düşük % sehim miktarının arttığını belirtmişlerdir.

(Sarasini ve ark., 2014) bazalt/ epoksi hibrit ile karbon/epoksi kompozitlere 5-12,5 ve 25J enerjilerinde düşük hızlı darbe deneyleri ve darbe sonrası numunelere üç nokta eğme deneyleri uygulamışlardır. Karbon takviyeli kompozitlerdeki hasar alanının daha az olduğunu belirtmişlerdir. 25J darbe enerjisinde yapılan deneyde bazalt takviyeli kompozit numunelerin delinmediğini, karbon takviyeli kompozit numunelerin ise delinme durumunun olduğunu ifade etmişlerdir. Sonuç hasarları olarak karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf kırılması hasarı, bazalt elyaf takviyeli kompozitlerde ise elyaf kırılması, delaminasyon, elyaf sıyrılması hasarları görülmüştür.

(Petrucci ve ark., 2013) bazalt, cam, keten ve kendir elyaflar ile ürettikleri hibrit kompozitlerin eğme, çekme ve tabakalar arası kayma dayanımlarını incelemişlerdir. Üretilen hibrit kompozitlerin bazalt kompozitlerden düşük mekanik özellik gösterdiğini

ifade etmişlerdir. Bazalt takviyeli hibrit kompozitlerde mekanik özelliklerin iyileştiğini belirtmişlerdir.

(Yeboah ve ark., 2013) bazalt elyaf takviyeli epoksi matrisli çubuklara kayma ve sıyrılma testleri uygulamışlardır. Deney sırasında ahşap sütunlar ile ara yüzey etkileşimlerini incelemişlerdir. Bazalt elyafların deney sonucunda ahşap ile iyi bir ara yüzey oluşturduğunu belirtmişlerdir.

(Sfarra ve ark., 2013) bazalt ve cam elyaf takviyeli kompozitlere 7,5-15 ve 22,5J enerjilerinde düşük hızlı darbe deneylerini yapmışlar ve oluşan hasarı yorumlamışlardır. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerde darbe sırasında bombeleşmenin daha az olduğunu belirtmişlerdir. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf kırılma hasarı, cam elyaf takviyeli kompozitlerde delaminasyon ve elyaf kırılma hasarları daha çok gözlemlenmiştir.

(Zhang ve ark., 2012) polybutylene succinate (PBS) matris malzemeye %3 ile %15 aralığında bazalt elyaf takviyesi yapmışlar ve üretilen kompozit malzemeye üç nokta eğme ve darbe testleri uygulamışlardır. Bazalt elyaf takviye oranının artışıyla eğilme dayanımının da arttığını belirtmişlerdir. Takviye edilen bazalt elyaf oranındaki artış ile darbe dayanımında da artış gözlemlenmiş, %3 bazalt elyaf takviye oranında ise düşme gözlemlenmiştir.

(Manikandan ve ark., 2012) bazalt ve cam elyafları asit (H_2SO_4) ve baz ($NaOH$) ile iyileştirme yapılarak ve yapılmadan polyestere matris malzemeye takviye edilerek çekme, darbe dayanımı ve tabakalar arası kayma testleri uygulanmıştır. İyileştirme yapılmayan kompozitlerde bazalt elyaflı kompozitlerin daha iyi çekme dayanımı gösterdiğini (%9,88), iyileştirme sonrası ise çekme dayanımlarının %24,5 oranında arttığını belirtmişlerdir. Baz ile iyileştirme yapılan kompozitlerde ise %34,45 oranında bir artış görülmektedir. İyileştirme yapılmayan kompozitlerde bazalt elyaflı kompozitlerin %32,05 oranında daha fazla tabakalar arası kayma dayanımı gösterirken, bu oran asit ile iyileştirme sonrası %41,47'e, baz ile iyileştirme sonrası ise %44,24'e yükselmiştir. İyileştirme yapılmayan kompozitlerde bazalt elyaflı kompozitlerin %63,26 oranında daha fazla darbe enerjisi gösterirken, bu oran baz ile iyileştirme sonrası %89,2'ye, asit ile iyileştirme sonrası ise %92,51'e yükselmiştir. Bazalt elyafların daha iyi mekanik özellikler sergilemesini içerdiği Al_2O_3 ve SiO_2 miktarlarının fazla olmasına bağlamışlardır. Sonuç olarak bazalt elyafların matris malzeme ile daha iyi ara yüzey oluşturduğunu belirtmişlerdir.

(Dorigato ve Pegoretti, 2012) bazalt, cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerin çekme ve yorulma davranışlarını incelemişlerdir. Cam elyaflı kompozitlerin çekme dayanımının daha yüksek olduğunu, bazalt elyaflı kompozitlerin ise yorulma ömürlerinin daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

(Zhu ve ark., 2012) bazalt elyaf takviyeli kompozitleri farklı darbe enerji seviyeleri test etmişlerdir. Darbe enerjilerinin yüksek olmasının, %-şekil değiştirme miktarlarının fazla olmasından kaynaklandığı ifade etmişlerdir. Bazalt elyafların dinamik darbe yükleri altında iyi performans sergileyeceğini belirtmişlerdir.

(Colombo ve ark., 2012) bazalt/epoksi ve bazalt/vinilester kompozitlere yorulma, çekme, basma ve DCB deneyleri yapmışlardır. Epoksi matrisli kompozitlerin mekanik özelliklerinin daha iyi olduklarını belirtmişlerdir. Epoksi matrisli kompozitlerin daha iyi çekme-basma dayanımı ve elastisite modülü gösterdiğini ifade etmişlerdir. Epoksi matrisin bazalt elyaflarla daha iyi özellikli ara yüzey oluşturduklarını belirtmişlerdir.

(Quagliarini ve ark., 2012) ürettikleri bazalt/vinilester ile cam elyaf çekme çubukları ve halatlarının çekme dayanımını karşılaştırmışlardır. Bazalt elyafların elastik modüllerinin ve çekme dayanımlarının daha iyi olduğunu belirtmişlerdir.

(Kim ve ark., 2011) deneylerinde bazalt elyafların yüzeylerini oksijen plazma ile değiştirerek temas açılarını düşürmüşlerdir. Sonuç olarak epoksi ile ıslatılabilirliğini iyileştirmeyi amaçlamışlardır. DCB ile tabakalar arası kırılma tokluklarını belirlemişlerdir. Bazalt elyafların yüzeylerinde yapılan iyileştirme sonucunda tabakalar arası kırılma tokluğunda %16'lık artış gözlemlenmiştir. Gözlemlenen artış ile ıslatılabilirliğin artmasıyla, ara yüzey dayanımında artığını belirtmişlerdir.

(Fiore ve ark., 2011) tek yönlü bazalt elyaf kumaşlar ile bağımsız yönlendirilmiş cam elyaf kumaşları birleştirerek ürettikleri hibrit kompozitlere çekme ve üç nokta eğme deneyleri yapmışlardır. Bazalt elyaf kumaşlarının tabaka sayısının artmasıyla kompozitlerdeki mekanik özelliklerin iyileştiğini belirtmişlerdir.

(Wei ve ark., 2011) cam/epoksi ile bazalt/epoksi kompozitleri deniz suyu konsantrasyonunda farklı günlerde bekleterek çekme, eğme dayanımlarındaki değişimi gözlemlenmişlerdir. DCAT testi uygulayarak elyaf/matris ara yüzey etkileşimini yorumlamışlardır. Korozif ortamda bekleme süresinin artmasıyla çekme ve eğme dayanımlarının azaldığını belirtirlerken, 10 gün bekleme süresinde bazalt kompozitlerin daha iyi dayanım gösterdiğini belirtmişlerdir. DCAT testi sonucunda bazalt elyafların daha yüksek serbest yüzey enerjilerine sahip olduklarını ifade etmişlerdir. Bazalt elyaflı

kompozitlerin korozyon direncinin fazla olmasını içerdikleri TiO_2 , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O bileşimleri ile ilişkilendirmişlerdir.

(Dehkordi ve ark., 2010) aynı kumaş içerisine bazalt ve naylon elyafları hibritleme yaparak hibrit kompozitler üretilmiştir ve üretilen kompozitlere darbe deneyi gerçekleştirmişlerdir. Kompozit içerisindeki naylon miktarının artışıyla darbe direncinin düştüğünü, hasar tipi olarak da elyaf kırılmasından delaminasyon hasarına dönüştüğü belirtilmiştir.

(Wu ve ark., 2010) cam, karbon, bazalt, polyparaphenylenl benzobisoxazole (PBO) elyafları ve bazalt/karbon cam/karbon hibrit elyafları epoksiye ilave etmişler, üretilen kompozitlere %55-%93 dayanım oranlarında yorulma deneyi uygulamışlardır. Bazalt/karbon hibrit kompozitlerin, cam/karbon hibrit kompozitlere göre 4 kat daha fazla dayanım sergilediğini görülmüştür. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin karbon/bazalt hibrit kompozitlere göre 2,5 kat daha fazla çekme dayanımı sergilediği belirtilmiştir. Bazalt/karbon hibrit kompozitlerin düşük maksimum gerilme oranlarında daha iyi yorumla ömrü gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bazalt elyafların yüzey pürüzlülüğünden dolayı epoksi ile iyi bir ara yüzey oluşturduğunu, bu nedenle özellikle cam elyaflara göre daha iyi performans göstereceklerini belirtmişlerdir.

(Deák ve Czigány, 2010) kırılmış bazalt elyafları, polyamid 6 matris malzemeyi ilave etmişler ve üç nokta eğme ile çekme deneyleri gerçekleştirerek elde edilen darbe enerjileri verilerini karşılaştırmışlardır. Darbe enerjileri, eğme dayanımları ve çekme dayanımlarında 2 kat iyileşme olduğunu belirtmişlerdir.

(Wei ve ark., 2010) bazalt ve cam elyaf takviyeli kompozitleri asit (HCl) ve baz (NaOH) içerisinde bekleterek çekme dayanımlarını gözlemlemişlerdir. Bazalt elyaf takviyeli kompozitlerin yüksek korozyon dirençlerinden dolayı çekme dayanımlarının yüksek olduğunu ifade etmişlerdir.

(Wang ve Wu, 2010) karbon, bazalt, karbon/çelik, bazalt/çelik ve yüksek dayanımlı çelik halatların, köprülerde kullanılabilirliklerini incelemişlerdir. Karbon elyafların hafifliği, çeliklerin korozyon dirençlerinden dolayı bazalt elyaf ve hibritleri kullanmayı amaçlamışlardır. Maliyet açısından kıyaslama yapıldığında bazalt elyaf halatlar ile çelik halatların yakın, karbon elyafların maliyetlerinin yüksek olduğunu ve karbon elyaflar ile çeliklerin hibritlenerek bu maliyetin düşürülebileceğini belirtmişlerdir. Çelik halatların bazalt elyaflar ile hibritlenmesi sonucu gerekli korozyon direnci sergileneceğini ifade etmişlerdir.

(Deák ve Czigány, 2009) bazalt, kırılmış bazalt ve cam elyafların elyaf çaplarının mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Elyaf çaplarındaki küçülme ile bazalt elyafların elastisite modüllerinin ve çekme dayanımlarının arttığını belirtmişlerdir. Kimyasal bileşimlerini incelediklerinde bazalt elyafların cam elyaflarda bulunmayan TiO_2 , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O gibi bileşenleri ihtiva ettiğini belirtmişlerdir. Ayrıca cam elyaflardan daha fazla Al_2O_3 ve SiO_2 içeren bazalt elyafların daha iyi mekanik özellikler sergileyeceğini belirtmişlerdir.

(Wang ve ark., 2008) aynı kumaş içerisine bazalt ve aramid elyafları hibritleme yaparak hibrit kompozitler üretilmiştir. Farklı darbe hızlarında enlemsel ve boylamsal olarak farklı yönlerdeki absorbe ettikleri darbe enerjilerini yorumlamışlardır. Boylamsal yöne göre enlemsel yönde daha iyi mekanik özellikler olduğunu, ihtiva edilen bazaltların yapıyı sünekleştirdiğini belirtmişlerdir.

(Pavlovski ve ark., 2007) cam, karbon ve bazalt elyaf takviyeli epoksi matrisli filaman sarım kompozit borulardan üretilen halkalara halka çekme deneyi uygulamışlardır. Bu deneyi SCC test metodu ile gerçekleştirmişlerdir. Bazalt/epoksi halkaların cam/epoksi halkalara göre daha iyi çekme dayanımı ve elastisite modülü sergilediği belirtilmiştir. Karbon/epoksi halkaların daha iyi mekanik özellikler göstermesine rağmen maliyetlerin yüksek olması nedeniyle çalışmalarda diğer kompozitlerin kullanılabilirdiğini ifade etmişlerdir. Sonuç olarak bazalt elyafli kompozitlerin mekanik özelliklerinin doğalgaz depolama ve taşıma tanklarında kullanılabilirliğini özellikle rapor etmişlerdir.

3. DÜŞÜK HIZLI DARBE VE HASAR ANALİZİ

3.1. Düşük Hızlı Darbenin Mekanîği

İki cismin çarpışan yüzeyleri bir araya geldiğinde ufak bir temas noktasında basınç değeri yükselir. Temas olan süre zarfında temas edilen alandaki basınç önce deformasyon daha sonra ise nüfuziyet meydana getirir.

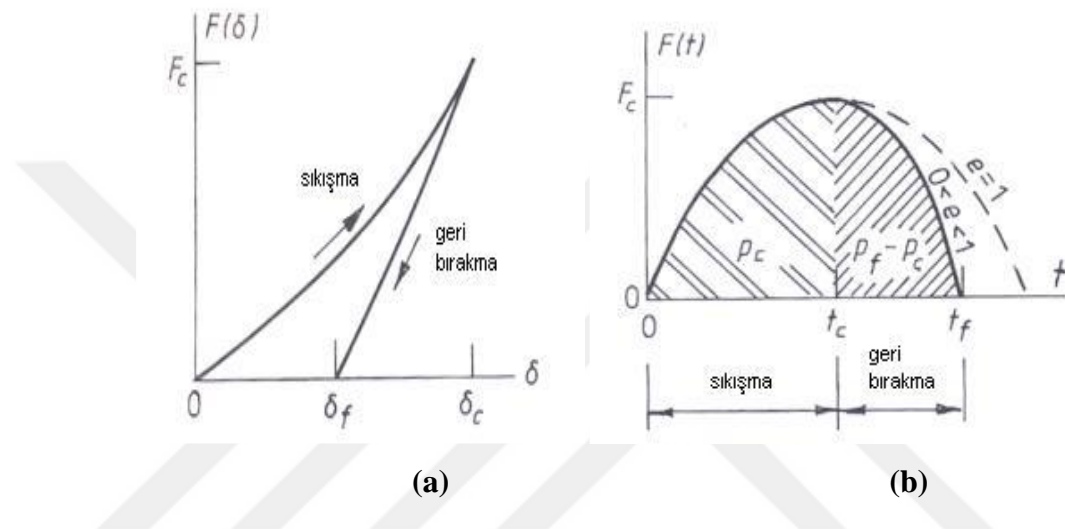
Darbe esnasında ara yüzey veya temas edilen alandaki basınç zıt doğrultuda, cisimlerin birbirine geçmesine engel olan bileşke kuvvete sahiptir. Çarpışma sonrasında iki cisim arasındaki nüfuziyetin artışıyla kuvvette artış gösterir ve bu cisimlerin süratinin azalmasına sebebiyet verir. Darbe sırasında bir noktada temas kuvvetleri her iki cismin hızını sıfıra indirir ve böylece cisimler birbirlerinden ayrılırlar. Katı cisimler arasında meydana gelen darbe esnasındaki temas kuvveti, cisim yüzeylerinin temas alanı meydana getirmesi için gerekli olan yerel deformasyonların sonucudur.

Darbe esnasında oluşan yerel deformasyonlar hem çarpışan cisimlerin sertliğine hem de temas başlangıcındaki çarpma hızına bağlı olarak değişkenlik gösterirler. Düşük hızlı çarpışmalar küçük deformasyonlara sebebiyet veren temas basınçları meydana getirir ve bu temas basınçları sadece temas alanında ufak bir bölgede önemlidir. Yüksek hızlı çarpışmalarda plastik akmanın neden olduğu, krater oluşturma ve dalma şeklinde görülen yerel deformasyonlar görülmektedir. Her iki durumda meydana gelen deformasyonlar temas kuvvetlerinin bir sonucudur (Kara, 2012; Stronge, 2018).

3.1.1. Çarpışmanın sıkışma ve geri bırakma aşamaları

Çarpışan cisimlerin birbirleriyle ilk temasının ardından şekil değişimi gösteren parçacık ne kadar sıkıştırılırsa temas kuvveti $F(t)$ o doğrultuda yükselir. Bu parçacığın sıkışmasını (Stronge, 2018) tarafından yapılan çalışmada δ ile gösterilmiştir. δ' yı hesaplamak için çarpışan cisimlerin kompliyansı hakkında detaylı bilgiye sahip olunmalıdır. Hıza bağlı olarak değişkenlik gösteren kompliyans, en yüksek batma ve en yüksek kuvvet hızının normal bileşeninin sıfır olduğu sırada oluşmaktadır. Şekil 4.1a'da temas kuvvetini batma δ' nın fonksiyonu olarak görürken, şekil 4.1b' de ise temas kuvvetini zamanın fonksiyonu olarak görülmektedir. Şekil 4.1b' de temas süresinin yaklaşımın sıkışma aşaması, geri bırakma aşaması ve başlangıç aşamasına ayrıldığı görülmektedir. Sıkışma aşamasında temas kuvvetleri sayesinde kinetik enerji

deformasyon iç enerjisine dönüştürülür. Temas kuvveti şekil değişimi olan cismin iç deformasyon enerjisini artırır. Zıt ve eşit yöndeki temas kuvveti aynı zamanda çarpışan cisimlerin başlangıç hızlarının düşmesini sağlar. Geri bırakma aşaması temas noktasının hızı sıfır olduğunda, sıkışma aşamasının bitmesiyle başlar. Sıkışma aşamasında elastik zorlama enerjisi depolanır. Depolanan bu enerji geri bırakma aşamasında cisimlerin ayrılmasını sağlayan bir kuvvet ortaya çıkarır ve kuvvet sonucu ortaya çıkan iş kinetik enerji kaybının bir kısmını yerine koyar (Kara, 2012; Stronge, 2018).



Şekil 3.1 (a) Göreceli (izafi) yer değiştirme δ 'nin (b) Zaman t 'nin bir fonksiyonu olarak normal temas kuvveti F (Stronge, 2018)

Geri bırakma aşamasında şekil değiştiren alanın kompliyansı, sıkışma aşamasından daha küçüktür. Bundan dolayı cisimler birbirinden ayrıldığı sırada şekil değişimi olan parçacıkta kalıcı bir deformasyon (δ_f) meydana gelir. Çarpmadan sonraki bir t anında temas kuvvetinin normal bileşeninin Şekil 4.1' de görülen eğrinin altındaki alana eşit, impuls kuvveti olarak da bilinen bir impuls mevcuttur (Kara, 2012; Stronge, 2018).

3.1.2. Normal temas kuvvetinin işi

Normal temas kuvvetinin geri bırakma ve sıkışma esnasında yaptığı iş, Şekil 4.1b' de gördüğümüz ayrılma aşamasında son impuls (p_f) ile sıkışma aşamasında uygulanan impuls (p_c) arasında bağlantı verir. Sıkışma aşaması boyunca normal temas kuvveti şekil değişimi gözlemlenen parçacık üzerinde bir iş yapmaktadır. Bu iş ile şekil değiştirebilen

parçacık deformasyona uğrar ve sahip olduğu iç enerjisini artar. Bu parçacığı sıkıştıran yöne zıt yöndeki temas kuvveti ise sıkışma aşamasında normal hareketin kinetik enerjisini azaltır. Parçacık sıkışma aşamasında enerjinin bir kısmını yutmakta ve geri bırakma aşamasında ise eski haline getirmektedir. Eski haline gelebilen enerji elastik zorlanma enerjisi olarak da anılır (Kara, 2012; Stronge, 2018).

Normal temas kuvvetinin impulsunun türevi $dp = Fdt$ ile ilişkili olduğun bilinerek F kuvvetinin normal bileşeninin sıkışabilen parçacık üzerinde yapmış olduğu iş W_d hesaplanabilir (Kara, 2012):

$$W_d = \int_0^t Fv dt' = \int_0^p v dp' \quad (3.1)$$

3.1.3. Serbest düşme hareketi

Havanın sürtünme kuvvetine gösterdiği direnç sayısal hesaplamalarda dikkate alınmaz. Yerçekimi kuvvetinin yükseklik ile değişkenlik göstermediği varsayılırsa; serbest düşme hareketinde bulunan bir cismin düşme hareketi ivmenin sabit olduğu durumlarda tek boyutlu harekete bağlı özdeşlik gösterir. Bu yüzden ivmenin sabit olduğu koşullarda aşağıdaki hız formülleri kullanılabilir (Şahin, 2011).

$$v = v_0 - gt \quad (3.2)$$

$$v_{ort} = \frac{v_0 + v}{2} \quad (3.3)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + v_0t + y_0 \quad (3.4)$$

$$v^2 = v_0^2 - 2g(y - y_0) \quad (3.5)$$

Serbest düşme esnasında cismin ilk hızı sıfır olduğu sırada;

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.6)$$

3.1.4. Darbe enerjisi

Vurucu kütleinin h yüksekliğindeki konum enerjisi;

$$\Pi = mgh \quad (3.7)$$

Denklem (3.6) ve (3.7) kullanılarak hesaplanmış çarpma hızı ve yükseklik değerleri Çizelge 3.1' de görülmektedir.

Çizelge 3.1. Darbe enerjisine göre çarpma hızı ve yükseklik değerleri

Darbe Enerjisi (J)	Çarpma Hızı (m/sn)	Yükseklik (cm)
15	2,3133	27,3323
20	2,6712	36,4431
25	2,9865	45,5539

3.2. Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Darbe, bir yapı veya malzemenin üzerine çok kısa bir süre içerisinde düşük, orta ve yüksek hızlarda uygulanan dış kuvvetler olarak tanımlanmaktadır. Malzemenin kullanım amacı ve alanına göre maruz kalabileceği darbeler farklılıklar göstermektedir. Darbeler genel olarak düşük ve yüksek hızlı darbe olarak gruplandırılmasına rağmen darbe çeşitlerini sınıflandırmak için net bir veri söz konusu değildir (Mili ve Necib, 2001). Milli ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda malzeme özelliklerine, hedef-çarpan cismin rijitliğine ve çarpan cismin kütesine bağlantılı olarak 1-10 m/s arasındaki hızları düşük hızlı darbe olarak tanımlamışlardır.

Düşük hızlı darbeler, çarpışma esnasında (temas anında) malzemede deformasyona neden olan darbelerdir ve düşük enerjili darbeler olarak da anılırlar. Düşük hızlı darbede, içyapıda darbeye karşı tepki verebilmek için yeterli olan temas süresi yeterlidir. Bu sebep ile hedefin dinamik yapısal cevabı önem arz etmektedir (Ceyhun ve Turan, 2003).

Yüksek hızlarda darbeler, darbe hızı 74,1 m/s ve balistik limit gösteren darbelerdir (Jenq ve Mo, 1996). Yüksek hızlı darbenin olduğu yerlerde, parçanın hız değeri büyük olduğu durumlarda parça kompozit malzemeye saplanabilir veya delebilir. Bütün darbe uygulamalarında darbeye maruz kalan malzeme, darbeye karşı cevabı kendisi verir. Metal ve metal alaşımlarından bu cevap plastik şekil değiştirme ve elastik uzama biçimindedir. Metal ve alaşımlarda darbe hasarı genellikle çarpma yüzeyinde başladığı sırada hızlı ve kolay bir şekilde belirlenebilmektedir. Metal türevli malzemelerde darbe hasarı tehlikeli bir durum olarak yorumlanmaz. Bunun sebebi metallerin plastik şekil değiştirme özelliğinin büyük oranda enerjiyi soğurmasıyla ilgilidir. Metaller sabit gerilme altında sertleşmeden akma özelliği sergilerler. Bu yüzden beklenmedik ve ani bir kopma

gözlemlenmez. Kompozit yapılarda ise oluşan hasar, darbeye maruz kalan yüzeyde olacağı gibi farklı yüzeylerde de gözlemlenebilir. Kompozit bir malzemede darbelerin malzemede sebep olacağı hasarı öngörebilmek, simülasyonunu yapmak ve malzemeye ait dinamik özelliklerin bilinmesi gerekmektedir (Kara, 2012).

3.3. Darbe Testleri

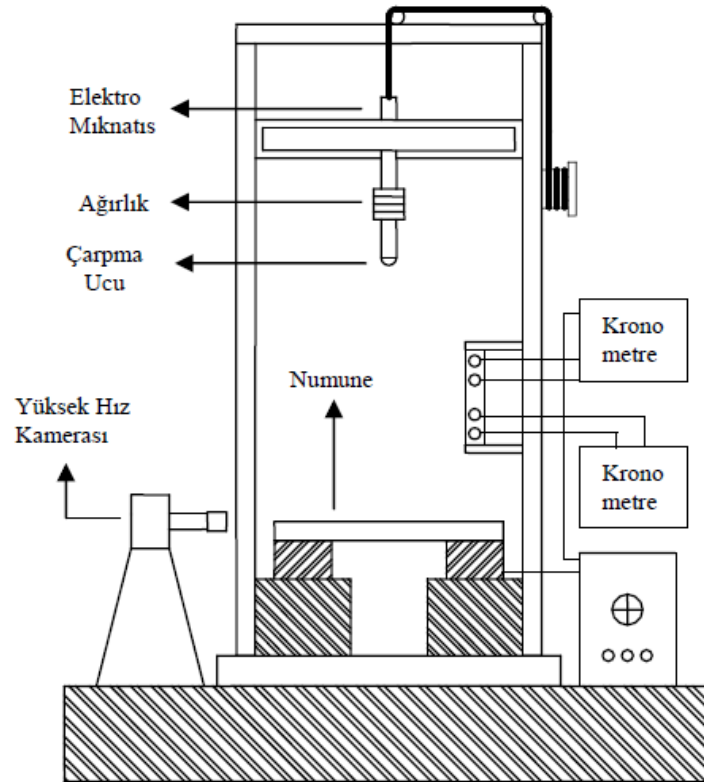
Kompozit malzemelerin darbeye karşı gösterdikleri tepkiyi inceleyebilmek için kabul edilen test yöntemi veya bir standart yoktur. Farklı deneyler sonucunda farklı sonuçların ortaya çıkaran bu durum, kullanılabilir bir metod geliştirme girişimi doğurmaktadır. Bu olumsuzluklara rağmen darbe davranışlarını incelemek amacıyla bazı yöntemler yaygın olarak tercih edilmektedir. Bunlar;

- Ağırlık düşürme testleri,
- Ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu,
- Sarkaç testleri (Izod, Charpy ve Pendulum)
- Yüksek hızlı darbe testleri (Basınçlı hava ve Split-Hopkinson) şeklinde sıralanabilir (Kara, 2012).

3.3.1. Ağırlık düşürme darbe testi

Ağırlık düşürmeli darbe testi, malzemelerin dinamik özelliklerinin anlaşılabilmesi için yaygın olarak kullanılan test tekniklerinden biridir. Darbe enerjisi ve numuneye çarpma hızını istenilen biçimde ayarlayabildiğimiz bir metottur. Bu metotta istenilen ağırlık herhangi bir yükseklikten malzeme üzerine düşürülebilir. Bu yöntem ile malzemeye tekrarlı darbe, saplanma ve delinme testleri yapılabilmektedir.

Bu test cihazlarında yer değiştirme ve ivmeyi ölçme gibi özellikler bulunabilmektedir. Bu özellik ile yer değiştirme, yük ve ivmenin çarpma sırasındaki değişimini kaydetme imkanı sunmaktadır. Kayıt edilen veriler darbe kuvveti ve enerjisinin zaman ile değişimini ortaya koymamızı sağlar. Elde edilen veriler soğurulan enerji ve uç noktadaki ağırlık gibi özellikler ile numunede oluşan kırılma arasında bağlantı kurmamızı sağlar. Şekil 3.2' de yaygın olarak kullanılan ağırlık düşürme cihazı şematik bir resim şeklinde görülmektedir. Ağırlık düşürme test cihazı yük ölçme cihazları, yüksek hızlı kamera ve çarpışmadan önce tüpün hızını belirlemeyi sağlayan fotoelektrik hücrelerden meydana gelmektedir (Ceyhun ve Turan, 2003; Kara, 2012).



Şekil 3.2. Ağırlık düşürme test düzeneği (Ceyhun ve Turan, 2003).

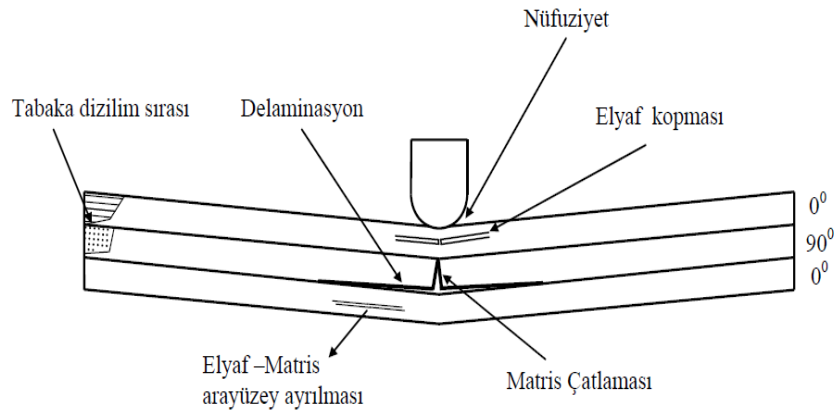
Kompozit malzemelerin darbe özellikleri çarpan cismin enerjisi, hızı ve geometrisi, deney numunesinin geometrisi ve sabitlenmesi ile darbe deney cihazının özelliklerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Darbe özelliklerinin incelenmesi yorumlanmasında bu hususlar dikkate alınmalıdır (Ceyhun ve Turan, 2003).

3.4. Tabakalı Kompozit Malzemelerde Darbe Sonrası Görülen Hasar Türleri

Kompozit malzemelerde kalınlık boyunca bir yükleme yoksa tabakaya veya elyafa dik yükleme durumu yani enine yükleme kompozitlerin en hassas oldukları yükleme durumu olarak ifade edilir. Tabakalı kompozitlerde maksimum darbe hasarı enine doğrultuda oluşur. Bunun sebebi kompozit malzemelerin tabaka düzlemine göre kalınlık doğrultusunda daha zayıf olmasıdır. Kompozit malzemeler enine darbe sonrasında yük taşıma kapasitelerinde ciddi düşümlere neden olan hasarlara uğrarlar. Kompozitlerin darbe yüklerine karşı verdikleri yanıt karışıktır. Bu yanıt, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin sahip oldukları özellikleri kadar yapılandırılmasından kaynaklıdır. Bununla birlikte verilen yanıt çarpan nesnenin kütlesine, hızına ve

geometrisine bağı olarak değişkenlik gösterebilir. Darbe yüklemesi sırasında çarpan cismin zayıf veya gözle görülemeyen birçok hasar modları vardır. Düşük hızlı darbeler deneylerinde tabakalar üzerinde gözle görülebilen hasarlar meydana gelmeyebilir. Ancak tabakalar içerisinde elyaf kopması, delaminasyon ve matris çatlaması gibi hasarlara neden olabilirler. Oluşan hasarlar malzeme mukavemetinde ciddi bir düşüşe neden olurlar. Bu hasarlar rijitlikte azalmaya neden olabilir ancak bu azalma ihmal edilebilir seviyededir. Tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı malzemede meydana gelen ilk kopmalara kesme ve gerilmeleri neden olur. Darbe sırasında kompozit malzemeye iletilen enerjinin oranı, malzemenin iletilen enerjiyi absorbe edebilmesi için ortaya çıkacak hasar modlarını gösterecektir (Ceyhun ve Turan, 2003; Kara, 2012).

Kompozit malzemelerde darbenin etkisiyle oluşan hasarlar; elyaf hasarları, tabakalar arası ayrılma ve matris çatlağını şeklindedir. Düşük hızlı darbelerde matrisin çatlaması ile oluşan hasarlar tabakalar arası ayrılma (delaminasyon) ile devam eder. Artan darbe enerjisi ile delaminasyonlar elyaf hasarlarının oluşmasını sağlar. Elyaf hasarları ile birlikte vurucunun numuneye saplanması ve numunenin delinmesi gerçekleşir. Şekil 3.3' de oluşan hasarlar şematik bir resim şeklinde görülmektedir (Kara, 2012).

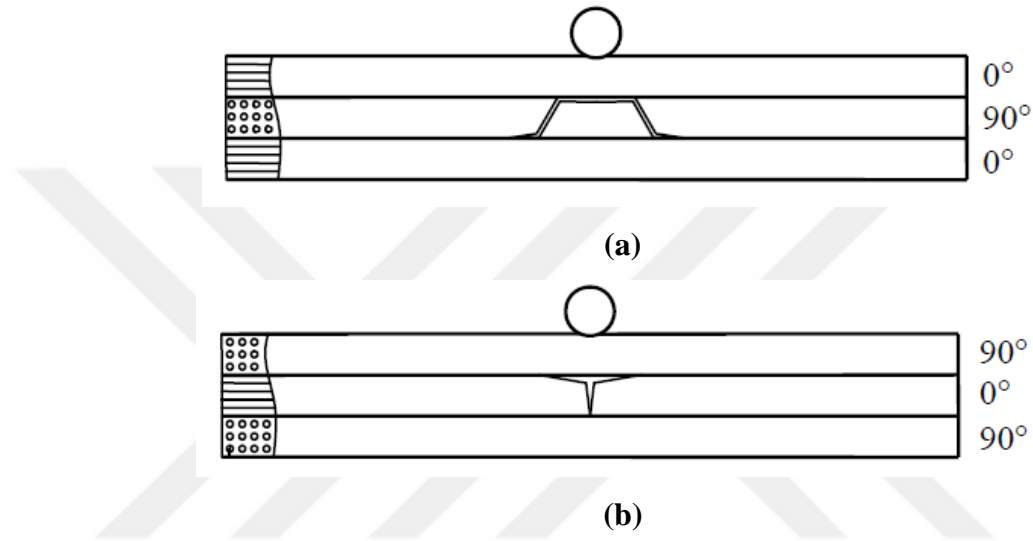


Şekil 3.3 Kompozit malzemelerde darbe sonrası hasar tipleri (Kara, 2006).

3.4.1. Matris hasarları

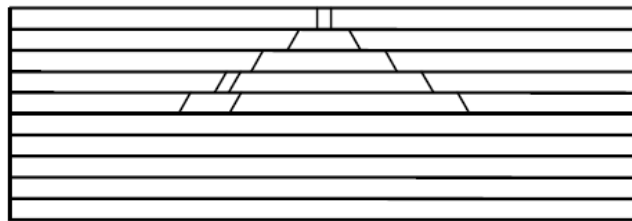
Düşük hızlı darbe sonucu kompozitlerde ilk oluşan hasar matris hasarıdır ve matriste çatlak olarak görülmektedir. Tek yönlü elyaflardan meydana gelen tabakalarda elyaf doğrultusuna paralel düzlemlerde matris çatlamaları oluşur. Darbe sonrasında tespiti zor matris çatlakları da oluşabilmektedir. Matris çatlaklarının darbe sonrası incelenen

özelliklerde fazla bir etkisi olmadığından bu çatlakları belirlemeye gerek yoktur. Tabakalı kompozit malzemelerde hasar matris çatlağı ile başlar ve matris çatlakları delaminasyonları doğurur. Şekil 3.4’ de kayma çatlakları ve çekme çatlakları olmak üzere iki çeşit matris çatlağı gösterilmiştir. Çekme çatlakları, düzlemde bulunan normal gerilmelerin tabakanın enine kayma mukavemetini geçtiği zaman oluşur. Kayma gerilmelerinin oluşumunda da enine kayma gerilmelerini etkisi görülmektedir (Kara, 2012).

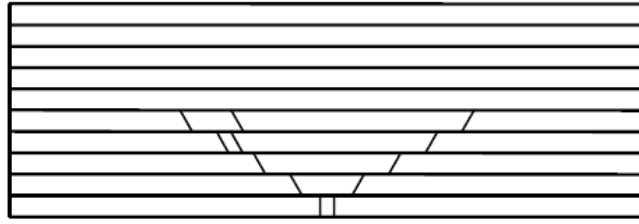


Şekil 3.4 Matris çatlakları (a) çekme çatlağı (b) kayma çatlağı (Abrate, 1998).

Kalın tabakalı kompozitlerde matris çatlakları, oluşan yüksek gerilme sebebiyle vurucunun temas ettiği ilk tabakada oluşur. Oluşan hasar çam ağacı şeklinde bir görüntü oluşturarak yukarıdan aşağıya doğru ilerler (Şekil 3.5a). İnce katmanlı kompozitlerde matris çatlakları, numunenin arka yüzündeki eğilme gerilmeleri sebebiyle son tabakada oluşur. Oluşan hasar ters çevrilmiş çam ağacı şeklinde bir görüntü oluşturarak matris çatlakları ve delaminasyon şeklinde ilerler (Şekil 3.5b) (Abrate, 1998; Kara, 2012).



(a)



(b)

Şekil 3.5 (a) Çam ağacı (b) ters çevrilmiş çam ağacı görünümlü hasar örnekleri (Abrate, 1998).

Kompozit malzemenin darbesinde hasara sebebiyet veren ilk kinetik enerji matrisin mekanik özelliklerinden yüksek oranda etkilenmesine rağmen elyafın özelliklerine bağlı değildir. (Griffin, 1987), beş farklı elyaf ile tek bir matris malzemesini kullanarak ürettikleri beş farklı kompozit malzemeye darbe deneyi yapmışlardır. Sonuç olarak tüm kompozitlerin hasar başlangıç enerjilerinin eşit olduğunu ve matris ağırlıklı hasarın oluştuğunu ifade etmişlerdir.

Polimer bazlı kompozit malzemelerin darbe performansı reçinenin tokluk özellikleri ile doğrudan bağlantılıdır. Bu mekanik özellik, kayma çatlaklarına karşı gösterdiği dirence, gerilme yoğunluğu etkisini düşürme kabiliyetine ve malzemenin şekil değiştirme enerjisine bağlıdır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde termoplastik matris malzemeli kompozitlerin daha fazla tokluğa sahip olduklarını görülmüştür (Dorey ve ark., 1985).

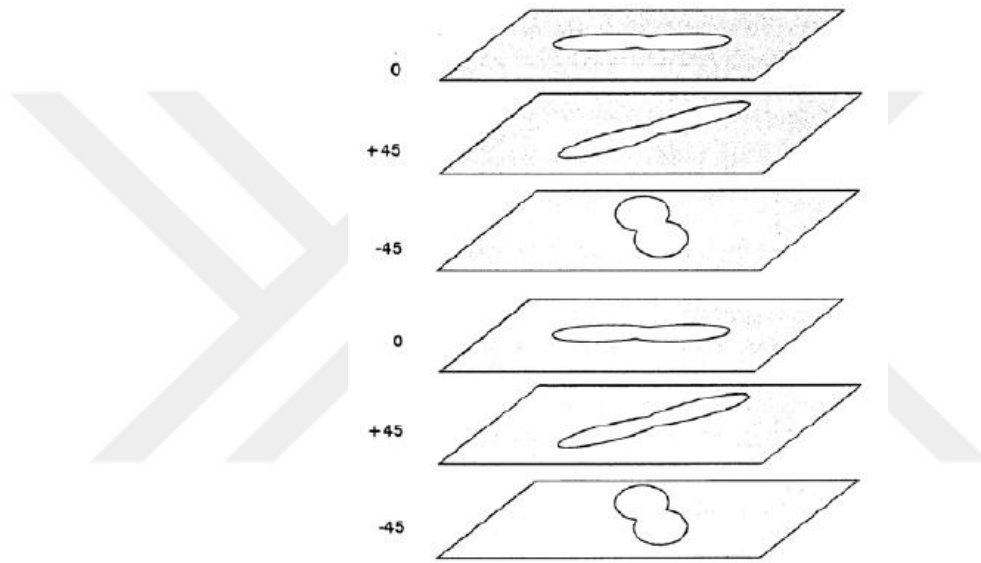
Termoplastik matris malzemeli kompozitlerde matris çatlakları daha az görülmektedir. Termoplastik kompozitlerde oluşan hasarın yayılma eğilimi daha azdır. Kırılma esnasında daha fazla şekil değişimi gözlenen reçineler yüksek darbelere karşı direnç oluştururlar. Bu reçine sistemleri, delaminasyonlara daha az sebep olurlar. Yüksek darbe sonrası bu özelliğinden dolayı bası mukavemetine sahiptirler (Sierakowski ve ark., 1997).

3.4.2. Delaminasyon

Birleşik tabakalar arasında tutunmanın azalmasıyla oluşan, tabakanın mukavemetini düşüren hasarlardır. İncelenen çalışmalar delaminasyonun yalnızca farklı açılarda yönlendirilmiş elyaf tabakalar arasında oluştuğunu belirtilmiştir. Bitişik olan iki tabakada eşit yönlendirme açılı elyaflar kullanılmışsa bu tabakaların ara yüzeyinde ayrılma oluşmamaktadır. Tabakalı kompozitlerde tabakalar arasında çeşitli elyaf

yönlendirmelerinden dolayı tabakaların eğilme rijitlikleri farklıdır. Bu farklılık ve eğilme kaynaklı gerilmeler delaminasyonun en önemli nedenleridir. Çalışmalar incelendiğinde elyaf doğrultusu boyunca tabakanın iç tarafa ve eğilmenin enine doğrultuda dış tarafa eğilimli olduğunu görülmektedir. Katmanlar arasındaki eğilme rijitliklerindeki farklılıklar ne kadar fazla olursa oluşan delaminasyon bölgesi de o kadar fazla olur. Delaminasyon alanı tabaka kalınlığı, sıralanma düzeni ve malzeme özelliklerine göre değişkenlik gösterebilmektedir (Kara, 2012).

Delaminasyon hasarları yer fıstığı ve dikdörtgenler şeklindedir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Delaminasyon alanlarının elyaf yönlendirme açılarına göre şekilleri (Abrate, 1998).

Delaminasyonun başlamasına sebep olan ilk kinetik enerji miktarını belirlemek zor olduğundan bazı testler yapılması gereklidir. Delaminasyon şekillerinin düzensiz olması yönlenmelerini belirlemede zorluk yaratır. Delaminasyon hasarının başlaması için matris çatlağının oluşması gereklidir. Oluşan delaminasyonlar katmanlar arası ara yüzeylerde görülür. Enine darbe yapılmış 0° - 90° - 0° tabakaları için matris çatlaması ve delaminasyon ilişkisi incelendiğinde; üst tabakalardaki çatlaklar ara yüzeye geldiğinde ilerlemeyi durdururlar ve tabakalar arasında delaminasyon hasarı şeklinde ilerlerler. Çatlakların ara yüzeyde ilerlemesinin durması elyaf yönlenmelerindeki farklılıktan kaynaklanmaktadır. Delaminasyon, orta kısımdaki enine çatlama nedeniyle zorlanır. Zorlanma olmayan en alt kısımdaki ara yüzeyde düşey eğilme çatlağının büyümesi delaminasyon oluşumunu başlatır. Delaminasyonlar, matris çatlaklarının oluşturduğu ara

yüzey boyunca katmanlar arasındaki kesme gerilmelerinden ve yüksek düzeydeki düzlem dışı gerilemelerden dolayı Mod I ayrılma şeklinde oluşmaya başlarlar (Kara, 2012).

Meydana gelen delaminasyonun boyutu C-scan ultrasonik tarama cihazı tarafından ölçülür. Kompozit malzemelerde içerisinde oluşan hasarlar birkaç ara yüzeyde gözlemlenmektedir. C-scan ultrasonik tarama cihazı oluşan hasar bölgelerini tek bir düzlemde görüntülemeyi sağlar. Kompozitin tabaka sayısı tek bir düzleme yansıyan bölgeyi etkilemektedir. Her tabaka alanı için alınan deneysel veriler, başlangıç kinetik enerjisine karşı çeşitli çizgiler üzerine düşmektedir (Abrate, 1998; Kara, 2012).

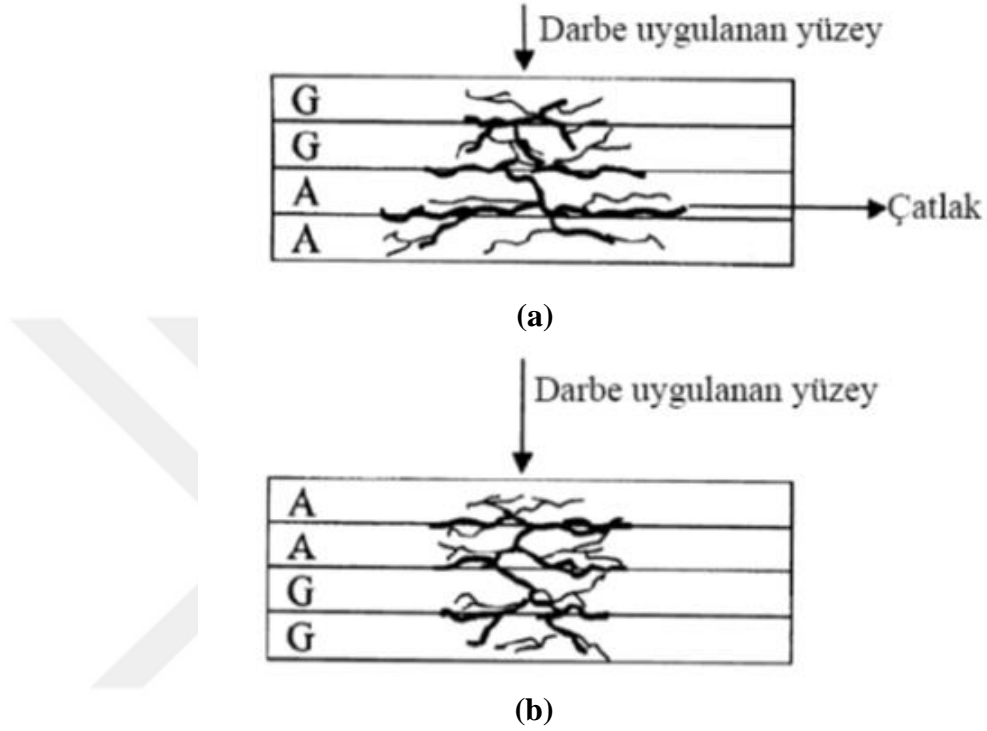
3.4.3. Elyaf hasarı

Kompozit malzemelerde çoğunlukla matrisin çatlaması ve delaminasyonlardan sonra elyaf kopması hasarı gözlemlenir. Elyaf hasarı çarpan nesnenin batması sebebiyle darbe gören yüzeyde oluşacağı gibi darbeye görmeyen yüzeylerde yüksek eğilme gerilmelerinden dolayı görülebilir. İncelenen çalışmalar elyaf şeklinin delaminasyon ve matris çatlağı hasarlarının başlangıcını etkileyen bir faktör olmadığını göstermiştir. Ancak elyaf özellikleri yüksek darbe enerjisi seviyelerinde önemli olmaktadır (Kara, 2012).

Elyaf türü, hasarın kontrol edilmesinde ve hasar toleransının iyileştirilmesinde önemli bir etkidir. Örneğin, aynı darbe enerjisinde, yüksek mukavemetle, kompozit malzemenin enerji absorbe etme kabiliyetiyle ve minimum elyaf kırılması ile sonuçlanır. Bir kompozit malzemenin üretiminde, yüksek kırılma direnci olan bir elyaf, tokluğu yüksek reçine sistemi, dikişli veya örgü tabakalar kullanılarak malzemenin tabakaları arasında uyumlu bir sistem oluşturulur ise o kompozitin darbeye direnci iyileştirilmiş olur (Kara, 2012).

(Park ve Jang, 2001) aramid/cam kompozitler üreterek, darbe uygulanan malzeme yüzeyinde elyaf olup olmama durumlarına göre incelemelerde bulunmuşlardır. Kalın katmanlı kompozitlerde darbe hasarı, darbenin uygulandığı bölgenin yakınlarında bölgesel gerilmelerin oluşması ile başlar. Bu bulgu, darbeye maruz kalan tabaka yüzeyinin tam bir deformasyona uğramadığını göstermektedir. Çünkü deformasyon alt kısımdaki birleşik katmanları sınırlamakta ve alt yüzeydeki katmanlar deformasyonun büyük bir bölümünü karşılamaktadır. Bir kompozit malzemedeki darbe, darbe yüzeyinden daha alt yüzeylere doğru ilerler ve aramid elyaf tabakası darbenin olmadığı alt yüzeyde yer aldığından, bu elyaf tabakaların deformasyonu süresince oluşan darbe enerjisinin

büyük kısmını kompozit malzeme absorbe eder (Şekil 3.7a). Aramid elyaf tabakalar darbe olan yüzeyde yer alırsa ve bu katmanların altında kırılğan yapıda cam katmanlar varsa, bu cam katmanlar aramid elyaf tabakaları arasında yayılmaya eğilimli olan deformasyonu kısıtlayıcı bir etki yapar ve deformasyon yayılmaz (Şekil 3.7b).



Şekil 3.7 Darbe uygulanan yüzeye göre hasar yayılışı, (a) Cam yüzeyden, (b) Aramid yüzeyden (Park ve Jang, 2001).

3.4.4. Elyaf-matris ara yüzey ayrılması

Düşük hızlı darbeye maruz kalan kompozit malzemelerde görülen bu hasar, elyaf-matris ara yüzeyindeki bağın kopması ile gerçekleşir. Bu ara yüzey hasar incelenmesinde elyaf ve matris kadar önemlidir. Oluşan ayrılma, matristen elyafa yük aktarımını düşürür veya tamamen ortadan kaldırır. Bu ayrılma çekme gerilmelerinden kaynaklı genellikle darbe olmayan alt katmanlarda oluşur (Kara, 2012).

3.4.5. Nüfuziyet

Nüfuziyet, çarpan nesnenin üzerindeki dalma ve delme miktarlarını gösteren, hasarın gözle görülebilen bir modudur. Elyaf-hacim oranlarının eşit olduğu çeşitli boyutlardaki malzemelerde çarpan nesnenin nüfuziyet alanı aynıdır (Kara, 2012).

3.5. Kompozit Malzemelerde Düşük Hızlı Darbe Uygulamaları

(Hawa ve ark., 2016) $[\pm 55^\circ]_3$ sarım açılı, 6 tabakalı E-cam elyaf/epoksi kompozit borulara ilk olarak su ile yaşlandırma sonrasında iç basınç altında düşük hızlı darbe testi ve darbe sonrasında patlatma deneyi gerçekleştirmişlerdir. 80°C sıcaklıkta 500,1000 ve 1500 saat su içerisinde yaşlandırmaya tabii tutulan numunelere 5, 7,5 ve 10J enerjilerinde darbe testi yapılmışlar sonrasında ise patlatma deneyi uygulamışlardır. Artan darbe enerjisi ile yer değiştirme ve en yüksek kuvvetin arttığını belirtmişlerdir.

(Demir ve ark., 2015) 55° sarım açılı, 4 tabakalı E-cam elyaf/epoksi kompozit basınçlı kaplara darbe testi uygulamışlardır. Boş basınçlı kaplar ile 25 ve 70°C su ile doldurulmuş kaplara 10, 15, 20, 25 ve 30J enerji seviyelerinde darbe gerçekleştirilmişlerdir. Basınçlı kompozit kapların patlama mukavemetinin enine yönde, tek ve üç kez olmak üzere tekrarlı darbe üzerinde etkisini incelemişlerdir. Boş kapların daha yüksek patlama basıncı gösterdiğini ve tekrarlı yükün patlatma mukavemetini düşürdüğünü ifade etmişlerdir. Sıcaklık artışı ile patlama basıncının azaldığını belirtmişlerdir.

(Uyaner ve ark., 2014) E-cam/ epoksi filaman sarım borulara 5 ve 10J enerji seviyelerinde darbe testleri yapmışlar ve oluşan hasarları incelemişlerdir. Darbe sonrası tüm borulara %30, %35, %40, %50 ve %60 patlatma mukavemetleri şeklinde yorulma testi yapmışlardır. Yüksek darbe enerjisinde yer değiştirmenin, maksimum temas kuvvetinin ve hasarların arttığını, hasar tipi olarak da numune kalınlığı boyunca matris çatlakları ve delaminasyonlar görülmüştür. Artan darbe enerjisi ile birlikte yorulma ömrünün ve patlatma mukavemetinin azaldığını belirtmişlerdir.

(Kara ve ark., 2014) $\pm 55^\circ$ sarım açılı, filaman sarım, ön gerilmeli cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit borulara düşük hızlı darbe deneyi gerçekleştirmişlerdir. Ön gerilmemiş ve 32 bar ön gerilmeleri borulara 5, 10 ve 15J enerji seviyelerinde yapılan deneyde oluşan hasarları yorumlamışlardır. Katmanlar arasında delaminasyon, matris çatlakları, elyaf/matris ara yüzey ayrılmaları ve az miktarda elyaf kırılması hasar tiplerinin oluştuğunu gözlemlemişlerdir.

(Deniz ve ark., 2013) filaman sarım E-cam/ epoksi kompozit borularının farklı iç basınç altlarında deniz suyunun ve darbe yüklemelerinin yorulma ömürlerine etkilerini gözlemlemişlerdir. 3 aşamalı yapılan deneyde, ilk aşamada kompozit borular 3, 6 ve 9 aylık zaman periyotlarında deniz suyunda bekletilmiş, ikinci aşamada 5, 7,5 ve 10J enerji

seviyelerinde darbeye maruz bırakılmış ve üçüncü aşamada ise yorulma testlerine tabii tutulmuşlardır. Darbesiz numunelerde daha yüksek yorulma ömrünün olduğunu, darbe yapılmış numunelerde ise 3 aya kadar arttığını ve sonrasında en yüksek değerde kaldığını belirtmişlerdir.

(Kobayashi ve ark., 2012) karbon elyaf takviyeli kompozit silindir numunelere statik yükleme ve darbe testleri yapmışlardır. Deneyde numune kalınlığının hasar davranışlarına etkisi incelenmiştir. Kalınlık artışıyla birlikte silindirin rijit yapısının iyileştirdiğini ve nüfuziyetten kaynaklı olarak plastik deformasyonun azaldığını ifade etmişlerdir.

(Deniz ve Karakuzu, 2012) $[\pm 55^\circ]_3$ sarım açılı, filaman sarım E-cam/ epoksi kompozit boruların darbe davranışlarında deniz suyunda tutulma sürelerinin etkisini incelemişlerdir. Farklı çaplarda seçilen kompozit boruları 3, 6, 9 ve 12 ay boyunca, %3.50 tuzluluk oranına sahip suni deniz suyunda bekletmişlerdir. Daha sonra 15, 20 ve 25J enerji seviyelerinde darbe testlerine maruz bırakmışlardır. Numune çapının azalmasıyla, kuvvet-yer değiştirme eğrisindeki eğim farklılığının arttığını ve hasar alanının arttığını belirtmişlerdir.

(Deniz ve ark., 2012) $[\pm 55^\circ]_3$ sarım açılı, filaman sarım cam/epoksi kompozit boruların darbe enerji seviyesinin ve numune çapının darbe davranışları üzerine etkisini incelemişlerdir. 50, 75, 100 ve 150 mm çaplı numunelere 15, 20 ve 25J enerji seviyelerinde darbe testlerine maruz bırakmışlardır. Darbe yapılmış ve yapılmamış numunelere aksenal basma testi yapılmıştır. Geniş çaplı boruların daha yüksek enerji absorbe ettiklerini, hasar oranının düşük olduğunu ifade etmişlerdir. Küçük çaplı borularda artan darbe enerjisiyle birlikte maksimum temas kuvvetinin arttığını belirtmişlerdir. Numunelerin çap artışıyla birlikte absorbe edilen enerjinin azaldığını, basma mukavemetinin arttığını göstermişlerdir.

(Sari ve ark., 2012) kompozit boruların darbe enerjilerinin statik hasar basınçları ve yorulma ömürlerin etkisini incelemişlerdir. 100 mm iç çap ve 400 mm uzunluğa sahip numunelere 5, 7,5 ve 10J enerji seviyelerinde darbe testleri gerçekleştirmişlerdir. Darbe yapılmış ve yapılmamış numunelere iç basınç testlerine tabii tutmuşlardır. Enine darbe ile boruların yorulma ömürlerinin azaldığını, darbe enerjisinin artışıyla absorbe edilen enerjinin, maksimum yer değiştirme ve temas kuvvetinin arttığını ifade etmişlerdir.

(Kaneko ve ark., 2008) iç basınç altındaki cam elyaf takviyeli kompozit silindirlerin sonlu elemanlar yöntemi ile darbe davranışlarını incelemişlerdir. İç basıncın

yükselmesiyle patlama tipi hasarların görüleceğini, nüfuziyete sebep olan yüklemenin de arttığını tespit etmişlerdir.

(Wakayama ve ark., 2006) karbon elyaf takviyeli filaman sarım kompozit boruların yüzeylerine katran esaslı üç tip karbon elyaf sarmışlar ve oluşan ürüne üç farklı uca sahip vurucu ile darbe testleri uygulamışlardır. Yanal kesitlerinin incelenmesi sonrasında düşük modüllü karbon elyafların elyaf kırılması hasarını engelliği sonucuna varmışlardır.

(Gning ve ark., 2005) $[\pm 55^\circ]_{10}$ sarım açılı, filaman sarım E-cam/ epoksi kompozit silindirik numunelere darbe testi gerçekleştirmişlerdir. Darbe sonrası oluşan hasarın kompozitin patlama mukavemetini azalttığını ifade etmişlerdir.



4. MATERYAL VE METOT

4.1. BTP/Epoksi Kompozit Boruların Üretimi

İZOREEL Kompozit İzole Malzemeler San. Ve Tic. Ltd. Şti firmasında BTP/Epoksi kompozit boruların üretimi gerçekleştirilmiştir. 11-13 µm elyaf çapına sahip Kamenny Vek Advanced Basalt Fiber 12KV 400 tex bazalt elyaflar kullanılmıştır. Ciba Geigy DGEBA orta viskoziteli epoksi matris malzemesi olarak tercih edilmiştir. Epoksinin kürleşmesini sağlamak amacıyla ağırlıkça %44 oranında sertleştirici malzeme ilave edilmiştir. Filaman sarım metodu çeşitlerinden yaş sarım metodu tercih edilmiştir. Mandreller sarım işlemi başlamadan önce 60°C' ye ısıtılmıştır. Mandrellerin üstüne QZ-13 kalıp ayırıcı madde sürülerek, kürlenmiş kompozitlerin daha kolay çıkarımı sağlanmıştır. Epoksi reçine banyosu 60°C sıcaklığa çıkarılarak, elyafların ıslatılabilirliklerini arttırmak ve sarım işlemini kolaylaştırmak amaçlanmıştır (Demirci, 2015).



Şekil 4.1 CNC filaman sarım makinesi (Demirci, 2015).

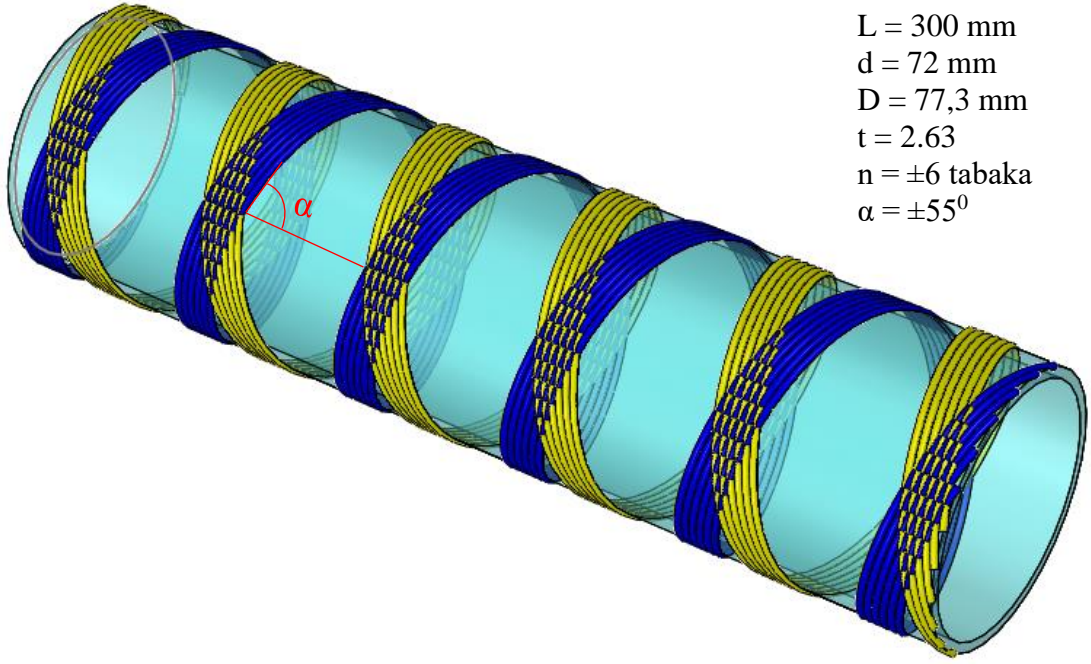
Şekil 4.1' de görülen CNC filaman sarım makinesinin \pm tabaka sayısı, elyaf gerginliği, sarım hızı, elyaf-bant genişliği, sarım açısı parametreleri ayarlanabilmektedir. Bu parametreler girildikten sonra sarım işlemine başlanılmıştır. Üretim parametreleri ± 6 tabaka sayısı, 10N elyaf gerginliği, 600mm/dk sarım hızı, 11m elyaf-bant genişliği ve $\pm 55^\circ$ sarım açısı şeklinde ayarlanmıştır (Demirci ve ark., 2014). Şekil 4.2' de görüldüğü gibi, bazalt elyaf demetleri dönen disk yardımıyla 60°C sıcaklığındaki reçine banyosunda

ıslatılarak, banyo üzerindeki tamburlar arasından geçmektedir. Bazalt elyaf demetleri tamburlar arasından geçtikten sonra 1000 mm uzunluğunda ve 72 mm kalınlığındaki mandrel üstüne $\pm 55^\circ$ sarım açısında sarılma işlemi yapılmıştır. CNC filaman sarım makinesi ± 6 tabaka sayısına ulaştığında otomatik şekilde durmaktadır ve sarım işlemi biten ıslak kompozit küreleme prosesine hazır hale getirilmektedir (Demirci, 2015).



Şekil 4.2 Reçine banyosunda ıslatılan elyaf demetleri (Demirci, 2015).

Küreleme işleminin amacı, ıslak halde bulunan kompozit borunun sertleşmesini ve katılaşmasını sağlamaktır. Küreleme işleminde kompozit borular fırın içerisinde sürekli döndürülerek reçinenin akmasını önlenir. Küreleme prosesinde kompozit borular 135°C sıcaklıkta 3 saat ön küreleme ve 150°C sıcaklıkta 3 saat son küreleme işlemlerine maruz bırakılmıştır. Küreleme işlemi bittikten sonra çekme aparatı ile mandrellerden çıkarılan kompozit borular, 300 mm uzunluğunda kesimi yapılarak deney numuneleri ölçülerine (Şekil 4.3.) getirilmiştir (Demirci, 2015).

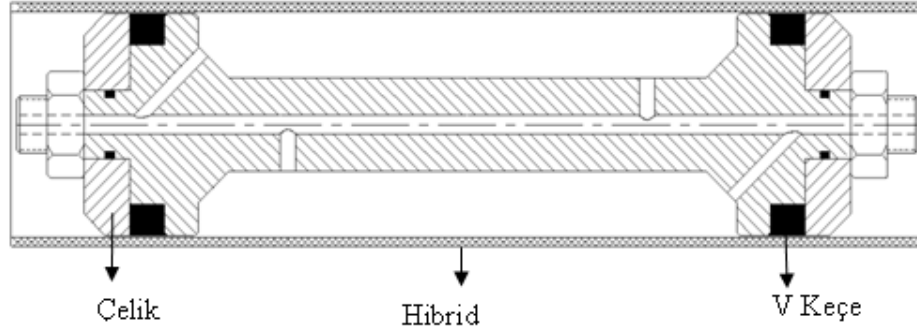


Şekil 4.3 BTP/Epoksi filaman sarım deney numunelerinin şematik resmi

4.2. Kompozit Borular İçin Düşük Basınç Şartlarının Sağlanması

Flaman sarım yöntemi ile üretilen ± 6 tabakalı BTP/Epoksi kompozit boru numunelerinin içerisine hidrolik pompa ile basınçlandırma yapılmaktadır. Basınçlandırma için kullanılan aparat Şekil 4.4' de görülmektedir. Çelik milden yapılmış, her iki kenarına keçe yatağı açılmış yataklara iki uçtan vida açılmıştır. Yüksek basınca dayanıklı keçeler yataklarına yerleştirilmiş ve çelik flanşlarla desteklenmiştir. Böylece sızdırmazlığı sağlanmış olur. Deney numunelerinin içerisine bu basınçlandırma sonucunda yağ basılırken (Şekil 4.5), basınçlandırmanın lineer olması için numunede meydana gelebilecek sonuç hasarının 50-60 saniye arasında gerçekleşmesine dikkat edilmiştir. Manometre ile basınç artışı takip edilmiştir.

Yapılan deneylerde 3 farklı numune ile darbe testi yapılmıştır. Bunlar; içi boş (BTP), içi yağ dolu basınçsız (0 Bar BTP) ve içi 5 bar yağ basınçlı (5 Bar BTP) olarak adlandırılmıştır.



Şekil 4.4 Kompozit borunun iç basınç aparatının montajı (Demirci, 2015).

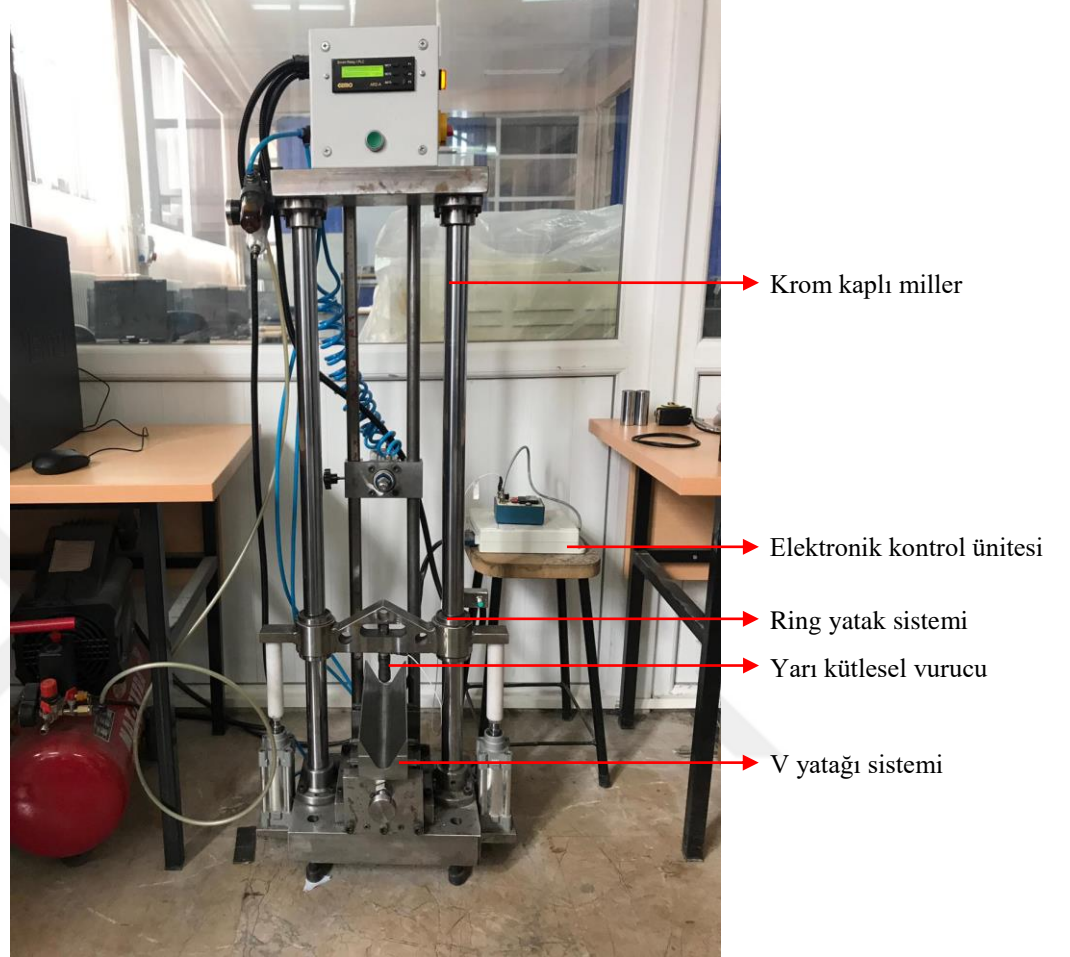


Şekil 4.5 Kompozit boruların iç basınç test düzeneği

4.3. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

Düşük hızlı darbe ile deney numunelerinde önceden belirlenmiş noktalara hasar oluşturması için üretilmiş Şekil 4.6' da gösterilen dinamik test düzeneği kullanılmıştır. Deney için kullanılan cihaz ile 15J, 20J, 25J darbe enerji seviyelerinde, ASTM D

7136/7136M standardına göre düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir. Cihaz deney süresi boyunca darbe verilerini kayıt edebilme ve değerlendirebilme imkanına sahiptir.



Şekil 4.6 Düşük hızlı darbe deney düzeneği

Deneylerde kullanılan test cihazı üç ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar;

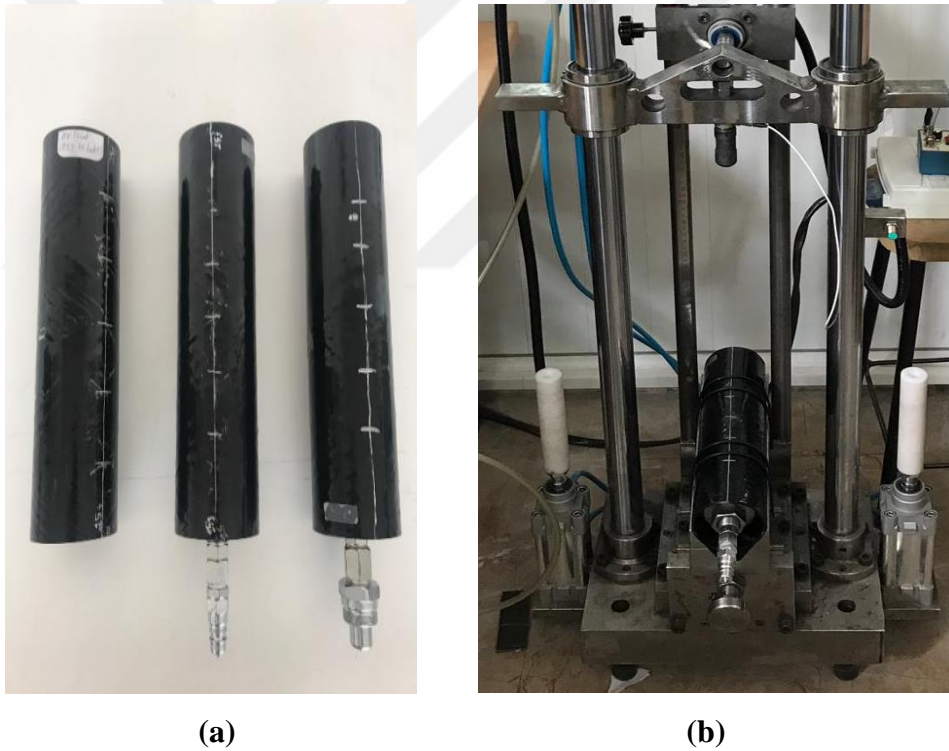
- Düşey hareketin gerçekleştiği, vurucu kütlelerinin ve kuvvet algılayıcısının bulunduğu krom kaplı mil yatak sistemi,
- BTP/Epoksi boru numunelerinin yataklanması için kullanılan V yatağı bileşeni,
- Darbe verilerinin analiz edilmesini sağlayan elektronik kontrol ünitesidir.

4.3.1. Vurucu geometrisi ve kuvvet algılayıcı

Düşük hızlı darbe düzeneğinde vurucu kütlemin minimum sürtünme kuvveti etkisinde düşüşünü gerçekleştirebilmesi için krom kaplı miller kullanılmıştır. Vurucu, 12 mm çapta ve yarı küresel bir uca sahiptir. Vurucu, bağlama elemanları ve lineer yatağın kütlesi 5,6 kg' dır. Kuvvet algılayıcısı vurucu ile vurucu kütle arasına yerleştirilmiş, teflon kaplı kablo aracılığı ile sinyali elektronik kontrol ünitesine iletmektedir.

4.3.2. BTP/Epoksi boru yataklaması

Şekil 4.7' de BTP/Epoksi boru deney numuneleri ve numunelerin V yatağı üzerine yerleştirilmiş şekli yer almaktadır. Darbe deneyi sırasında vuruş noktasının sabit kalması için bağlama aparatı ile desteklenmiştir. İlk darbe gerçekleştikten sonra tekrarlı darbelerden korunmak amacıyla sensör sistemi ayarlanmıştır.



Şekil 4.7 (a) Deney numuneleri (b) Deney numunelerinin V yatağı üzerinde görüntüsü

4.3.3. Elektronik kontrol ünitesi

Elektronik kontrol ünitesinde kuvvet algılayıcıdan gelen sinyalin değerini artıran bir sinyal şartlandırıcı bulunmaktadır. Sinyal şartlandırıcı ve kuvvet algılayıcı arasındaki bağlantıda teflon kablo kullanılmıştır. Kablonun asıl görevi kuvvet algılayıcıdan gelen

sinyalin bozulmadan iletilmesini sağlamaktır. Bilgisayarın ana kartı üzerine konulan DAQ kart, gelen sinyali algılamaktadır. DAQ kart aynı anda birden ve birbirinden farklı sinyalleri alıp işleyebilme özelliğine sahiptir. Zamana göre kuvvet değişimi grafiği NI Signal Express yazılımı kullanılmıştır.

4.4. BTP/Epoksi Kompozit Boruların Darbe Davranışlarının Belirlenmesi

Düşük hızlı darbe cihazı ile numunelere farklı enerji seviyelerinde darbe uygulayarak, kompozit malzemelerin darbe davranışı hakkında bilgi veren çeşitli grafikler veya sonuçlar elde edilebilir. Bunlardan;

- Kuvvet-deplasman (F-d)
- Kuvvet-zaman (F-t)
- Enerji-zaman (E_a-t) eğrileri oluşturarak kompozit malzemelerin darbe davranışlarını belirlemede kullanılan grafikler elde edilebilir.

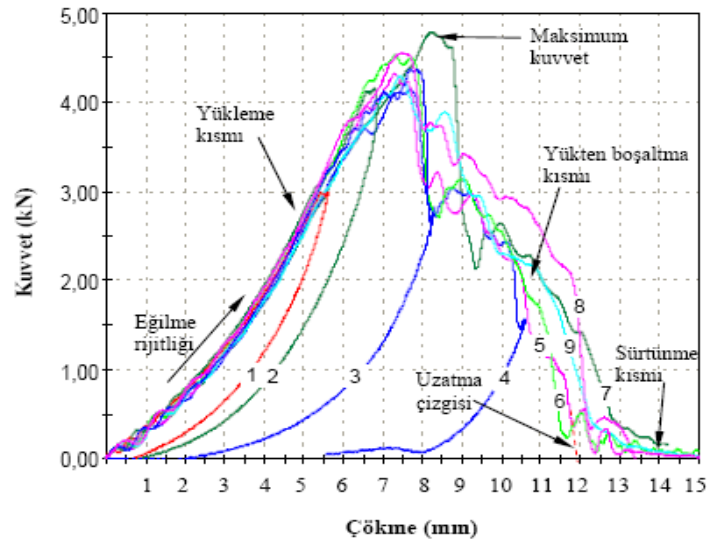
Oluşan grafikler, vurucunun; numuneye saplanması, numuneyi delip geçmesi ve numune yüzeyinden geri sekmesi gibi üç durumun anlaşılmasını sağlar. Bu üç durum ile ilgili grafik açıklamalarına aşağıdaki bölümlerde yer verilmiştir (Sayer, 2009).

4.4.1. Kuvvet-deplasman (F-d) eğrileri

Her bir eğri yüklemde bir artışın olduğu bölgeye, maksimum kuvvet değerine ve yükten boşaltmada bir azalma bölgesinden meydana gelmiştir. Kuvvet-deplasman eğrisinde artışın olduğu bölge darbe yüküne karşı malzemenin gösterdiği dirençten dolayı eğilme rijitliği şeklinde isimlendirilir. Bu eğriler açık ve kapalı tip eğri olmak üzere iki gruba ayrılır. 1, 2, 3 numaralı eğriler vurucunun numune üzerinden geri sekmesiyle oluşan kapalı tip eğrilerdir. Numune üzerine uygulanan darbe enerjisinin büyük bir bölümü numune tarafından absorbe edilmiş ve yutulamayan enerji numune yüzeyinden vurucunun geri sekmesini sağlamıştır. Artan darbe enerjisiyle birlikte geri sekme kısmı azalır ve kapalı tip eğriler genişler. 4 numaralı eğri kapalı tipten açık tipe geçiş noktasında bulunmaktadır. Darbe enerjisinin artışıyla açık tip eğriye dönüşür. Açık tip eğriler vurucunun numuneyi deldiği ve saplandığı durumlarda görülür. 5 numaralı eğri açık tip eğridir ve bu durumda vurucu numuneye saplanmıştır ya da numune delinmiştir. 6, 7, 8 ve 9 numaralı eğriler açık tip eğri olup, numuneler vurucu tarafından delinmiştir. Eğrilerin uç kısmında gözlemlenen yatay eksenin sonuna doğru kapanan bölge, vurucu ve numune

arasında sürtünmeden oluşan sürtünme bölgesi olarak anılır. Darbe enerjisi istenildiği doğrultuda arttırıldığında dahi kompozit malzemelerin belirli bir enerji seviyesine kadar yutma eğilimi gösterdiği anlaşılmaktadır (Sayer, 2009).

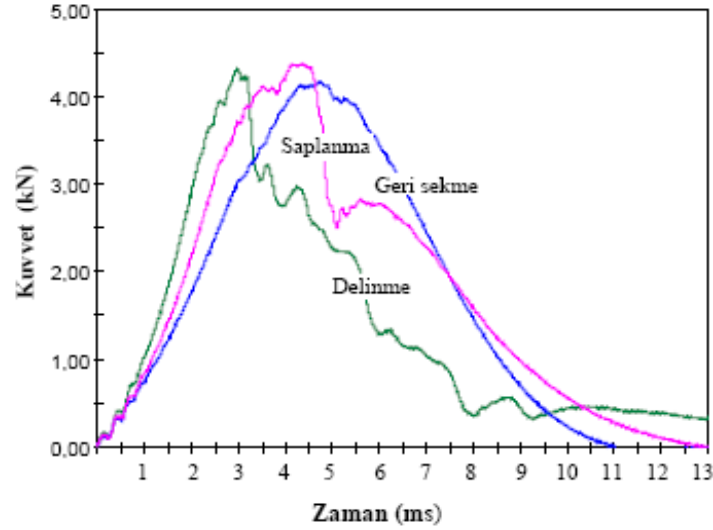
Artan bir darbe enerjisi altında kuvvet değerinin çökme eğilimine karşı değişimini gösteren F-d grafiği Şekil 4.8’ de görülmektedir.



Şekil 4.8 Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri (Sayer, 2009).

4.4.2. Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri

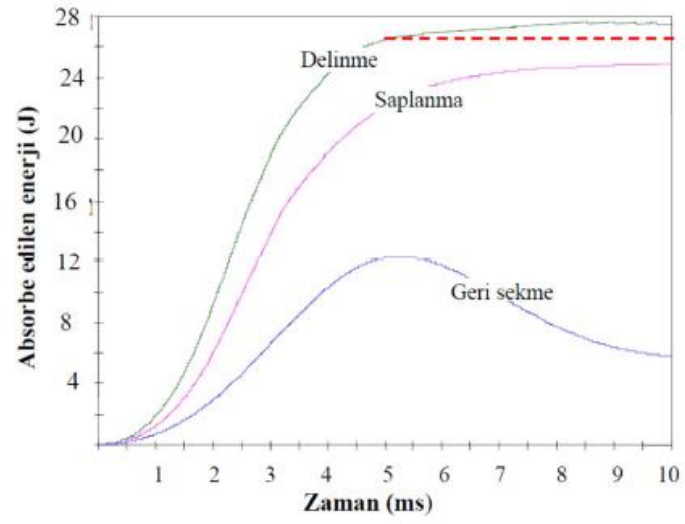
Şekil 4.9’ da vurucunun numune üzerinden geri sekmesi, saplanması ve numuneyi delmesi gibi üç özel durumu gösteren kuvvet-zaman (F-t) grafiği ile gösterilmiştir. Şekilde düşük enerjili darbelerde geri sekme eğrisinin parabolik bir eğri olduğu görülmektedir. Darbe enerjisi artışıyla artan kuvvet değeri artmaktadır. Saplanma ve delinme eğrilerinde ise bu kuvvet değeri hemen hemen sabit kalmaktadır. Numunede delinme oluştuğunda kuvvet değerinin sıfır olması gerekir. Fakat vurucu ve numune arasında oluşan sürtünmeden dolayı eğrinin uç kısmı yatay eksene paralel bir şekilde devam etmiştir (Sayer, 2009).



Şekil 4.9 Kuvvet-zaman (F-t) eğrileri (Sayer, 2009).

4.4.3. Absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) eğrileri

Şekil 4.10' da vurucunun numune üzerinden geri sekmesi, saplanması ve numuneyi delmesi gibi üç özel durumu gösteren absorbe edilen enerji- (E_a-t) grafiği ile gösterilmiştir. Oluşan grafik kuvvet-deplasman (F-d) grafiğinin altında kalan alandan hesaplanmaktadır. Geri sekme durumunda numune vurucunun enerjisinin tamamını absorbe edemez ve bir kısmını geri sekmesi için kullanır. Saplanma durumunda ise enerjinin tamamı absorbe edilir ve eğri yatay eksene paralel bir şekilde devam eder. Numunenin delinmesi durumunda ise numune ve vurucu arasında oluşan sürtünme bölgesinin altındaki alanda hesaplanan enerjinin eklenerek eğrinin yukarı doğrultuya yöneldiği gözlemlenmiştir. Hesaplanan bu absorbe enerjisinin toplam enerjiden çıkarılması gerekir. Bu çıkarım yapıldığında kesikli çizgi şeklindeki eğrinin oluştuğu görülmüştür (Sayer, 2009).



Şekil 4.10 Absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) eğrileri (Sayer, 2009).

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

$[\pm 55^\circ]_6$ Bazalt elyaf takviyeli (BTP) epoksi kompozit borulara üç farklı enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Deney sonuçları ve hasar analizleri başlıklar halinde aşağıda sunulmuştur.

5.1. BTP/Epoksi Borularının Mekanik Özellikleri

Bazalt elyaf takviyeli epoksi kompozit boruların literatürde gerçekleştirilen deneyler sonucunda elde edilen mekanik özellikleri Çizelge 5.1’ de verilmiştir.

Çizelge 5.1. BTP/Epoksi Kompozit borunun mekanik özellikleri (Demirci, 2015)

θ : Elyaf sarım açısı	$\pm 55^\circ$
σ_t : Teğetsel hasar gerilmesi (MPa)	595
V_p : Poisson oranı	0.72
E_y : Elastiklik modülü (GPa)	26.6

5.2 Düşük İç Basınç ve Basınsız BTP/Epoksi Borularının Düşük Hızlı Darbe Deney Sonuçları

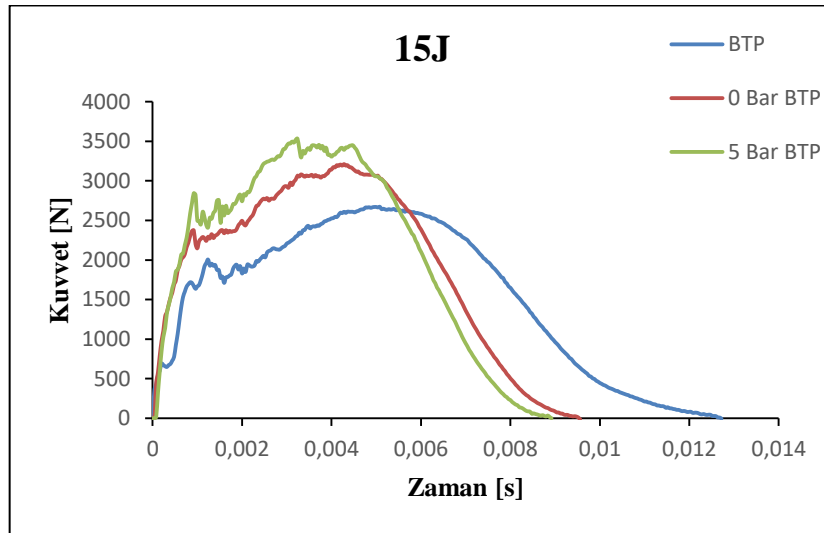
BTP, 0 Bar BTP ve 5 Bar BTP olarak adlandırılan deney numuneleri Şekil 4.7a’ da gösterilmiştir. BTP borularının basınç altında darbe davranışlarını incelemek için 15J, 20J ve 25J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Darbe enerji seviyesine göre vurucu yüksekliği teorik olarak hesaplanmış olup, Çizelge 3.1’ de hesaplanan değerler yer almaktadır. Deney numuneleri V yatağı yerleştirildikten sonra bağlantı aparatı ile sabitlenmiştir. Daha sonra önceden numune üzerine işaretlenmiş 5 cm aralıklı, 3 noktaya darbe gerçekleştirilmiştir. Darbe gerçekleştikten sonra elektronik kontrol ünitesi aracılığı ile kuvvet-zaman, kuvvet-deplasman ve enerji-zaman değişimleri kinetik olarak kayıt altına alınmıştır.

5.2.1. Temas kuvveti-zaman değişimi

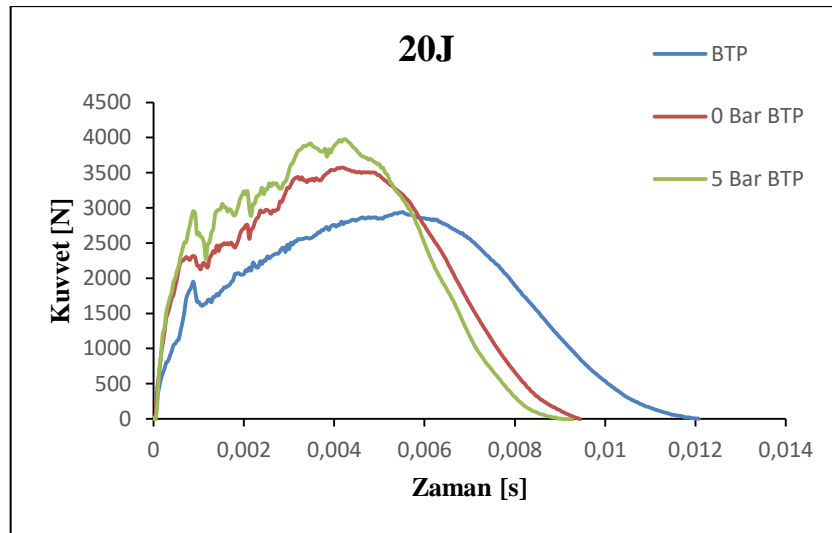
Şekil 5.1’ de gösterilen kuvvet-zaman grafiklerinde 3 farklı deney numunesi için 15J, 20J, 25J enerji seviyelerinde elde edilen temas kuvveti-zaman (F-t) değişimleri verilmiştir. Kuvvet-zaman değişimleri BTP/Epoksi kompozit numunelerde basıncın, düşük hızlı darbeye etkisini göstermektedir. Vurucu, tüm basınç ve enerji seviyesi

değerlerinde numunelerde delinme hasarı olmadan geri sekmıştır. Grafikler incelendiğinde tüm enerji seviyelerinde kuvvet değeri artmakta, maksimum kuvvet değerine ulaşınca bir düşme göstermektedir. Bu maksimum kuvvet değerlerine ulaşılan kadar hasar gelişiminin devam ettiği düşünülmektedir. Her numune için darbe enerji seviyesi artışı ile birlikte maksimum temas kuvveti değerlerinin arttığı grafikler üzerinden net bir şekilde görülmektedir (Abrate, 1998; Kara, 2012; Kara ve ark., 2014; Gemi ve ark., 2016; Gemi ve ark., 2018). 25J enerji seviyesinde en yüksek temas kuvveti değeri görülmekte ve grafikler incelendiğinde eğri üzerindeki salınım en fazla bu darbe enerji seviyesinde olduğu gözlemlenmektedir. Bundan yola çıkarak en yüksek hasarın 25J darbe enerji seviyesinde meydana gelmektedir. Artan darbe enerjisi seviyesi aynı zaman vurucu ucun temas süresini de arttırmaktadır (Kara, 2012).

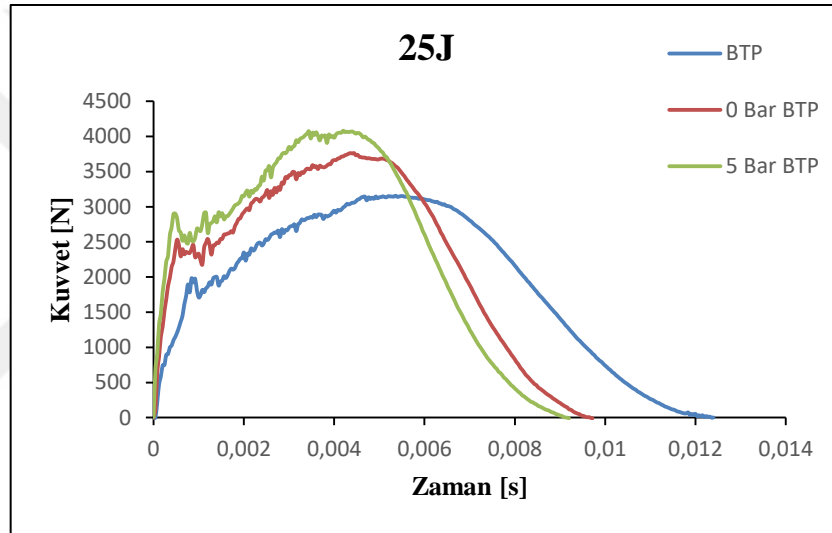
Aynı enerji seviyelerinde 3 farklı deney numuneleri incelendiğinde artan basınç ile birlikte maksimum temas kuvvetinin arttığı, temas sürelerinin ise azaldığı görülmektedir (Kara, 2012; Gemi ve ark., 2016). Bunun en temel sebebinin BTP kompozit borunun basınçsız içi yağ dolu haldeyken, yağın vurucunun darbe süresi boyunca eğilme ile birlikte kompozitin tüm iç yüzeyine mesnetleme yaparak çökme miktarının düşmesine olduğu düşünülmektedir. Aynı durum 5 bar ile basınçlandırıldığında ise kompozit borunun tüm iç yüzeyinde basınçlı bir şekilde mesnetleme yaparak çökme miktarını daha azalttığı yorumlanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.1 Farklı deney numuneleri için a) 15J b) 20J c) 25J enerji seviyelerinde BTP/Epoksi kompozit borularda elde edilen kuvvet-zaman (F-t) değişimi grafikleri

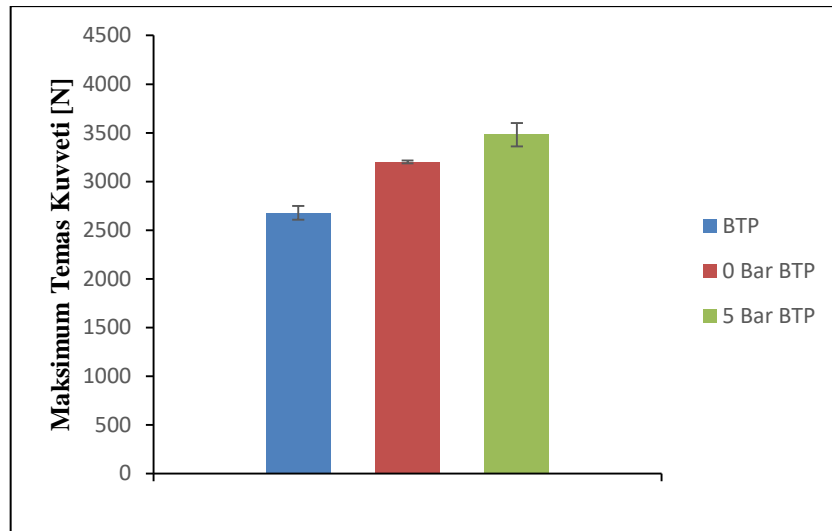
3 tekrarlı şekilde yapılan darbe testlerinde elde edilen maksimum kuvvet değerlerinin ortalamaları Şekil 5.2' de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde artan darbe enerji seviyesi ile maksimum temas kuvveti de artış göstermektedir (Abrate, 1998; Mili ve Necib, 2001; Kara, 2006; Wang ve ark., 2008; Dehkordi ve ark., 2010; Şahin, 2011; Kara, 2012; Kara ve ark., 2014). 15J darbe enerji seviyesinde BTP (basınçsız) numunesinin diğer numunelere kıyasla çok daha düşük $2677,635 \pm 69,75793$ N ortalama maksimum temas kuvveti değerine sahipken, temas süresinin ise $0,017464 \pm 0,000252$ s en fazla olduğu görülmektedir. 0 Bar BTP (basınçsız içi yağ dolu) numunesinde maksimum kuvvet değeri $3201,793 \pm 14,35417$ N iken, temas süresi $0,015466 \pm 0,000046$

s dir. 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) numunesinin ise en yüksek 3480,541±121,0901 N ortalama maksimum kuvveti değeri görülürken, en düşük temas süresine 0,015304±0,000115 s sahiptir. 20J ve 25J enerji seviyelerindeki değerlere baktığımızda (Çizelge 5.2) BTP numunesinin her iki enerji seviyesinde de en düşük ortalama maksimum temas kuvveti ve en yüksek temas süresine sahip olduğu, 5 Bar BTP numunesinin ise en yüksek ortalama maksimum temas kuvveti ve en düşük ortalama temas süresine sahip olduğu görülmektedir. Buradan içi boş, içi yağ dolu 0 bar, düşük basınçlandırılmış 5 bar BTP kompozitlerde artan enerji seviyesi ile birlikte grafiklerdeki maksimum kuvvet değerlerinin arttığı, temas sürelerinin ise düştüğü tespit edilmiştir. Bunun sebebinin belirtildiği üzere içinin yağ ile doldurulmasının neticesinde kompozit tabakaların eğilmeye karşı gösterdiği direnç olarak yorumlanmıştır.

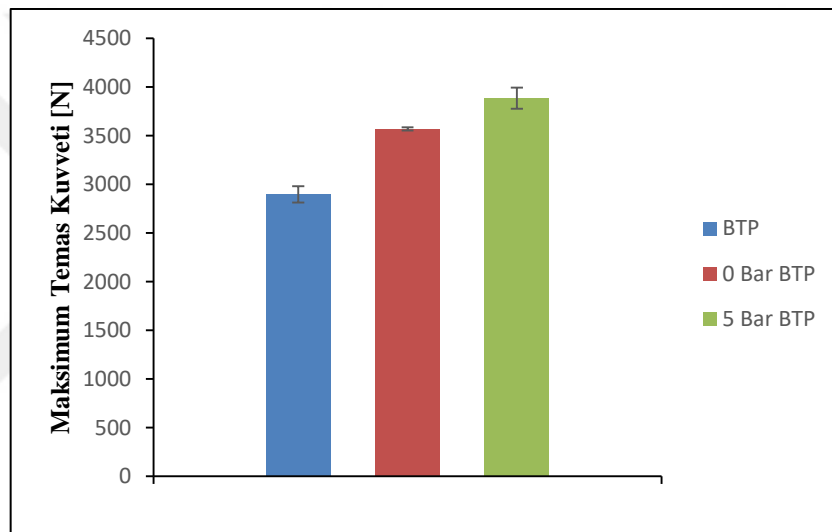
Çizelge 5.2. Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen maksimum kuvvet ve temas süresi değerleri (X±Sx)

Deney Numunesi	Darbe Enerjisi (J)	Çarpma Hızı (m/sn)	Maksimum Kuvvet (N)	Temas Süresi (s)
BTP	15	2,3133	2677,64±69,76	0,01746±0,000252
0 Bar BTP	15	2,3133	3201,79±14,35	0,01547±0,000046
5 Bar BTP	15	2,3133	3480,54±121,09	0,01530±0,000115
BTP	20	2,6712	2896,76±82,42	0,01750±0,000657
0 Bar BTP	20	2,6712	3569,99±15,73	0,01575±0,000287
5 Bar BTP	20	2,6712	3885,04±108,65	0,01565±0,000604
BTP	25	2,9865	3118,09±81,72	0,01758±0,000418
0 Bar BTP	25	2,9865	3794,57±80,01	0,01686±0,002532
5 Bar BTP	25	2,9865	4116,34±60,34	0,01638±0,000644

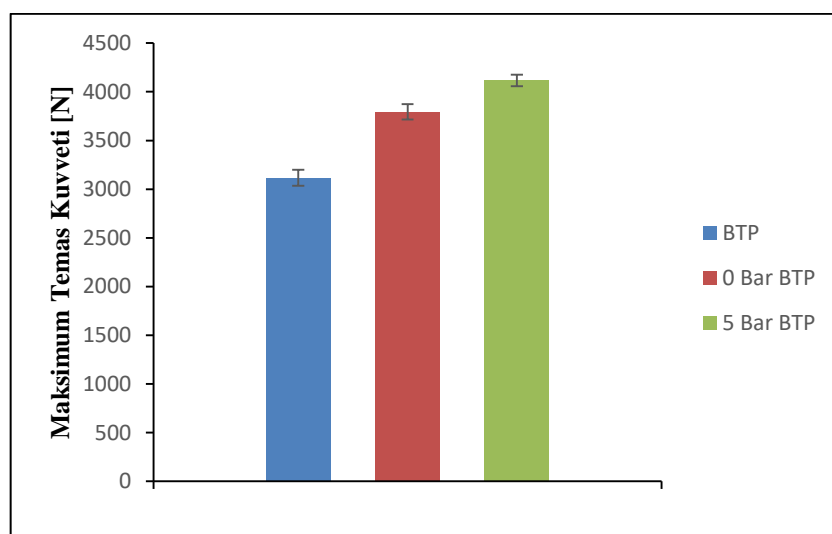
5 Bar BTP numunesinin temas kuvveti değeri 0 Bar BTP ile kıyaslandığında, basıncın temas kuvvetini arttığı söylenebilir. Yağın kompozit borunun içinde basınçlandırılarak, iç yüzeylerde mesnetlenmeyi kuvvetlendirerek tabakaların eğilmeye karşı direncini arttırdığı düşünülmektedir.



(a)



(b)



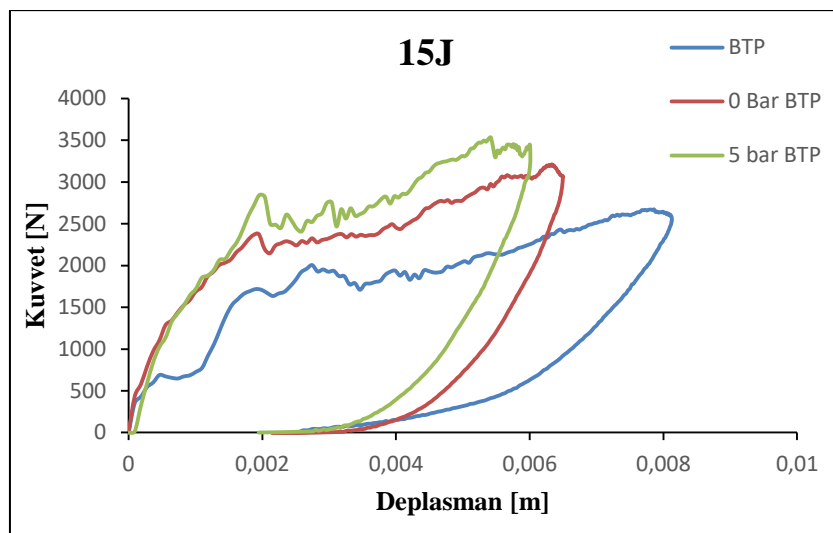
(c)

Şekil 5.2 Farklı deney numuneleri için a) 15J b) 20J c) 25J enerji seviyelerinde BTP/Epoksi kompozit borularda elde edilen ortalama maksimum kuvvet değişimi grafikleri

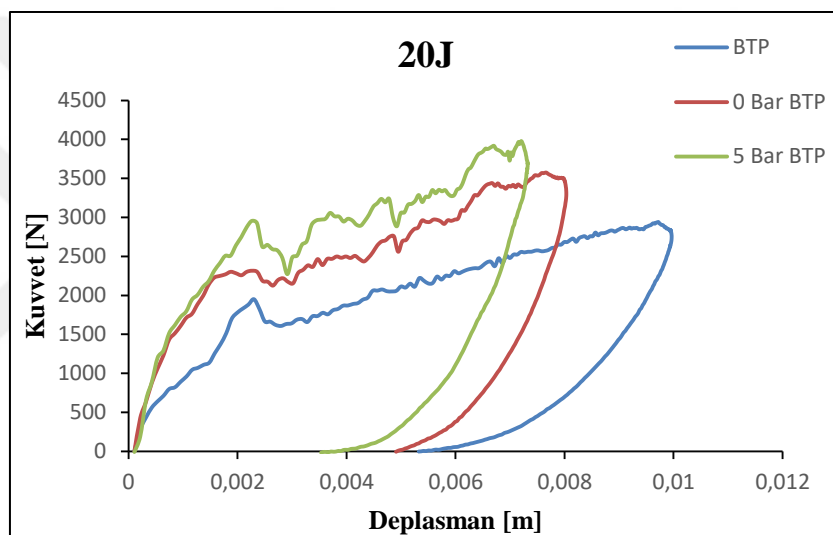
5.2.2. Temas kuvveti-deplasman değişimi

Darbeye maruz kalan kompozit malzemelere ait darbe davranışını belirlemede kullanılan grafiklerden bir diğeri kuvvet-deplasman (F-d) değişim grafikleridir. Kuvvet-deplasman grafiklerinde 3 farklı deney numunesi için 15J, 20J, 25J enerji seviyelerinde elde edilen temas kuvveti-deplasman değişimleri Şekil 5.3’ te verilmiştir. Kuvvet-deplasman grafiği altında kalan alan numune üzerinde yapılan işi yani numunede yutulan enerjiyi vermektedir. Darbe enerjisi arttıkça kuvvet-deplasman eğrisi altında kalan alanın arttığı ve buna bağlı olarak numune tarafından yutulan enerji miktarının da arttığı Şekil 5.3’ te açıkça görülmektedir (Abrate, 1998; Mili ve Necib, 2001; Kara, 2006; Wang ve ark., 2008; Dehkordi ve ark., 2010; Şahin, 2011; Kara, 2012; Kara ve ark., 2014).

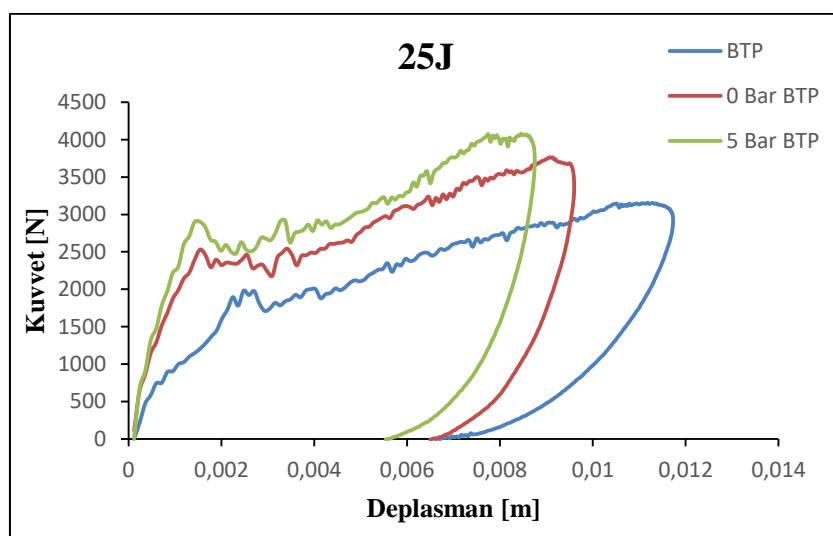
Kuvvet-deplasman eğrisinde artışın olduğu bölgedeki eğrinin eğimi, kompozit numunenin darbe kuvvetine karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir. Aynı zaman eğilme karşı kompozit tabakanın göstermiş olduğu dirence “*eğilme rijitliği*”de denilmektedir (Kara, 2012). Buradaki değişimler ve salınımlar numunede meydana gelen hasarlanmayı ifade etmektedir. Şekil 5.3 incelendiğinde gözle görülür bir değişim olmadığı görülmektedir. Aynı şartlardaki numunelerde enerji seviyesinin artması ile birlikte, eğilme rijitliğinde önemli bir değişimin olmadığı görülmüştür (Kara, 2012; Kara ve ark., 2014). Fakat kompozit borunun içi yağ ile doldurulduğunda yağın iç yüzeylere mesnetme yaparak eğilme rijitliğini arttırdığı düşünülmektedir. Bu durum grafik üzerinde de görülebilmektedir. Aynı zamanda 0 bar ile 5 bar arasındaki BTP kompozit boruların eğilme rijitliklerinde önemli bir değişim olmadığı grafiklerdeki eğimlere bakarak yorumlanmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.3 Farklı deney numuneleri için a) 15J b) 20J c) 25J enerji seviyelerinde BTP/Epoksi kompozit borularda elde edilen kuvvet-deplasman (F-d) değişimi grafikleri

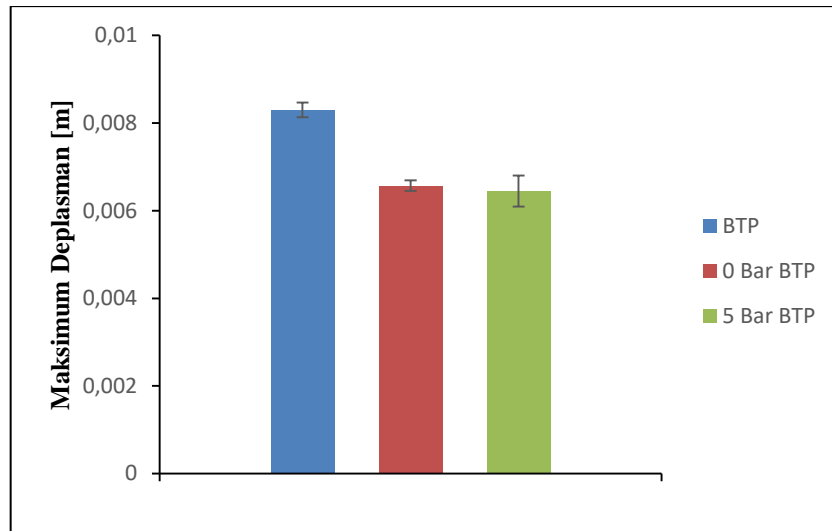
Artan darbe enerji seviyesi ile birlikte deplasman değerleri artış göstermektedir. Şekil 5.4' te maksimum deplasman değerleri sütun grafiği şeklinde verilmiştir.

15J darbe enerji seviyesinde BTP (basınçsız) numunesinin diğer numunelere kıyasla çok daha yüksek $0,008301 \pm 0,000171$ m ortalama maksimum deplasman değerine sahip olduğu, 0 Bar BTP (basınçsız içi yağ dolu) numunesinin ortalama maksimum deplasman değerine $0,006572 \pm 0,000119$ m ve 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) numunesinin ise en düşük $0,006446 \pm 0,000354$ m ortalama maksimum deplasman değerine sahip olduğu görülmektedir. 20J ve 25J enerji seviyelerindeki değerlere baktığımızda (Çizelge 5.3) BTP numunesinin her iki enerji seviyesinde de en yüksek ortalama maksimum deplasman değerine sahip olduğu, 5 Bar BTP numunesinin ise en düşük ortalama maksimum deplasman değerine ulaştığı görülmektedir.

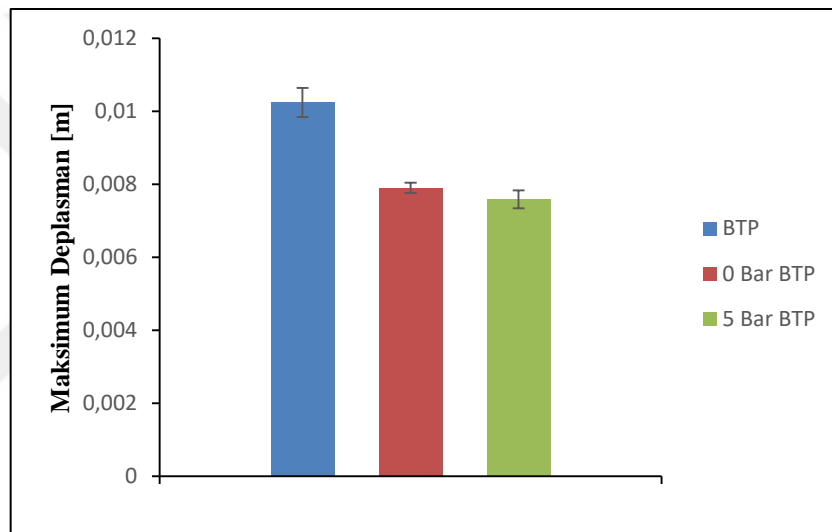
Çizelge 5.3. Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen maksimum kuvvet ve deplasman değerleri ($X \pm S_x$)

Deney Numunesi	Darbe Enerjisi (J)	Çarpma Hızı (m/sn)	Maksimum Kuvvet (N)	Deplasman (m)
BTP	15	2,3133	2677,64±69,76	0,00830±0,000171
0 Bar BTP	15	2,3133	3201,79±14,35	0,00657±0,000119
5 Bar BTP	15	2,3133	3480,54±121,09	0,00645±0,000354
BTP	20	2,6712	2896,76±82,42	0,01024±0,000402
0 Bar BTP	20	2,6712	3569,99±15,73	0,00790±0,00014
5 Bar BTP	20	2,6712	3885,04±108,65	0,00759±0,000367
BTP	25	2,9865	3118,09±81,72	0,01208±0,000349
0 Bar BTP	25	2,9865	3794,57±80,01	0,00931±0,000271
5 Bar BTP	25	2,9865	4116,34±60,34	0,00912±0,000245

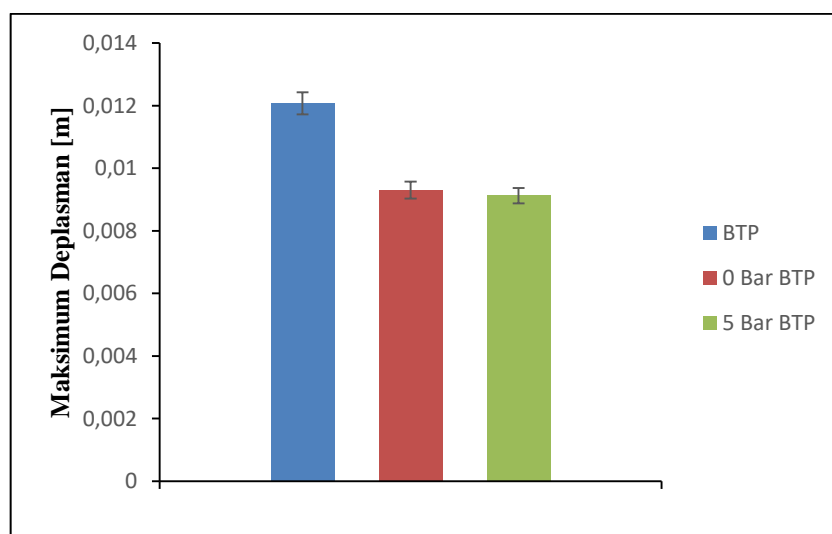
Buradan BTP numunesinde daha çok deplasman(çökme miktarı) olduğu, bunun sebebinin ise belirtildiği üzere içi boş olduğundan yağın mesnetleme özelliğinin olmamasıdır. 0 Bar BTP ile 5 Bar BTP verileri incelendiğinde artan enerji ile birlikte yer değiştirme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu, ancak basınç artışının deplasman değerini azalttığı görülmektedir. Bunda ise yağ iç tabakaları destekleyerek eğilmeye karşı direnci arttırmış ve çökme miktarını azaltmıştır.



(a)



(b)

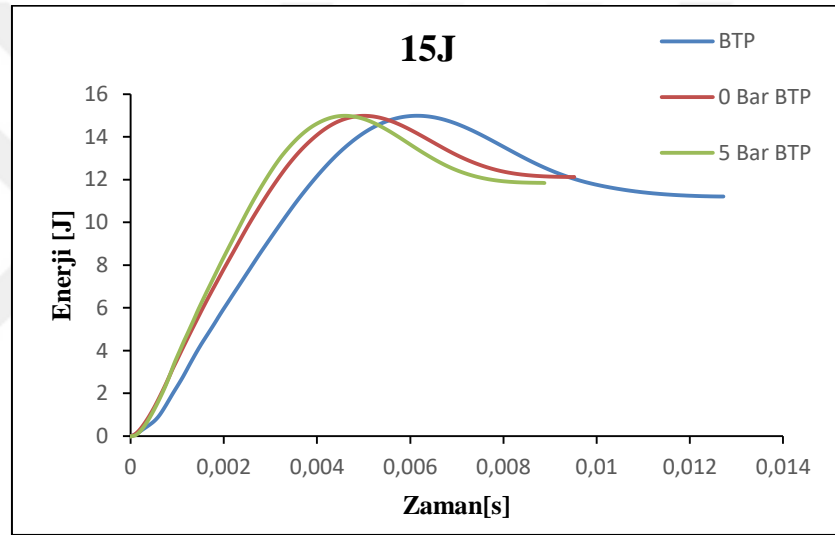


(c)

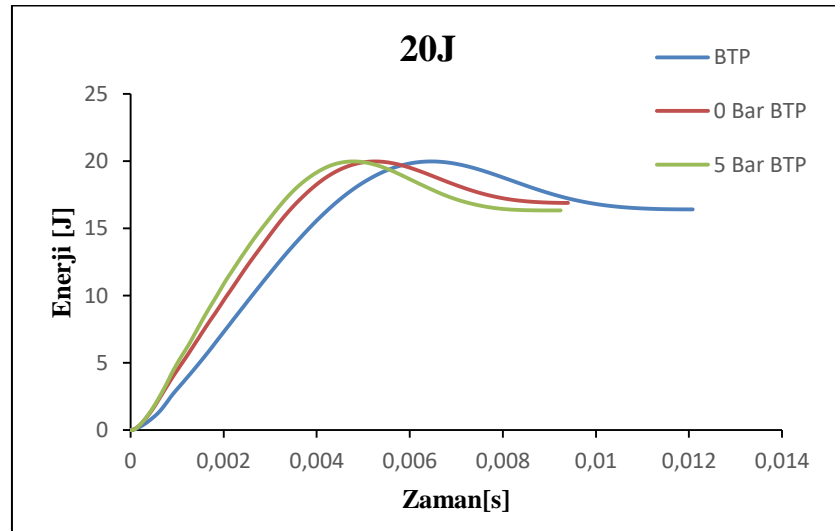
Şekil 5.4 Farklı deney numuneleri için a) 15J b) 20J c) 25J enerji seviyelerinde BTP/Epoksi kompozit borularda elde edilen ortalama maksimum deplasman değışimi grafikleri

5.2.3. Enerji-zaman değışimi

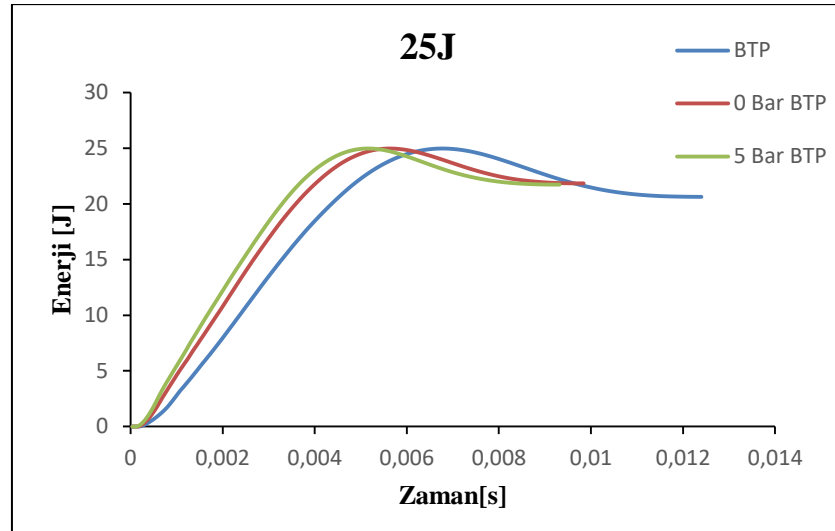
Şekil 5.5’ de farklı darbe enerji seviyelerinde enerji-zaman (E_a-t) grafikleri verilmiştir. Darbe enerjisinin artmasıyla birlikte yutulan edilen enerjinin de arttığı görülmüştür. BTP numunesine bakıldığında, numunenin darbeye maruz kalan tabakalarında eğilme ile birlikte yaylanmanın olduğu ve dolayısıyla sekme enerjisinin arttığı düşünülmektedir (Abrate, 1998; Mili ve Necib, 2001; Kara, 2006; Wang ve ark., 2008; Dehkordi ve ark., 2010; Şahin, 2011; Kara, 2012; Kara ve ark., 2014).



(a)



(b)



(c)

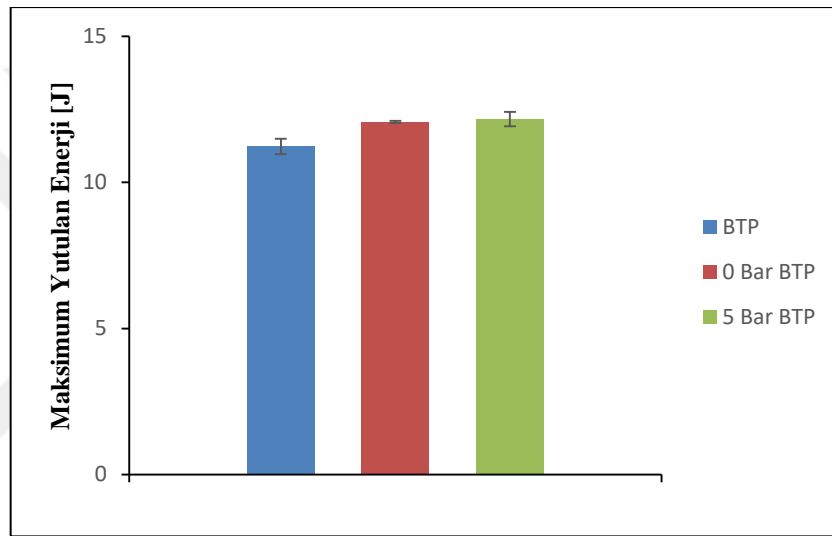
Şekil 5.5 Farklı deney numuneleri için a) 15J b) 20J c) 25J enerji seviyelerinde BTP/Epoksi kompozit borularda elde edilen enerji-zaman (E_a-t) değişimi grafikleri

Maksimum yutulan enerji değerleri Şekil 5.6' da yer almaktadır. Düşük hızlı darbe gören BTP numunesi 15J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %75'ini, 20J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %80'ini ve 25J darbe enerjisinde toplam enerji miktarının %82'sini yutmuştur. 0 Bar BTP numunesi toplam enerjinin 15J darbe enerjisinde %80'ini, 20J de %84'ünü ve 25J de %85'ini yutmuştur. 5 Bar BTP numunesi toplam enerjinin 15J darbe enerjisinde %81'ini, 20J de %85'ini ve 25J de %86'sını yutmuştur. Artan darbe enerji seviyesi ile birlikte yutulan enerji miktarları da artmaktadır. 0 Bar BTP ile 5 Bar BTP numunelerinin yutulan enerji miktarları birbirine yakın değerler göstermiştir. Bunun en temel sebebi eğilme rijitliğine etki eden çökme miktarındaki azalmanın benzerlik göstermesi olduğunu kanaati oluşmuştur.

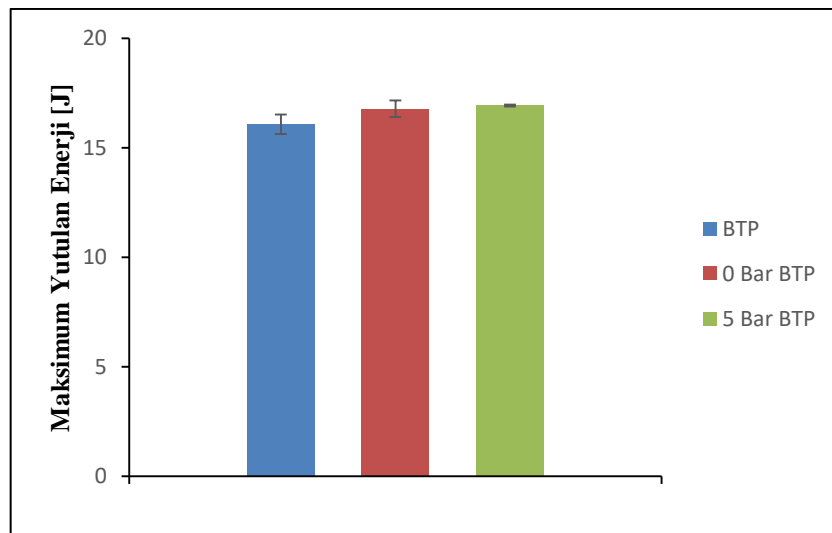
15J darbe enerji seviyesinde BTP (basınçsız) numunesinin diğer numunelere kıyasla çok daha düşük $11,2364 \pm 0,263388$ J ortalama maksimum yutulan enerjiye sahiptir. 0 Bar BTP (içi yağ dolu basınçsız) numunesinde maksimum yutulan enerjisi $12,0705 \pm 0,035912$ J iken, 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) numunesinin ise en yüksek $12,1704 \pm 0,242924$ J ortalama maksimum yutulan enerji değeri görülür. 20J ve 25J enerji seviyelerindeki değerlere baktığımızda (Çizelge 5.4), BTP numunesinin her iki enerji seviyesinde de en düşük ortalama maksimum yutulan enerji değerleri görülürken, 5 Bar BTP numunesinin ise en yüksek ortalama maksimum yutulan enerji değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Artan darbe enerjisi ile süreklilik korunmuştur.

Çizelge 5.4. Düşük hızlı darbe deneylerinde elde edilen maksimum yutulan enerji ve temas süresi değerleri ($X \pm S_x$)

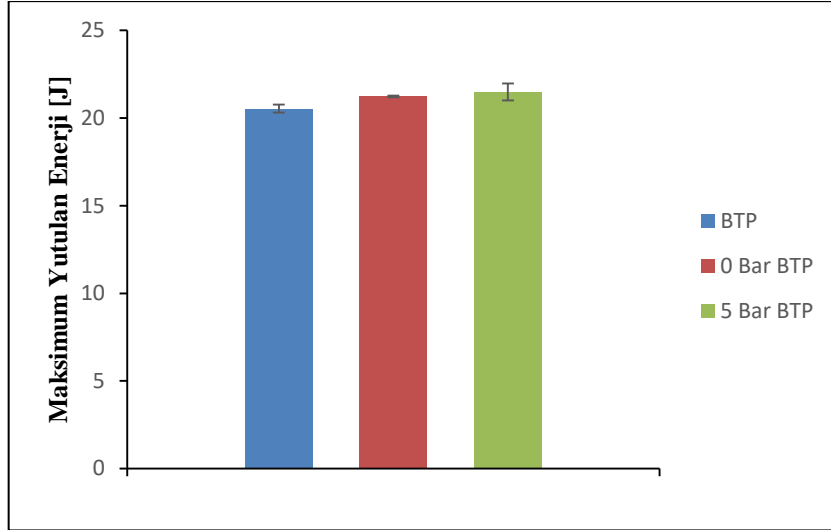
Deney Numunesi	Darbe Enerjisi (J)	Maksimum Yutulan Enerji (J)	Temas Süresi (s)
BTP	15	11,2364±0,263388	0,01758±0,000418
0 Bar BTP	15	12,0705±0,035912	0,01686±0,002532
5 Bar BTP	15	12,1704±0,242924	0,01638±0,000644
BTP	20	16,0742±0,443424	0,01750±0,000657
0 Bar BTP	20	16,782±0,37934	0,01575±0,000287
5 Bar BTP	20	16,9272±0,038887	0,01565±0,000604
BTP	25	20,5366±0,225945	0,01746±0,000252
0 Bar BTP	25	21,23975±0,044433	0,01547±0,000046
5 Bar BTP	25	21,493±0,482147	0,01530±0,000115



(a)



(b)



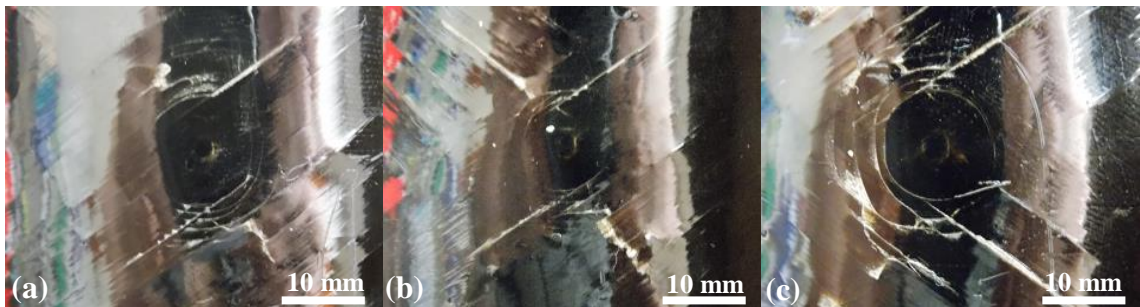
(c)

Şekil 5.6 Farklı deney numuneleri için a) 15J b) 20J c) 25J enerji seviyelerinde BTP/Epoksi kompozit borularda elde edilen ortalama maksimum yutulan enerji değişimi grafikleri

5.3. Düşük Hızlı Darbe Hasar Analizi

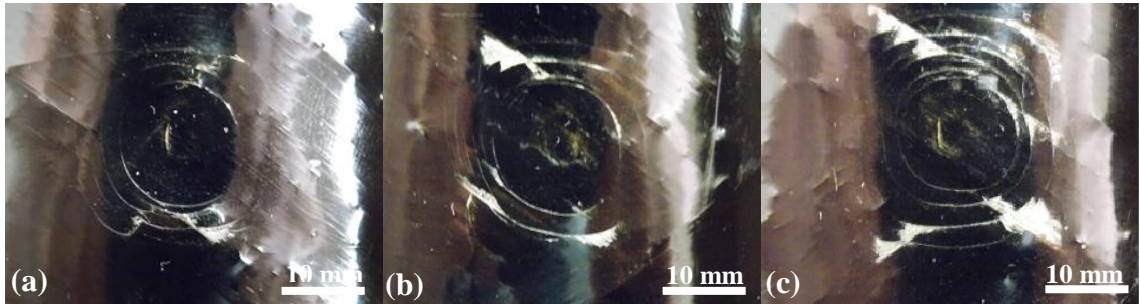
Düşük hızlı darbe sonrası darbe bölgelerinin makro görüntüleri NIKON D3000 fotoğraf makinesi ile çekilmiştir. Darbe sonrası numunelerin hasar bölgelerinin orta noktasından metalografik kesme cihazı ile kesimi yapılmıştır. 600,800 ve 1000 zımpara numarası ile zımparalama yapılan yüzeyler daha sonra kompresör yardımıyla içerisindeki talaşlar kaldırılmış ve mikro incelemeye hazır hale getirilmiştir. Yapılan mikro incelemeler Dino-Lite CapillaryScope 500 Pro Digital mikroskop ile gerçekleştirilmiştir.

BTP (basıncsız içi boş), 0 Bar BTP (0 bar içi yağ dolu) ve 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) BTP/Epoksi kompozit boruların 15J, 20J ve 25J darbe enerji seviyelerinde meydana gelen hasarların darbe hasar bölgelerinin makro ve mikro resimleri aşağıda verilmiştir.

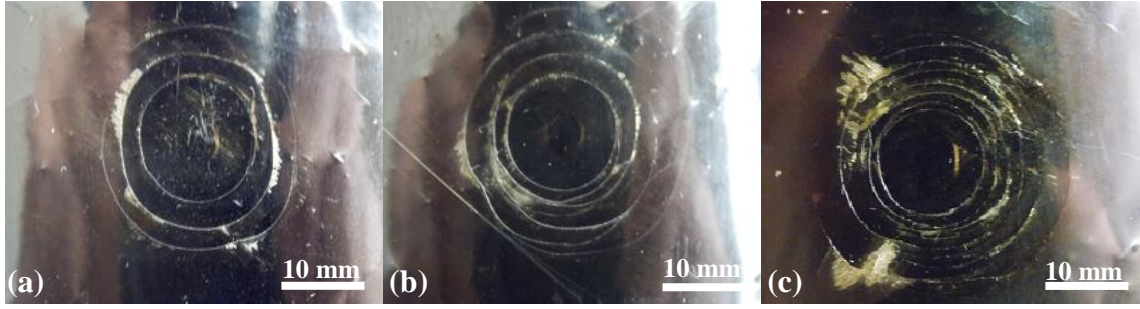


Şekil 5.7 a) 15J b) 20J c) 25J darbe enerji seviyelerinde BTP (basınçsız içi boş) kompozit numunelerin makro görüntüleri

Şekil 5.7’ de BTP numunesinin 15J, 20J ve 25J darbe enerji seviyelerinde darbe neticesinde meydana gelen hasarlar görüntülenmiştir. Darbe neticesinde meydana gelen darbe bölgelerindeki yüzey hasarları incelendiğinde, genel olarak hasar bölgelerinin ve hasarların darbe enerjisinin artmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. BTP numunesinin tüm enerji seviyelerinde darbeye maruz kalan bölgelerinde, elyaf sarım açısı doğrultusunda elyaf/matris arayüzey ayrılması (debonding), matris çatlakları ve elyaf kırılması yüzey hasarlarının olduğu görülmektedir. Çizelge 5.3’ te sunulan kuvvet deplasman verileri incelendiğinde en fazla deplasman miktarının BTP numunesinde olduğu gözükmektedir. Deplasman miktarının artması, vurucu ucun darbesiyle beraber lokal eğilmenin de arttığını anlamına gelmektedir. Artan deplasman miktarı BTP numunesinde Şekil 5.7’ de görüldüğü üzere sarım açısının etkisiyle, çarpı şeklinde çapraz debonding ve elyaf kırılması hasarlarına yol açtığı açıkça görülmektedir. Artan enerji seviyesiyle eğilme miktarının artışı, debonding ve elyaf kırılma hasar miktarının arttırdığı tespit edilmiştir. Elyaf bant boyunca ilerleyen debonding hasarının, elyaf bantlarında delaminasyon hasarına neden olarak, eğilme miktarının yani vurucu ucun temas süresinin sonunda elyaf bantlarında elyafların kırılmasına neden olduğu kanaati oluşmuştur. Birbirini tetikleyen bu elyaf kırılmalarının nihayetinde, elyaf bandındaki sırasıyla aniden tüm elyaf kırılmasına sebebiyet verdiği yorumlanmıştır.

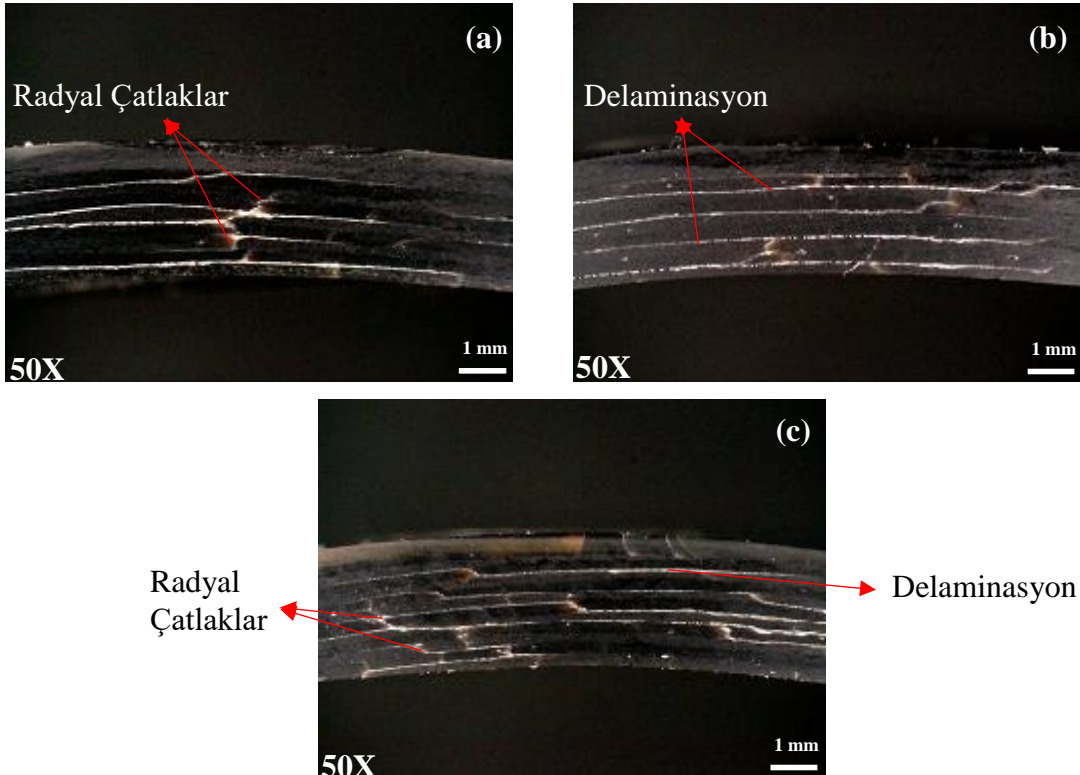


Şekil 5.8 a) 15J b) 20J c) 25J darbe enerji seviyelerinde 0 Bar BTP (basınçsız içi yağ dolu) kompozit numunelerin makro görüntüleri



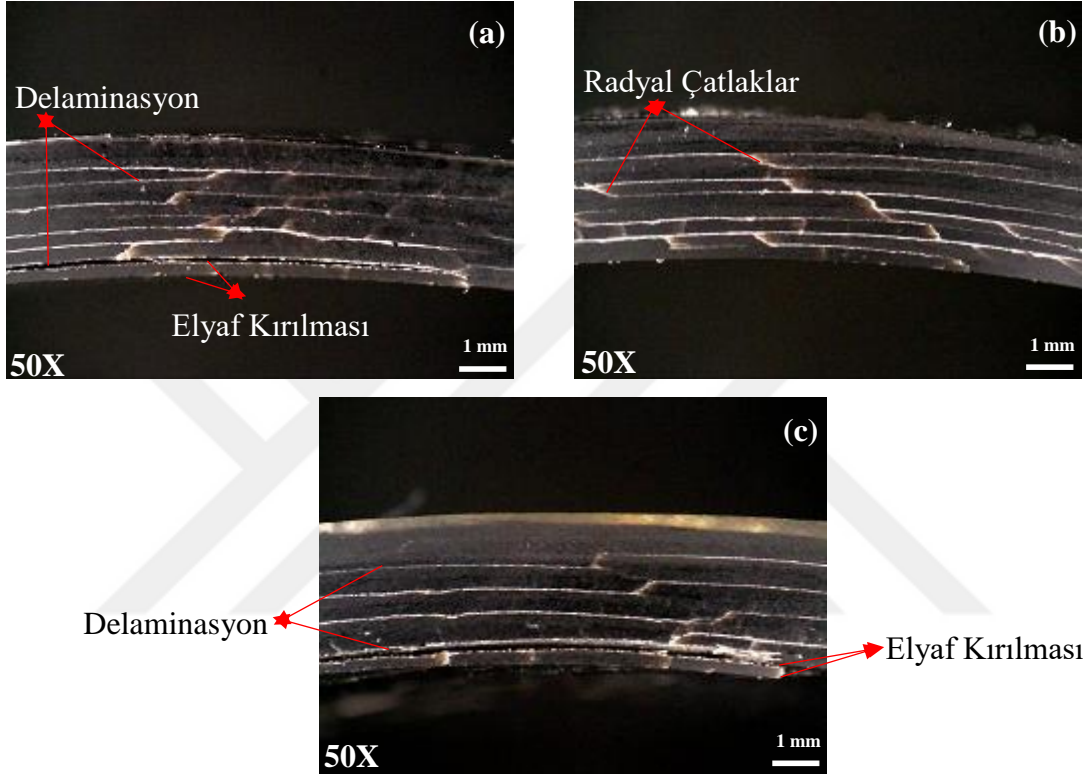
Şekil 5.9 a) 15J b) 20J c) 25J darbe enerji seviyelerinde 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) kompozit numunelerin makro görüntüleri

Şekil 5.8’ de 0 Bar BTP ve Şekil 5.9’ da 5 Bar BTP numunelerin her bir enerji seviyesindeki darbe bölgeleri incelendiğinde, BTP numunesinde gözlemlenen çarpı şeklindeki çapraz hasar ilerlemeleri görülmemektedir. Hasar bölgeleri incelendiğinde, 0 Bar BTP ve 5 Bar BTP numunelerin darbeye maruz kalan bölgelerde hasarların iç içe geçmiş halka şeklini aldığı görülmektedir. Artan darbe enerji seviyesiyle birlikte, debonding hasarları birleşip büyüyerek, bant üstünde lokal delaminasyon ve matris çatlaklarını oluşturduğu özellikle Şekil 5.8c ve Şekil 5.9c’ de açıkça görülmektedir. BTP numunesinin yüzey hasarları her bir enerji seviyesinde, çapraz ve çarpı şeklinde hasar oluştururken, 0 Bar BTP ve 5 Bar BTP numunelerinde hasarların değişim göstererek, dairesel halka şeklinde matris hasarları oluşturduğu ortaya çıkmıştır.



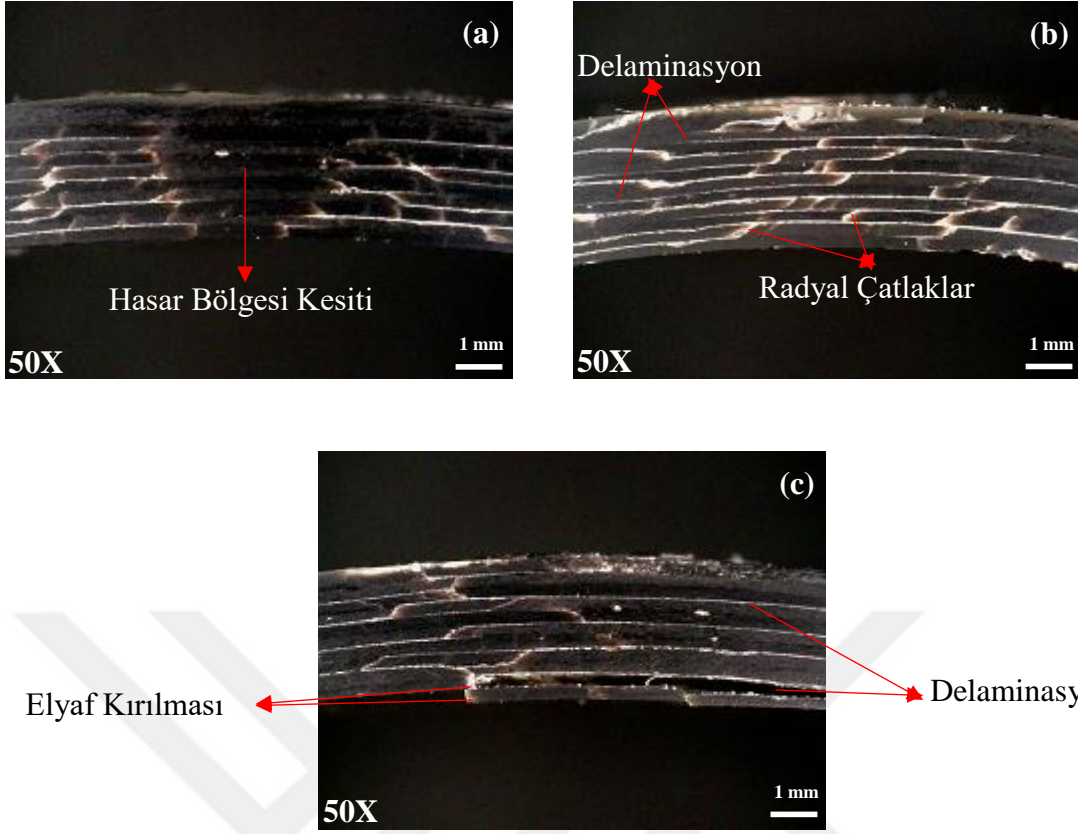
Şekil 5.10 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış BTP (basınçsız içi boş) kompozit numunelerin 15J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

Şekil 5.10’ da verilen darbeye maruz kalmış bölgenin kesitinden alınan mikroskop görüntüleri incelendiğinde, çapraz yönlenmiş radyal çatlakların oluştuğu ve delaminasyon ile hasarın ilerlediği gözlemlenmektedir.



Şekil 5.11 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış BTP (basınçsız içi boş) kompozit numunelerin 20J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

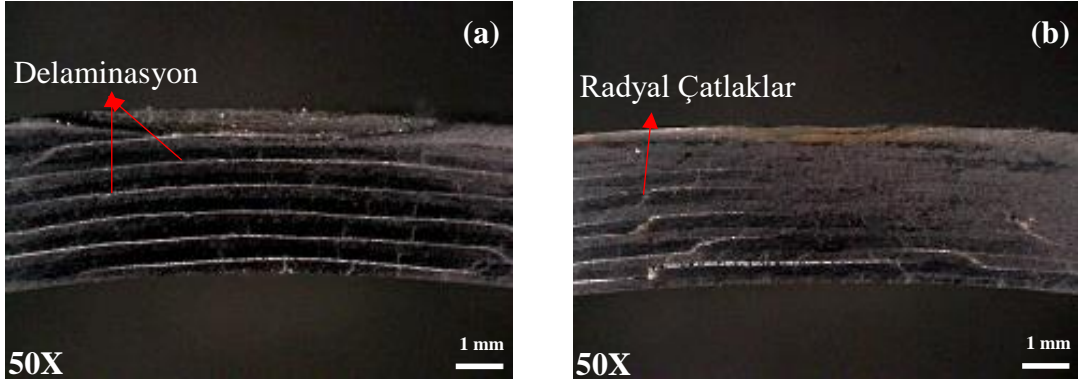
Şekil 5.11’ de düşük hızlı darbe testine maruz kalmış BTP numunesinde, darbe enerji seviyesinin 20J değerine ulaşmasıyla çapraz yönlenmiş radyal çatlak ve delaminasyon hasarlarının daha da arttığı görülmüştür. Şekil 5.11c incelendiğinde, kompozitin en alt katmanında artan eğilme ile birlikte delaminasyon hasarı neticesinde elyaf kırılması hasarının meydana geldiği görülmektedir. Meydana gelen delaminasyon hasarının $\pm 55^\circ$ sarım açısı doğrusunda yönlenmiş elyaf bantları boyunca olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5.12 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış BTP (basınçsız içi boş) kompozit numunelerin 25J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

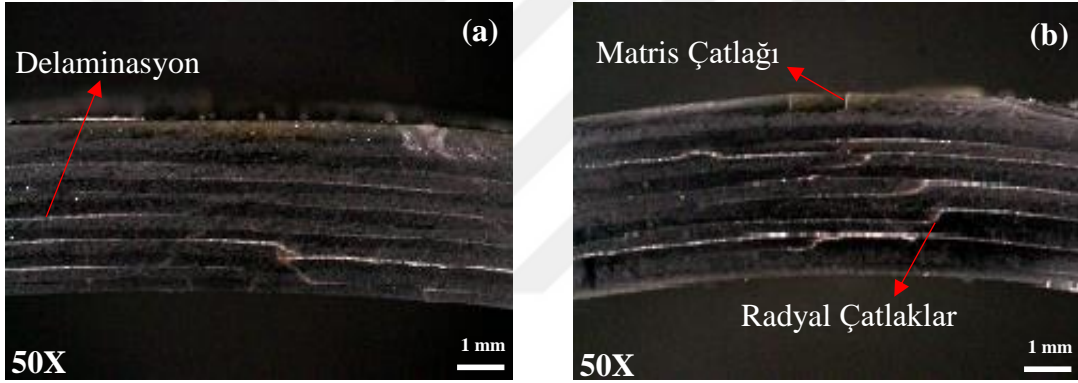
Şekil 5.12’ de 25J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testine maruz kalmış BTP kompozit numunelerde darbe enerji seviyesinin 25J’e ulaşması, beraberinde meydana gelen hasarları arttırmıştır. 20J enerji seviyesindeki tespit edilen hasarların tamamı 25J enerji seviyesinde de görülmüştür. Artan enerji seviyesiyle birlikte darbe bölgesinde, lokal deplasman miktarıda artmıştır. Artan deplasman miktarı, $\pm 55^\circ$ sarım açısında bulunan bazalt elyaf bantlarını makas hareketine benzer bir şekilde açılıp kapanmaya zorlamaktadır. Bu durum elyaf boyunca debonding hasarını ve debonding hasarlarının birleşerek delaminasyon hasarlarını oluşturmasını sağlamaktadır (Demirci, 2015). Şekil 5.12c’ de görüldüğü üzere BTP kompozitin numunesinin alt tabakasında delaminasyon ve elyaf kırılması hasarını elyaf bandı doğrultusunda oluştuğu yorumlanmıştır.

Şekil 5.13’ te 15J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testine maruz kalmış, 0 Bar BTP (basınçsız içi yağ dolu) kompozit numunelerde meydana gelen hasarlar verilmiştir.



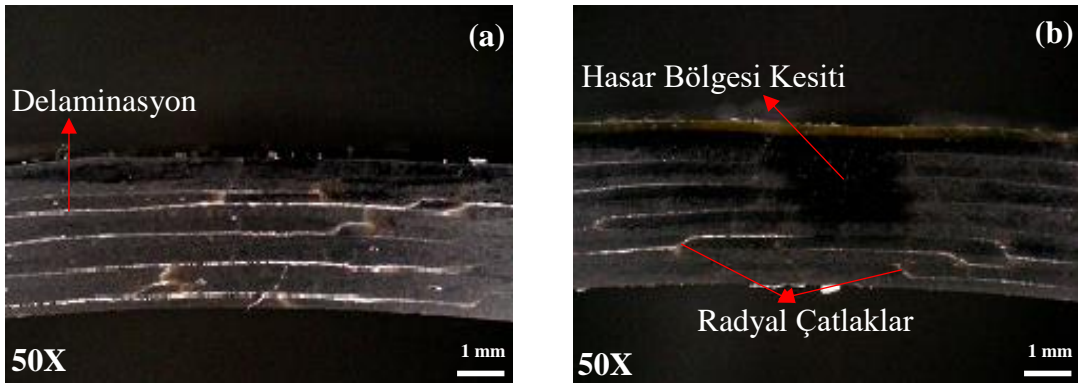
Şekil 5.13 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış 0 Bar BTP (basınçsız içi yağ dolu) kompozit numunelerin 15 J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

Şekil 5.14' te 20J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testine maruz kalmış, 0 Bar BTP kompozit numunelerde oluşan enine kesit hasar görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.14 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış 0 Bar BTP (basınçsız içi yağ dolu) kompozit numunelerin 20 J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

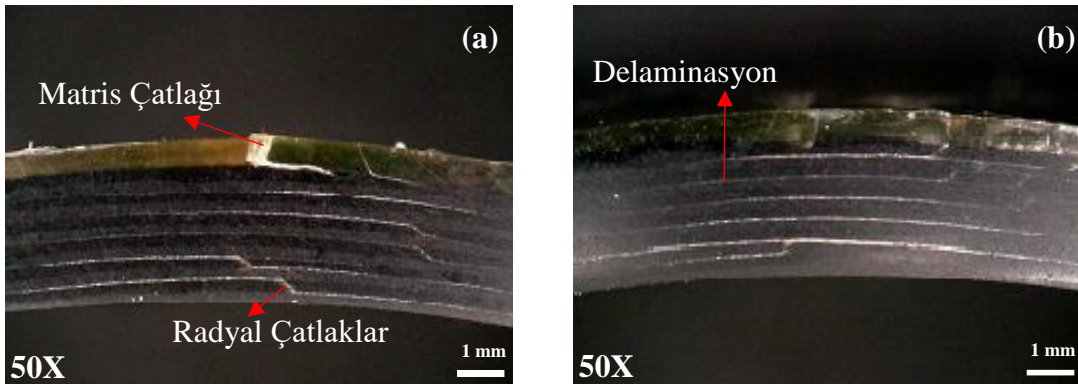
Şekil 5.15' de 25J darbe enerjisinde 0 Bar BTP kompozit numunelerde meydana gelen enine hasarlar gösterilmektedir.



Şekil 5.15 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış 0 Bar BTP (basınçsız içi yağ dolu) kompozit numunelerin 25 J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

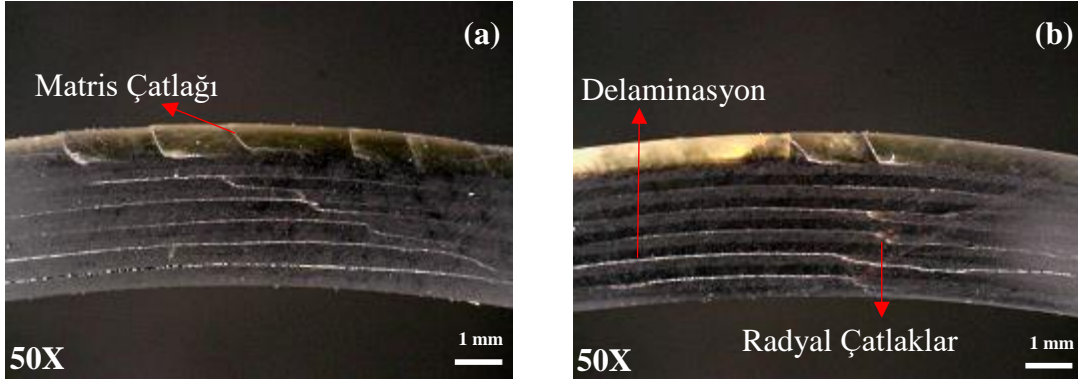
Şekil 5.13, Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’ de 15J, 20J ve 25J enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testine maruz kalmış, 0 Bar BTP numunelerinde kuvvet-deplasman grafiklerinde de görüldüğü üzere (Çizelge 5.3) BTP kompozit numunelere göre deplasman miktarları azalmıştır. Dolayısıyla darbe neticesinde lokal eğilmenin azalması, beraberinde eğilmeden kaynaklanan hasarlarında azalmasına neden olmaktadır. Hasarlar genel olarak incelendiğinde, çapraz radyal çatlaklar, delaminasyon ve en üst tabakada matris çatlaklarının oluştuğu belirlenmiştir. Hasarların BTP numunesine göre azaldığı görülmüştür. Bu sonuçtaki en büyük etkenin, 0 Bar BTP numunesinin yağ ile doldurulmasıyla, yağın kompozitin tüm iç yüzeyine mesnetleme görevi yaparak, tabakaların lokal eğilmeye karşı direncini artırmasından kaynaklı olduğu yorumlanmıştır. Enerji seviyesinin artmasıyla beraber radyal çatlaklar ve delaminasyon hasarlarının arttığı Şekil 5.15b’ de görülmektedir. Aynı zamanda 25J darbe enerji seviyesinde, vurucu ucun darbe ile birlikte temas ettiği tabakayı ezmeye zorlayarak eğilmeye maruz bıraktığı Şekil 5.15c’ de görülmektedir. Vurucu ucun ezmeye zorladığı kesit alanında üçgenimsi bir bölge oluşturduğu ve oluşan bu bölgede hasarların oluşmadığı belirlenmiştir.

Şekil 5.16’ da 15J enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testine maruz kalmış, 5 Bar BTP (5bar yağ basınçlı) kompozit numunelerde meydana gelen hasarlar verilmiştir.

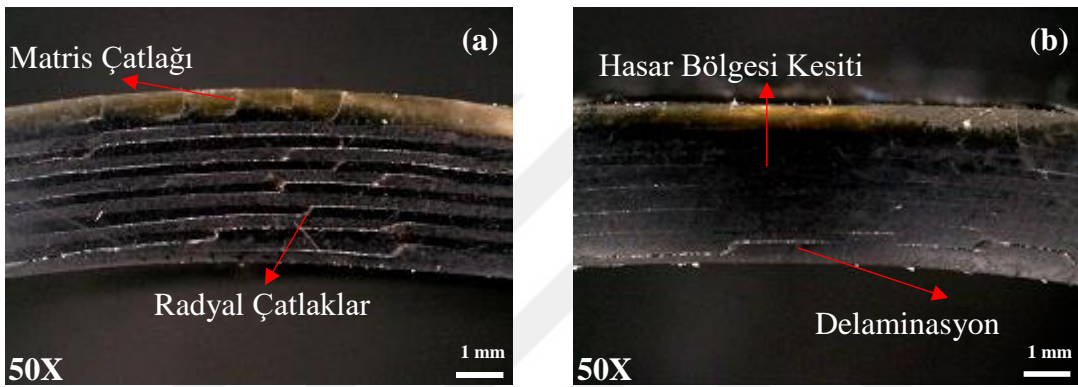


Şekil 5.16 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) kompozit numunelerin 15J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

Şekil 5.17’ de 20J ve Şekil 5.18’ de 25J darbe enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe testine maruz kalmış, 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) kompozit numunelerde enine hasar görüntülerine yer verilmiştir.



Şekil 5.17 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) kompozit numunelerin 20J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri



Şekil 5.18 Düşük hızlı darbe testine maruz kalmış 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) kompozit numunelerin 25J darbe enerji seviyesinde enine kesit hasar görüntüleri

Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’ de verilen 5 Bar BTP numunelerinin enine kesit hasarları incelendiğinde, BTP ve 0 Bar BTP numunelerinden farklı olarak tüm enerji seviyelerinde üst tabakadaki yüzey matris çatlaklarının arttığı açıkça görülmektedir. Çizelge 5.2’ de kuvvet-temas süresi değerlerine bakıldığında maksimum temas kuvveti 5 Bar BTP numunelerinde görülmektedir. Artan kuvvet ile birlikte malzeme meydana gelen matris çatlakları da oldukça artmaktadır. BTP numunesi ile kıyaslandığında oluşan hasarların 5 Bar BTP numunesinde daha az olduğu göze çarpmaktadır. 0 Bar BTP numunesinde oluşan mesnetleme etkisinin, 5 Bar BTP numunesinde daha çok arttığını Çizelge 5.3’ deki deplasman miktarlarının azalmasından kaynaklı olarak yorumlanmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

± 6 tabakalı $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip BTP kompozit boruların düşük iç basınç altında düşük hızlı darbe davranışına etkilerinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen sonuçlar;

1. Düşük hızlı darbe deneylerinde darbe enerjisinin artmasıyla tüm BTP/Epoksi kompozit boru numunelerinde maksimum temas kuvveti ve temas süresi artmaktadır.

2. Aynı darbe enerji seviyesinde 5 Bar BTP (5 bar yağ basınçlı) kompozit numunesinde en yüksek maksimum temas kuvveti ve en düşük temas süresi değerlerine sahiptir. BTP (basınçsız) numunesi ise en düşük maksimum temas kuvveti ve en yüksek temas süresi değerlerine sahiptir. Bu durum içi yağ dolu numunelerin eğilmeye karşı gösterdiği direnç olarak yorumlanmıştır.

3. 0 Bar BTP ve 5 Bar BTP numunelerine bakıldığında artan basınç ile birlikte temas kuvveti artmıştır. Basınçlandırılmış yağın tüm iç yüzeyi kuvvetlendirerek, tabakalar arası eğilmeye karşı direnci daha çok arttığı düşünülmektedir.

4. Artan darbe enerji seviyesiyle birlikte deplasman değerleri de artmaktadır.

5. Tüm enerji seviyelerinde en yüksek deplasman değerleri BTP numunesinde görülürken, en düşük deplasman değerleri ise 5 Bar BTP numunesinde görülür. BTP numunesinin içinin boş olmasından kaynaklı, mesnetleme özelliğinin olmamasından dolayı en yüksek çökme miktarına sahip olduğu ifade edilmiştir.

6. Darbe enerji seviyesindeki artış ile maksimum yutulan enerji değerleri de artış göstermektedir.

7. Tüm enerji seviyelerinde en düşük maksimum yutulan enerji değeri BTP numunesinde, en yüksek ise 5 Bar BTP numunesinde görülür.

8. Artan darbe enerjisi ile % yutulan enerji değerleri de artmaktadır. En düşük % yutulan (absorbe edilen) enerji değeri BTP numunesinde görülürken, en yüksek % yutulan enerji değerine 5 Bar BTP numunesi sahiptir.

9. Mesnetleme etkisinin görüldüğü 0 Bar BTP ve 5 Bar BTP numunelerinde % yutulan enerji miktarları benzerlik göstermektedir. Bu durum eğilme rijitliğine etki eden çökme miktarındaki azalmanın birbirine yakın olmasından kaynaklıdır.

10. BTP numunesinde oluşan hasar türleri delaminasyon, radyal çatlaklar ve elyaf kırılması iken 0 ve 5 Bar BTP numunelerinde delaminasyonlar, radyal çatlaklar ve matris çatlakları şeklinde görülmektedir.

11. Artan darbe enerji seviyesi ile birlikte radyal çatlak ve delamasyon hasarlarının da artış gösterdiği görülmüştür.

12. BTP numunesinin en yüksek deplasman miktarının ihtiva ettiği, böylece darbe ile birlikte bölgesel eğilmenin de artmasıyla hasar miktarlarının arttığı belirlenmiştir. 20J ve 25J darbe enerji seviyelerinde elyaf kırılma hasarları tespit edilmiştir.

13. 0 Bar BTP ve 5 Bar BTP numunelerinde mesnetleme etkisinden dolayı malzeme eğilmeye karşı direnç göstermiştir. Böylece hasar miktarının azaldığı yorumlanmıştır. Bu numunelerde BTP numunesine göre daha az radyal çatlaklar ve delaminasyon hasarları olduğu mikroskop görüntülerinde belirtilmiştir.

6.2 Öneriler

Yapılan tez çalışmasında $\pm 55^\circ$ sarım açısına sahip filaman sarım BTP/Epoksi kompozit borular kullanılmıştır.

1. Üretilen numunelerde doğalgaz hatlarında 3-5 bar arası basınç kullanımı gerçekleştiği için 5 bar basınçlı deneyler yapılmıştır. Farklı basınç seviyelerinde çalışmalar yapılabilir.

2. Düşük hızlı darbe deneylerinde 15J, 20J ve 25J darbe enerji seviyeleri tercih edilmiştir. Yapılacak olan çalışmalarda daha farklı darbe enerji seviyeleri tercih edilebilir.

3. BTP kompozitlere patlatma, 3 nokta eğme gibi farklı mekanik testler yapılabilir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S. J. I. o. C. S., Cambridge University Press, pp, 1998, Low-velocity impact damage, 135-160.
- Akkurt, S., 1991, Plastik Malzeme Bilgisi Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Aricasoy, O. J. İ. T. O., 2006, Kompozit sektör raporu, 4-34.
- Arikan, H. J. C. S., 2010, Failure analysis of (± 55) 3 filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure, 92 (1), 182-187.
- Ceyhun, V. ve Turan, M. J. M. v. M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı, 516, 35-41.
- Colombo, C., Vergani, L. ve Burman, M. J. C. s., 2012, Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites, 94 (3), 1165-1174.
- Czigány, T. ve Deák, T. J. P. C., 2012, Preparation and Manufacturing Techniques for Macro-and Microcomposites, 111-134.
- Deák, T. ve Czigány, T. J. T. R. J., 2009, Chemical composition and mechanical properties of basalt and glass fibers: A comparison, 79 (7), 645-651.
- Deák, T. ve Czigány, T. J. S. o. P. E., *Plastics Research Online*, 2010, Development of long-basalt fiber-reinforced thermoplastic matrix composites, 10.
- Dehkordi, M. T., Nosrati, H., Shokrieh, M. M., Minak, G., Ghelli, D. J. M. ve Design, 2010, Low velocity impact properties of intra-ply hybrid composites based on basalt and nylon woven fabrics, 31 (8), 3835-3844.
- Demir, I., Sayman, O., Dogan, A., Arikan, V. ve Arman, Y. J. C. P. B. E., 2015, The effects of repeated transverse impact load on the burst pressure of composite pressure vessel, 68, 121-125.
- Demirci, M. T., 2009, Polimer esaslı kaymalı yatakların tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Demirci, M. T., Tarakçıoğlu, N., Avcı, A. ve Erkendirici, Ö. F. J. C. P. B. E., 2014, Fracture toughness of filament wound BFR and GFR arc shaped specimens with Charpy impact test method, 66, 7-14.
- Demirci, M. T., 2015, SiO₂ nanopartikül katkısının yüzey çatlaklı ve çatlaksız bazalt elyaf takviyeli kompozit boruların yorulma davranışlarına etkisi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Deniz, M. E., Karakuzu, R., Sari, M. ve Icten, B. M. J. J. o. C. M., 2012, On the residual compressive strength of the glass–epoxy tubes subjected to transverse impact loading, 46 (6), 737-745.
- Deniz, M. E. ve Karakuzu, R. J. C. P. B. E., 2012, Seawater effect on impact behavior of glass–epoxy composite pipes, 43 (3), 1130-1138.
- Deniz, M. E., Ozen, M., Ozdemir, O., Karakuzu, R. ve Icten, B. M. J. C. P. B. E., 2013, Environmental effect on fatigue life of glass–epoxy composite pipes subjected to impact loading, 44 (1), 304-312.
- Dorey, G., Bishop, S., Curtis, P. J. C. S. ve Technology, 1985, On the impact performance of carbon fibre laminates with epoxy and PEEK matrices, 23 (3), 221-237.
- Dorigato, A. ve Pegoretti, A. J. J. o. C. M., 2012, Fatigue resistance of basalt fibers-reinforced laminates, 46 (15), 1773-1785.
- Ekşi, O., 2007, Plastik esaslı malzemelerin ısıl şekil verme özelliklerinin incelenmesi.
- Ellyin, F., Maser, R. J. C. S. ve Technology, 2004, Environmental effects on the mechanical properties of glass-fiber epoxy composite tubular specimens, 64 (12), 1863-1874.

- Fiore, V., Di Bella, G., Valenza, A. J. M. ve Design, 2011, Glass–basalt/epoxy hybrid composites for marine applications, 32 (4), 2091-2099.
- Fried, J. R., 2014, Polymer science and technology, Pearson Education, p.
- Gemi, L., Tarakçioğlu, N., Akdemir, A., Şahin, Ö. S. J. M. ve Design, 2009, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy (± 75) 2 filament-wound pipes under pure internal pressure, 30 (10), 4293-4298.
- Gemi, L., Kara, M. ve Avcı, A. J. C. P. B. E., 2016, Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes, 106, 154-163.
- Gemi, L., Kayrıçı, M., Uludağ, M., Gemi, D. S. ve Şahin, Ö. S. J. C. P. B. E., 2018, Experimental and statistical analysis of low velocity impact response of filament wound composite pipes, 149, 38-48.
- Gemi, L. J. S. Ü. F. B. E., Konya, 2004, Filaman sarım CTP boruların iç basınç etkisi altında yorulma davranışı.
- Gning, P., Tarfaoui, M., Collombet, F. ve Davies, P. J. J. o. c. m., 2005, Prediction of damage in composite cylinders after impact, 39 (10), 917-928.
- Griffin, C. F., 1987, Damage tolerance of toughened resin graphite composites, In: Toughened composites, Eds: ASTM International, p.
- Hawa, A., Majid, M. A., Afendi, M., Marzuki, H., Amin, N., Mat, F., Gibson, A. J. M. ve Design, 2016, Burst strength and impact behaviour of hydrothermally aged glass fibre/epoxy composite pipes, 89, 455-464.
- Jenq, S. ve Mo, J. J. A. j., 1996, Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites, 34 (2), 375-384.
- Kaneko, T., Ujihashi, S., Yomoda, H. ve Inagi, S. J. T.-W. S., 2008, Finite element method failure analysis of a pressurized FRP cylinder under transverse impact loading, 46 (7-9), 898-904.
- Kara, M., 2006, Düşük hızlı darbeye maruz tabakalı kompozitlerin dinamik cevabı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kara, M., 2012, Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım CTP boruların iç basınç altındaki hasar davranışı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Kara, M., Uyaner, M., Avcı, A. ve Akdemir, A. J. C. P. B. E., 2014, Effect of non-penetrating impact damages of pre-stressed GRP tubes at low velocities on the burst strength, 60, 507-514.
- Kaynak, C., Erdiller, E. S., Parnas, L. ve Senel, F. J. P. t., 2005, Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes, 24 (5), 648-655.
- Kim, M. T., Kim, M. H., Rhee, K. ve Park, S. J. C. P. B. E., 2011, Study on an oxygen plasma treatment of a basalt fiber and its effect on the interlaminar fracture property of basalt/epoxy woven composites, 42 (3), 499-504.
- Kobayashi, S., Kawahara, M. J. C. P. A. A. S. ve Manufacturing, 2012, Effects of stacking thickness on the damage behavior in CFRP composite cylinders subjected to out-of-plane loading, 43 (1), 231-237.
- Manikandan, V., Jappes, J. W., Kumar, S. S. ve Amuthakkannan, P. J. C. P. B. E., 2012, Investigation of the effect of surface modifications on the mechanical properties of basalt fibre reinforced polymer composites, 43 (2), 812-818.
- Martens, M., Ellyin, F. J. C. P. A. A. S. ve Manufacturing, 2000, Biaxial monotonic behavior of a multidirectional glass fiber epoxy pipe, 31 (9), 1001-1014.
- Martins, L. A., Bastian, F. L., Netto, T. A. J. M. ve Design, 2012, Structural and functional failure pressure of filament wound composite tubes, 36, 779-787.

- Meijer, G., Ellyin, F. J. C. P. A. A. S. ve Manufacturing, 2008, A failure envelope for ± 60 filament wound glass fibre reinforced epoxy tubulars, 39 (3), 555-564.
- Mertiny, P., Ellyin, F. J. C. P. A. A. S. ve Manufacturing, 2002, Influence of the filament winding tension on physical and mechanical properties of reinforced composites, 33 (12), 1615-1622.
- Mertiny, P. ve Gold, A. J. P. t., 2007, Quantification of leakage damage in high-pressure fibre-reinforced polymer composite tubular vessels, 26 (2), 172-179.
- Mertiny, P. J. P. T., 2012, Leakage failure in fibre-reinforced polymer composite tubular vessels at elevated temperature, 31 (1), 25-30.
- Mili, F. ve Necib, B. J. C. s., 2001, Impact behavior of cross-ply laminated composite plates under low velocities, 51 (3), 237-244.
- Onder, A., Sayman, O., Dogan, T. ve Tarakcioglu, N. J. C. s., 2009, Burst failure load of composite pressure vessels, 89 (1), 159-166.
- Palmer, A. C. ve King, R. A., 2004, Subsea pipeline engineering, PennWell Books, p.
- Park, R. ve Jang, J. J. P. c., 2001, Impact behavior of aramid fiber/glass fiber hybrid composites: the effect of stacking sequence, 22 (1), 80-89.
- Pavlovski, D., Mislavsky, B. ve Antonov, A. J. R. p., 2007, CNG cylinder manufacturers test basalt fibre, 51 (4), 36-39.
- Perreux, D., Thiebaud, F. J. C. s. ve technology, 1995, Damaged elasto-plastic behaviour of $[+ \theta, - \theta]$ n fibre-reinforced composite laminates in biaxial loading, 54 (3), 275-285.
- Perreux, D., Joseph, E. J. C. s. ve technology, 1997, The effect of frequency on the fatigue performance of filament-wound pipes under biaxial loading: Experimental results and damage model, 57 (3), 353-364.
- Petrucci, R., Santulli, C., Puglia, D., Sarasini, F., Torre, L., Kenny, J. J. M. ve Design, 2013, Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion, 49, 728-735.
- Qi, D. ve Cheng, G. J. P. c., 2007, Fatigue behavior of filament-wound glass fiber reinforced epoxy composite tubes under tension/torsion biaxial loading, 28 (1), 116-123.
- Quagliarini, E., Monni, F., Lenci, S., Bondioli, F. J. C. ve Materials, B., 2012, Tensile characterization of basalt fiber rods and ropes: A first contribution, 34, 372-380.
- Roberts, P. D., 1995, Crack growth retardation by carbon fibre composite patching: An application to steel pressure vessel repair.
- Salavatian, M. ve Smith, L. J. J. o. C. M., 2012, Matrix damage in composite pressure vessels with a bias fiber orientation, 46 (22), 2793-2802.
- Samanci, A., Avci, A., Tarakcioglu, N. ve Şahin, Ö. S. J. J. o. m. s., 2008, Fatigue crack growth of filament wound GRP pipes with a surface crack under cyclic internal pressure, 43 (16), 5569-5573.
- Samanci, A., Tarakçioglu, N. ve Akdemir, A. J. J. o. C. M., 2012, Fatigue failure analysis of surface-cracked ($\pm 45^\circ$) 3 filament-wound GRP pipes under internal pressure, 46 (9), 1041-1050.
- Samancı, A., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP boruların iç basınç altında yorulma davranışı, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Sarasini, F., Tirillò, J., Ferrante, L., Valente, M., Valente, T., Lampani, L., Gaudenzi, P., Cioffi, S., Iannace, S. ve Sorrentino, L. J. C. P. B. E., 2014, Drop-weight impact behaviour of woven hybrid basalt-carbon/epoxy composites, 59, 204-220.

- Sari, M., Karakuzu, R., Deniz, M. E. ve Icten, B. M. J. J. o. C. M., 2012, Residual failure pressures and fatigue life of filament-wound composite pipes subjected to lateral impact, 46 (15), 1787-1794.
- Savaşçı, Ö., Uyanık, N. ve Akovalı, G. J. Ç. K., İstanbul, Türkiye, 1998, Plastikler ve plastik teknolojisi.
- Sayer, M., 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi.
- Sfarra, S., Ibarra-Castaneda, C., Santulli, C., Paoletti, A., Paoletti, D., Sarasini, F., Bendada, A. ve Maldague, X. J. C. P. B. E., 2013, Falling weight impacted glass and basalt fibre woven composites inspected using non-destructive techniques, 45 (1), 601-608.
- Shi, J.-W., Zhu, H., Wu, G. ve Wu, Z.-S. J. C. P. B. E., 2014, Tensile behavior of FRP and hybrid FRP sheets in freeze-thaw cycling environments, 60, 239-247.
- Sierakowski, R. L., Chaturvedi, S. K. J. D. L. ve Characterization of Fiber-Reinforced Composites, b. R. L. S., Shive K. Chaturvedi, pp. 252. ISBN 0-471-13824-X. Wiley-VCH, February . 1997, Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites, 252.
- Stronge, W. J., 2018, Impact mechanics, Cambridge university press, p.
- Subagia, I. A., Tijing, L. D., Kim, Y., Kim, C. S., Vista IV, F. P. ve Shon, H. K. J. C. P. B. E., 2014, Mechanical performance of multiscale basalt fiber-epoxy laminates containing tourmaline micro/nano particles, 58, 611-617.
- Şahin, A., 2011, Düşük hızlı darbe görmüş filaman sarım e-camı/epoksi boruların iç basınç altında yorulma davranışlarının incelenmesi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Şahin, Y., 2000, Kompozit malzemelere giriş, Gazi kitabevi, p.
- Tarakcioğlu, N., Akdemir, A. ve Avci, A. J. C. P. B. E., 2001, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack, 32 (2), 131-138.
- Tarakcioğlu, N., Samanci, A., Arıkan, H. ve Akdemir, A. J. C. s., 2007, The fatigue behavior of (± 55) 3 filament wound GRP pipes with a surface crack under internal pressure, 80 (2), 207-211.
- Tarakçıoğlu, N., Gemi, L., Yapıcı, A. J. C. s. ve technology, 2005, Fatigue failure behavior of glass/epoxy ± 55 filament wound pipes under internal pressure, 65 (3-4), 703-708.
- Taşyürek, M., 2014, Yüzey çatlaklı ve çatlaksız $\pm 55^\circ$ filaman sarım cnt takviyeli ctp kompozit boruların mekanik özelliklerinin ve iç basınç etkisi altındaki yorulma davranışının araştırılması, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Uluşen, T., 2008, Plastik esaslı kompozit malzemelerin kimyasal kaplama işlemlerinin incelenmesi.
- Uyaner, M., Kara, M. ve Şahin, A. J. C. P. B. E., 2014, Fatigue behavior of filament wound E-glass/epoxy composite tubes damaged by low velocity impact, 61, 358-364.
- Wakayama, S., Kobayashi, S., Imai, T., Matsumoto, T. J. C. P. A. A. S. ve Manufacturing, 2006, Evaluation of burst strength of FW-FRP composite pipes after impact using pitch-based low-modulus carbon fiber, 37 (11), 2002-2010.
- Wang, X., Hu, B., Feng, Y., Liang, F., Mo, J., Xiong, J., Qiu, Y. J. C. S. ve Technology, 2008, Low velocity impact properties of 3D woven basalt/aramid hybrid composites, 68 (2), 444-450.
- Wang, X. ve Wu, Z. J. C. s., 2010, Evaluation of FRP and hybrid FRP cables for super long-span cable-stayed bridges, 92 (10), 2582-2590.
- Wei, B., Cao, H. ve Song, S., 2010, RETRACTED: environmental resistance and mechanical performance of basalt and glass fibers, Elsevier.

- Wei, B., Cao, H., Song, S. J. C. P. A. A. S. ve Manufacturing, 2011, Surface modification and characterization of basalt fibers with hybrid sizings, 42 (1), 22-29.
- Wu, Z., Wang, X., Iwashita, K., Sasaki, T. ve Hamaguchi, Y. J. C. P. B. E., 2010, Tensile fatigue behaviour of FRP and hybrid FRP sheets, 41 (5), 396-402.
- Yeboah, D., Taylor, S., McPolin, D., Gilfillan, R. J. C. ve Materials, B., 2013, Pull-out behaviour of axially loaded Basalt Fibre Reinforced Polymer (BFRP) rods bonded perpendicular to the grain of glulam elements, 38, 962-969.
- Zhang, Y., Yu, C., Chu, P. K., Lv, F., Zhang, C., Ji, J., Zhang, R., Wang, H. J. M. C. ve Physics, 2012, Mechanical and thermal properties of basalt fiber reinforced poly (butylene succinate) composites, 133 (2-3), 845-849.
- Zhu, L., Sun, B. ve Gu, B. J. J. o. C. M., 2012, Frequency features of basalt filament tows under quasi-static and high strain rate tension, 46 (11), 1285-1293.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Uğur YOZGAT
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Ankara 28.02.1993
Telefon : 0554 666 40 32
Faks : -
e-mail : uuryozgat@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Çankaya İncesu Lisesi, ANKARA	2011
Üniversite	: Selçuk Üniversitesi, KONYA	2015
Yüksek Lisans	: Konya Teknik Üniversitesi, KONYA	-
Doktora	: -	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2018	AHS	Metalurji Mühendisi
2017	Özkar-Isı	Şantiye Şefi

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER

İngilizce

BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

YAYINLAR

Demirci, M.T., Yozgat, U., Mesnet Farklılıklarının Bazalt Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışlarının Etkisinin İncelenmesi, Selçuk-Teknik Dergisi, Cilt 18, Sayı:2-2019. (Yüksek Lisans Tezinden Yapılmıştır.)