



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**CAM ELYAF TAKVİYELİ KOMPOZİT
BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
HİDROTERMAL YAŞLANDIRMANIN ETKİSİ**

YASİN AKIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Ağustos 2018
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Yasin AKIN tarafından hazırlanan “Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Boruların Mekanik Özelliklerine Hidrotermal Yaşlandırmanın Etkisi” adlı tez çalışması 06/08/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof.Dr.Mesut UYANER

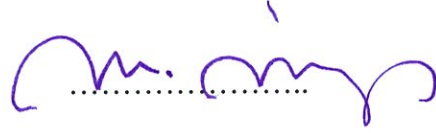
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Memduh KARA

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Ahmet AVCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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

İmza

Yasin AKIN

ÖZET**YÜKSEK LİSANS TEZİ****CTP KOMPOZİT BORULARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
HİDROTERMAL YAŞLANDIRMANIN ETKİSİ****Yasin AKIN****Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı****Danışman: Doktor Öğretim Üyesi Memduh KARA****2018, 77 Sayfa****Jüri****Dr. Öğr. Üyesi Memduh KARA****Prof. Dr. Mesut UYANER****Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Turan DEMİRCİ**

Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) kompozit malzemeler, yüksek kimyasal ve mekanik özellikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan malzemelerdir. CTP kompozit malzemelerin en önemli endüstriyel uygulamalarından bir tanesini de CTP kompozit borular oluşturmaktadır. Yüksek korozyon dayanımına ve yüksek mekanik mukavemetine ihtiyaç duyulduğu uygulamalarda metal ve diğer malzemelerin yerine CTP kompozit borular tercih edilmektedirler. Çoğunlukla içme-kullanma suyu veya kanalizasyon hatlarında, kimyasal madde içeren akışanların taşınmasında, petrol ve doğalgaz iletim hatlarında kullanılmaktadır. Kullanılmakta olan kompozit boruların, çalışma ortamına göre mekanik özellikleri değişmektedir. Dolayısı ile kompozit borunun dayanımının çalışma ortamına göre belirlenmesi, borunun mukavemeti, ömrü açısından son derece önemlidir.

Çalışmanın amacı, üç farklı tabaka sayısına sahip kompozit borularda hidrotermal yaşlandırmanın teğetsel dayanımına ve darbe davranışına etkisini incelemektir. Numune olarak filaman sarım metoduyla imal edilen (± 55) sarım açısına sahip 6, 8 ve 10 tabakalı cam takviyeli plastik kompozit borular kullanılmıştır. 80 °C saf suda hidrotermal yaşlandırılan numunelerin teğetsel gerilmelerini belirlemek için ASTM D 2290 standardına göre halka çekme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yaşlandırma süresinin artması ile teğetsel gerilmede azalmaların olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yaşlandırılan boruların hasar davranışları da incelenmiştir ve yaşlandırma etkisinin borulardaki hasarı artırdığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam takviyeli kompozit boru, Halka çekme testi, Düşük hızlı darbe, Hasar davranışı, Hidrotermal yaşlandırma, Teğetsel gerilme dayanımı,

ABSTRACT**MS THESIS****EFFECT OF HYDROTHERMAL AGEING ON THE
MECHANICAL PROPERTIES OF GRP COMPOSITE TUBES****Yasin AKIN****THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING****Advisor: Asst. Prof. Dr. Memduh KARA****2018, 77 Pages****Jury****Asst. Prof. Memduh KARA****Prof. Mesut UYANER****Asst. Prof. Mehmet Turan DEMİRCİ**

Glass Fiber Reinforced Plastic (GRP) composite materials are widely used materials due to their high chemical and mechanical strength. One of the most important industrial applications of GRP composite materials is composing GRP composite tubes. In applications where high corrosion resistance and high mechanical strength are needed, GRP composite tubes are preferred instead of metal and other materials. It is mostly used in drinking-use water or sewer lines, transporting chemicals containing substances, oil and natural gas transmission lines. The mechanical properties of the composite tubes used vary according to the working environment. Therefore, determination of strength of composite tubes according to work environment is extremely important in terms of strength and life of the tube.

The aim of this study is to investigate the effect of hydrothermal aging on the tensile strength and impact behavior of composite pipes with three different layer. In this study, 6, 8 and 10 layered glass fiber reinforced plastic composite tubes with winding angles (± 55) marked with filament winding method were used as samples. Hoop tensile strength tests according to ASTM D 2290 were performed to determine the tangential stresses of the hydrothermally aged samples in 80 °C pure water. As a result of the experiments, it has been determined that tensile stress decreases with increase aging time. Damage behavior of aged pipes is also investigated and it is observed that the aging effect increases the pipe damage.

Keywords: Glass reinforced composite pipe, Hoop tensile strength test, Low velocity impact Damage behavior, Hydrothermal aging, Tensile strength,

ÖNSÖZ

Tez önerisinin belirlenmesinden çalışmanın tamamlanmasına kadar her türlü yardım ve desteklerini sağlayan Tez Danışmanım Doktor Öğretim Üyesi Memduh KARA'ya,

Çekme deneylerinde Selçuk Üniversite'si Teknoloji Fakültesi Laboratuvarındaki deney cihazı ve donanımlarını kullanmak üzere desteklerini esirgemeyen Prof. Dr. Necmettin TARAĞÇIOĞLU ve deneylerin yapılması sırasında zamanını ayırdığı için Arş. Gör. Harun SEPET'e,

Çalışmalarımın özellikle darbe deneylerinin yapılması esnasında teorik ve deneysel bilgilerinden ve tecrübelerinden faydalandığım Prof. Dr. Mesut UYANER ve Doktor Öğretim Üyesi Mehmet Emin ÇETİN'e,

Yaşlandırma ünitesi ve diğer çalışmalarda yardımlarını esirgemeyen Makine Mühendisi Safa AK'a,

Yine yüksek lisans eğitimim boyunca bana her türlü desteklerini esirgemeyen Akşehir Belediye Başkanı Dr. Salih AKKAYA'ya,

Son olarak da, çalışmalarımın başlangıcından bitimine kadar hiçbir fedakârlıktan kaçmadan maddi ve manevi desteklerini benden esirgemeyen abim, eşi ve ailesine,

SONSUZ TEŞEKKÜRÜ BİR BORÇ BİLİRİM.

Yasin AKIN
KONYA-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
3. TEORİK ESASLAR.....	7
3.1. Kompozit Malzeme	7
3.1.1. Takviye Edilen Malzemeler	8
3.1.1.1. Termoset matrisler	8
3.1.2. Takviye Eden Malzemeler	9
3.1.2.1. Cam elyaflar	10
3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	12
3.1.3.1. Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler	12
3.1.4. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri	13
3.1.4.1. Filaman sarım yöntemi	14
3.2. Hidrotermal Yaşlanma	16
3.3. Çekme Deneyi	18
3.3.1. Deneyin amacı	18
3.3.2. Tanımlar	18
3.3.3. Deneyin yapılışı	20
3.4. Kompozit Malzemelerde Darbe Hasarı	21
3.4.1. Düşük hızlı darbenin belirlenmesi	22
3.4.2. Ağırlık düşürme testi	23
3.4.2.1. Serbest düşme hareketi	24
3.4.2.2. Darbe Enerjisi	24
3.4.3. Darbe sonucu oluşan hasar modları	25
3.4.3.1. Matris Hasarı	26
3.4.3.2. Delaminasyon	27
3.4.3.3. Elyaf Hasarı	28
3.4.3.4. Nüfuziyet	28
4. DENEYSEL YÖNTEM.....	29
4.1. Giriş.....	29
4.2. Malzeme Üretimi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	29
4.3. Hidrotermal Yaşlandırma.....	30
4.4. Halka Çekme Testi.....	31
4.5. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri.....	34
4.6. CTP Kompozit Borularda Darbe Karakteristiği.....	35

4.6.1. Kuvvet-zaman eğrileri ($F-t$)	36
4.6.2. Kuvvet-çökme eğrileri ($F-d$)	36
4.6.3. Hız-zaman eğrileri ($V-t$)	38
4.6.4. Enerji-zaman eğrileri($Ea-t$)	38
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	40
5.1. Halka Çekme Deneyi	40
5.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi	46
5.2.1. Numunenin hasar davranışına darbe enerjisinin etkisi.....	46
5.2.2. Numunenin hasar davranışına yaşlandırmanın etkisi.....	52
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	59
6.1. Sonuçlar	62
6.2. Öneriler	63
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	64

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1 Helisel flaman sargı makinesi (Şahin 2004).....	15
Şekil 3.2 Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı (web.harran.edu.tr) ..	19
Şekil 3.3 Gevrek (a), sünek (b) malzemenin kırılma davranışı (web.harran.edu.tr)	20
Şekil 3.4 Standartlara uygun dairesel kesitli bir çekme numunesi (web.harran.edu.tr) .	21
Şekil 3.5 Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı (Ceyhun ve Turan 2003)	24
Şekil 3.6 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006).....	25
Şekil 3.7 Darbe testi sonrasında tipik bir yük-zaman eğrisi (Shyr & Pan 2003).....	25
Şekil 3.8 İki tip matris çatlaması;(a) kayma çatlağı,(b)çekme çatlağı (Abrat, 1998).....	26
Şekil 3.9 (a) Ters çevrilmiş çam ağacı (b) çam ağacı şeklindeki hasar görüntüleri (Abrate 1998).....	26
Şekil 3.10 Delaminasyon alanının elyaf yönlendirme açısına göre şekli (Abrate 1998)..	27
Şekil 4.1 Numune geometrisi (Demirci ve ark. 2011).....	30
Şekil 4.2 Hidrotermal yaşlandırma ünitesi	30
Şekil 4.3 Hidrotermal yaşlandırma ünitesi şematik gösterimi.....	31
Şekil 4.4 Prosedür A' ya göre halka çekme numuneleri (Kara ve Uyaner 2017)	32
Şekil 4.5 (a) Üniversal çekme-basma test cihazı, (b) Halka çekme testi ekipmanları....	33
Şekil 4.6 Halka çekme testi	33
Şekil 4.7 Ağırlık düşürme test cihazı.....	34
Şekil 4.8 Vurucu ve kuvvet algılayıcı bağlantısı	35
Şekil 4.9 Düşük hızlı darbe cihazının elektronik kontrol ünitesi	35
Şekil 4.10 Kuvvet-zaman ($F-t$) eğrileri (Sayer 2009).....	36
Şekil 4.11 Kuvvet-çökme ($F-d$) eğrileri (Sayer 2009)	37
Şekil 4.12 Hız-zaman ($F-t$) eğrileri (Sayer 2009).....	38
Şekil 4.13 Enerji-zaman ($Ea-t$) eğrileri (Sayer 2009).....	39
Şekil 5.1 Çekme sonrası (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 6 tabakalı CTP kompozit numuneler	41
Şekil 5.2 Çekme sonrası (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 8 tabakalı CTP kompozit numuneler	42
Şekil 5.3 Çekme sonrası (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 10 tabakalı CTP kompozit numuneler	44

Şekil 5.4 Farklı tabaka sayılarındaki numuneler için, farklı yaşlandırma süreleri altında teğetsel gerilme değişimi	44
Şekil 5.5 (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları.....	47
Şekil 5.6 (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları.....	47
Şekil 5.7 (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları.....	48
Şekil 5.8 (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları	49
Şekil 5.9 (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti- yer değiştirme diyagramları	49
Şekil 5.10 (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti- yer değiştirme diyagramları	50
Şekil 5.11 1 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J sayılarındaki kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri	50
Şekil 5.12 2 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J sayılarındaki kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri	51
Şekil 5.13 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J sayılarındaki kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri	51
Şekil 5.14 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15J sayılarındaki kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri	51
Şekil 5.15 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları.....	52
Şekil 5.16 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları.....	53
Şekil 5.17 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları.....	53
Şekil 5.18 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları	54
Şekil 5.19 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları	54
Şekil 5.20 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları	55

Şekil 5.21 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas noktasındaki hasar görüntüleri	56
Şekil 5.22 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas noktasındaki hasar görüntüleri	57
Şekil 5.23 (a) 5, (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas noktasındaki hasar görüntüleri	58



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1 Yaygın olarak kullanılan termoset matrislerin özellikleri (Mallick, 2008) ..	9
Çizelge 3.2 Farklı türdeki cam elyaflarının özellikleri.....	11
Çizelge 4.1 Elyaf ve matris özellikleri (Samancı 2004)	29
Çizelge 4.2 Hidrotermal yaşlandırma süreleri ve farklı tabaka sayısı için numune sayısı	29
Çizelge 5.1 Çekme deneyi sonucunda numunelerin teğetsel gerilme değerleri	49



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

σ : Gerilme

σ_a : Eksenel gerilme

σ_{ϵ} : Çekme gerilmesi

σ_T : Teğetsel gerilme

σ_K : Kopma gerilmesi

E : Elastisite modülü

ϵ : Birim şekil değiştirme

ρ : Özgül Ağırlık

KU : Yüzde kopma uzaması

V : Hız

t : Zaman

d : Deplasman, yer değiştirme

Ea : Yutulan enerji

F : Kuvvet

Kısaltmalar

ASTM: American Society for Testing and Materials

CTP: Cam Elyaf Takviyeli Plastik

CFVE: Karbon Fiber / Vinil Ester

ÇYMAPE: Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen

RTM: Reçine transfer kalıplama yöntemi

UV: Ultraviyole

1. GİRİŞ

Malzeme, her geçen gün artan ihtiyaçlara cevap vermek amacı ile endüstride çok önemli bir yer tutar. Uçay, uçağ, inşaat, taşıma, otomotiv sektörü gibi geleceğin teknolojik alanları üzerinde yapılan çalışmalarda daha iyi özelliklere sahip yeni malzemeler arayışına girilmiştir. Bu arayış tasarımcıları yüksek dayanım gibi özelliği iyi olan malzemeler üzerine yönlendirmiştir.

Mukavemet/ağırlık, mukavemet/yoğunluk oranları gibi özelliklerin ön plana çıktığı alanlarda malzemenin sınırlarını zorlaması, belirli kurallar çerçevesinde birden fazla malzemeler birleştirilerek özelliklerin iyileştirilmesi gibi arayışlar malzeme alanında önemli gelişmelere yol açmıştır. Tek bir malzeme kullanmak ve sınırlı özelliklere sahip olmak yerine, farklı özelliklere sahip birden fazla malzemeyi bir araya getirip düşüncesi başarılı olmuş ve tek bir malzemede elde edilemeyen özellikler yeni malzeme ile elde edilmiştir. Belirli istenilen özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için, özellikleri ve kimyasal bileşenleri birbirinden farklı, birbiri içerisinde makro anlamda çözünemeyen iki ya da daha fazla malzemenin birleştirilmesi ile meydana gelen yeni malzemeye *kompozit malzeme* denir. Son zamanlarda çok amaçlı ürünlerden, karmaşık tasarımlı sistemlere kadar geniş bir sektöre hizmet eden kompozit malzemeler, mukavemet, hafiflik ve korozyon gibi üstün mekanik ve kimyasal özelliklerinden dolayı diğer malzemelere göre daha sık tercih edilmeye başlanmıştır. Kompozit malzemeler başta savunma sanayi olmak üzere havacılık, otomotiv, tarım, inşaat sanayi ve şehir planlama gibi birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Cam Elyaf Takviyeli Plastik (CTP) kompozit malzemeler, üstün mekanik özelliklerinden dolayı günümüz teknolojisinde tercih edilen malzemelerdir. CTP kompozit malzemeler havacılık, inşaat ve taşımacılık endüstrilerinde, enerji santrallerinde, içme suyu, sulama sistemlerinde, atık su hatlarında, yağmur suyu drenajları, hidroelektrik santrallerde, endüstriyel soğutma hatları gibi pek çok alanda tercih edilmektedirler. Cam takviyeli kompozit borular, son zamanlarda kompozit sektöründe yaygın olarak kullanılan alanlarından bir tanesi olmuştur. Yüksek korozyon direnci ve yüksek mukavemete ihtiyaç duyulduğu alanlarda tercih edilmektedir. Genellikle temiz-pis su ve kanalizasyon şebekelerinde kullanılmaktadır (Kara 2006).

CTP kompozit malzeme takviye malzemesi olarak kısa/uzun cam elyaf, matris malzemesi olarak ise epoksi, polyester veya vinilester gibi malzemeleri içeren kompozit malzemelerdir. Çalışma süreci boyunca sabit kalan iç yüzeyi sebebiyle, sürtünmeyi

azalmaktadır. Aynı zamanda CTP boruların elastisite modülü, diğer borulara göre düşüktür. Bu özellik cam elyaf takviyeli kompozit boruların ani şokları (su darbesi gibi) karşılamasına ve dolayısıyla kompozit boruların kullanım ömrüne etkimektedir. (Rafiee 2013). Ayrıca diğer boru çeşitlerine göre korozyon direnci, UV ışınları gibi etkilere karşı direnç, istenilen boyutlarda seri üretim imkânı gibi özellikler ile birçok üstün özelliği vardır.

Boru malzemesi üzerinde çevresel şartların etkisi, çalışma ortamına göre değişmektedir. Örneğin, bazik ortam takviye malzemesi cam elyafın filtreleme, çukurlaşma ve korozyonuna sebep olurken, asidik ortam ile temas eden boru deformasyon korozyonuna uğrayabilmektedir. Yaygın olarak kullanılmakta olan betonarme borular, pis su borusu olarak kullanıldıklarında hidrojen sülfürden dolayı korozyona karşı direnci düşmekte, özellikle soğuk aylarda yol ve pist drenaj sistemlerinde buz çözücü tuzlarından gelen kalsiyum klorür sıvılara kötü direnç gösterir.

Son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlayan kompozit borular çeşitli kimyasallar ile sürekli temas halindedirler. Uzun vadeli kimyasal etkisinin matris malzemesinin bozunmasına, ara yüzey bağlarının zayıflaması ve işlevinin yitirmesine sebep olabileceği göz önüne alınmalıdır. Fakat ana mekanizmaları ve sorumlu maddeleri belirlemek için çalışmalar yapmak gereklidir. Bundan dolayı kompozit borunun çalışma ortamına göre dayanımının belirlenmesi gerekir.

Bu çalışmada filaman sarım yöntemi ile sarım açısı $\pm 55^\circ$ olacak şekilde Cam Elyaf Takviyeli kompozit borular kullanılmıştır. Takviye malzemesi E-camı ve matris malzemesi olarak epoksi malzeme kullanılan CTP borular İzoreel firmasında farklı tabaka sayılarında üretilmiştir. İlk aşama olarak üretilen numuneler saf su ortamında hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır. 6, 8 ve 10 tabaka olarak hazırlanan numuneler 80°C sıcaklıktaki saf su ortamında 1, 2, 3 ve 4 hafta süre ile bekletilerek yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Yaşlandırma işlemi yapılan boru numunelerine halka çekme testi uygulanmıştır. Halka çekme deneyleri ASTM D 2290 standardına göre yapılmıştır. Ayrıca yaşlandırma işlemi uygulanan boru numunelerine farklı darbe enerji düzeylerinde ağırlık düşürme testleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen ve kompozit borunun dayanımı ve darbe karakteristiğini ortaya koyan grafikler çizilmiş ve değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeler üzerine deneysel ve teorik araştırmalar yapılmıştır. Mekanik özelliklerinin, elyaf sarım açısının ve yüzey hatalarının, ortam şartlarının, farklı yükleme şartlarında kullanım ömrüne etkisi gibi konular araştırılmıştır. Birçok farklı alanda kullanılan bu malzemeler üretim, servis, işletme ve bakım aşamaları esnasında darbe yüklerine maruz kalabilmektedirler. Bu çevresel koşullardaki hasarın önceden tahmin edilip önlemler alınması gerekmektedir. Bundan dolayıdır ki kompozit boruların sarım açısının, tabaka sayısının ve çalışma ortam şartlarının mekanik, deformasyon ve hasar mekanizmasına etkisi ile ilgili olarak birçok çalışma yapılmıştır.

Karakuzu ve ark. (2017), Takviye malzemesi cam elyaf olan kompozit boruların darbe davranışına deniz suyunun etkisini incelemişlerdir. Laboratuvar ortamında % 3.5 tuz oranına sahip deniz suyunda bekletilen borulara, 20°C ortam sıcaklığında farklı enerji seviyesinde darbeye testi uygulamışlardır. Kuru ortamda bekletme ve daldırma durumlarındaki karşılaştırmalar darbe testlerindeki temas kuvveti eğrisi ve absorbe edilen enerji verileri kullanılarak yapılmıştır. Emilen nem, tuz oranı, boru boyutu, maksimum darbe kuvveti, darbe enerjisi gibi parametreler malzeme üzerindeki hasarı etkilediklerini vurgulamışlardır.

Deniz ve ark. (2013), iç basınç altında CTP kompozit boruların çevre şartlarının ve darbe hasarının yorulma ömrüne etkisi üzerine çalışmışlardır. Boruları belirli zaman dilimlerinde deniz suyuna maruz bırakmışlardır. Farklı darbe enerjilerine ve deniz suyunda bekletme sürelerine göre, boruların yorulma ömrünü incelemişlerdir. Çalışma sonucunda deniz suyu etkisinden sonra darbe hasarına uğramış boruların yorulma ömrü, uğramamış borulara göre daha az olduğu kanısına varmışlardır. Yine Deniz ve Karakuzu (2012) yaptığı bir başka çalışmaya göre deniz suyunun polimer matrisli kompozitlerin darbe davranışını ve hasar basınçlarını önemli şekilde etkilediğini göstermişlerdir.

Yılmaz ve ark. (2010), hidrotermal yaşlandırma etkisi altındaki çok yüksek molekül ağırlıklı polietilen malzemenin (ÇYMAPE) kırılma davranışını araştırmışlardır. 80°C sıcaklıktaki su ortamında bekletilen numunelere esas kırılma işi metodu uygulanmış ve metodun test sonuçlarına göre başarılı uygulandığı ortaya konmuştur.

Powell ve ark (2012), Karbon fiber/vinil ester (CFVE) kompozit malzemelerin mekanik, termal ve hidrotermal özelliklerinin, nanoparçacık takviyesi ile güçlendirilmesi araştırılmışlardır. Mekanik ve termal testler, nanopartiküllerin fiber

veya matriste tek katmanın, karbon/vinilester kompozit özelliklerini % 11-35 oranında arttırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, hem fiber hem de matris nanopartiküller ile takviye edildiğinde, fiber ve matrisin özelliklerinde düşüş olduğunu ortaya koymuşlardır.

Kootsookos ve ark. (2004), deniz suyu daldırma işleminin cam ve karbon fiber takviyeli polimer kompozit malzemelerin dayanıklılığı üzerindeki etkisini deneysel olarak incelenmişlerdir. İki yıldan uzun bir süre boyunca 30 ° C sıcaklıkta deniz suyuna daldırıldığında, malzeme önemli nem emilimine maruz bırakılmış ve reçine matrisi ile fiber / matris interfaz bölgesinin kimyasal bozunmasına neden olmuşlardır. Bu, Mod I interlaminar kırılma tokluğunun, sadece daldırma yoluyla etkilenmesine rağmen, esneme modülü ve malzemenin dayanımının bozulduğunu gözlemlemişlerdir.

Rivera ve ark. (2002), ince öğütülmüş karbon / vinilester örneklerinin yapısal bileşenlerin iyileştirme aşamasında ıslak tabakalama prosedürleri, işlenerek donma-çözülme işlemlerini araştırmışlardır. Donma-çözülmenin, mekanik özelliklerde ve cam-geçiş sıcaklığında, lif - matris bağı bozulması ve matris çatlaması üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olan tuzlu suya daldırılmasından daha fazla azalmaya neden olabildiğini göstermişlerdir.

Wood ve ark. (1996), hasar davranışını anlamak ve deniz suyunun kompozitler üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla, iki farklı süre boyunca deniz suyuna maruz kalan ara katman hibrit kompozitin ara yüzey kuvvetini belirlemek için bir program geliştirilmişlerdir.

Kompozit malzemeler deniz suyu, rüzgâr, güneş gibi ortam şartlarında diğer malzemeler ile kıyaslandığında genellikle daha iyidir. Deniz suyu kompozitlerde iki etkiye sahip olmaktadır. Bunlar mekanik özelliklerin zayıflaması ve yapısına absorbe ettiği sudan dolayı ağırlık kazanmasıdır (Shenoi ve ark. 1993). Bu etkiler kompozit ara yüzeyine biriken tuzlu suyun hasarlar oluşturmasıdır. Genellikle kompozitler ıslanabilirlik özelliklerinden sebeple çevresel şartlarda nem ve su absorbe ederler (Chow ve ark. 2007). Bu emilen su malzemenin şişmesi, kalıcı şekil değiştirmesi gibi sayısız istenmeyen etkilere sebep olurlar. Böyle durumlarda malzemenin mekanik davranışı önemli şekilde etkilenir (Nogueira ve ark. 2001, Cabanelas ve ark. 2003, Zhou ve ark. 1999, Barkoula ve ark. 2009, Xiao ve ark. 1997, Xiao ve ark. 1998).

Uyaner ve ark. (2010), Cam elyaf takviyeli kompozit boruların dayanımı incelemek için düşük hızlı ağırlık düşürme testleri yapmışlardır. Çalışmalarında, farklı çarpma hızlarında darbe testleri uygulamışlardır. Darbe testine ilaveten hasarlı borulara

statik patlatma testi yapmışlardır. Patlatma testinin ASTM D 1599-99 standardını esas alarak yapmışlardır. Testler sonucundaki verilere istinaden, darbe kuvveti, darbe süresi, çökme, emilen enerji ve hasar miktarı, çarpma hızı ile doğru orantı olduğunu tespit etmişlerdir.

Arıkan (2010), cam elyaf takviyeli borulara, değişik açılarda çatlaklar oluşturularak yüzey çatlağının etkisini araştırmıştır. Çalışmada yüzey çatlağının açısının değişmesi, patlama basıncı değerini de farklı olmasına sebep olmuştur. Ayrıca çatlak açısının değişmesi patlama basıncıyla orantılı olarak delaminasyon alanını da etkilemiştir.

Avcı ve ark. (2003), CTP kompozit borunun kırılma davranışını incelemiştir. Çalışmada hem elyaf takviyesi yapılmış hem de yapılmamış yüzey çatlağı açılmış numunelerin eğme dayanımlarının ve modüllerinin polyesterin hacimsel içeriğinin artırılması ile arttığını belirtmişlerdir. Yine Avcı ve ark. (2007), korozyon bir ortamda yüzey çatlaklı filaman sarım boruların yorulma davranışını incelemiş, gerilme şiddet faktörü ile çatlak büyüme oranları değişiminin lineer bir ilişki gösterdiğini vurgulamışlardır. Avcı ve arkadaşları başka bir çalışmada (2007), çatlaklı cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin kırılma ve hasar davranışını incelemişlerdir. Buna göre gerilme şiddet faktörünün kopma öncesine kadar kararlı ilerlediğini, daha sonra kararsız bölgeye geçerek numunenin aniden koptuğunu bildirmiştir.

Tarfaoui ve ark (2007), cam takviyeli epoksi silindir kompozit malzemelerin boyut parametresinin numunede oluşan hasara etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, farklı boyutlarda E-camı epoksi numunelerde oluşan hasar, temas kuvveti, çökme ve temas süresinin numune boyutlarıyla bağlantılı olduğunu rapor etmişlerdir.

Gning ve ark (2005), 10 tabakalı cam epoksi silindirlerin hidrostatik basınç dayanımına darbe hasarının etkisini araştırmışlardır. Hasarsız ve değişik darbe enerjilerinde hasara uğratılmış numuneler dış basınca maruz bırakılarak patlama basıncının değişimi incelenmiştir. Hasar etkisinin cam/epoksi silindirlerin patlama basıncını ile doğru orantılı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Ellyin ve ark. (2001), yaptıkları deneylerde farklı yükleme durumları için CTP kompozit malzemenin yorulma ömrünü incelemişler, sızıntı ve hasar dayanımları belirlenirken, yine iki eksenli yükleme durumunda yükleme oranının değişim ile statik ve alternatif yükleme durumlarında sızıntı başlangıcı ve yorulma olayı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir.

Tarakçıoğlu ve ark. (2000), filaman sarım cam takviyeli plastik (CTP) boruların mukavemetini farklı derinlik ve boylarda yüzey çatlak etkisi altında incelemişlerdir. Çatlak derinliğinin boyu ile mukavemetin doğru orantılı olduğunu bildirmişlerdir. Bu durumu farklı sarım açısında incelemişler ve her durum altında etkilendiğini ortaya çıkarmışlardır. Yine başka bir çalışmalarında (2004, 2007), epoksi ve E camından imal edilmiş yüzey çatlakları oluşturulmuş Cam elyaf takviyeli kompozit boruların iç basınç etkisinde yorulma davranışını incelemişlerdir. Çalışmada % 30, % 40 ve % 50 gerilme seviyeleri oluşturulmuş ve yüzey çatlak boyutları değiştirilmiştir. Çalışmaya göre delaminasyonun ilk aşamada hızlı bir şekilde gerçekleştiği daha sonra bu durumun yavaşladığını vurgulamışlardır.

Doyum ve Altay (1998), S-camı ve E-camı ince borularda darbe hasarını ve hasar karakteristiğini incelemişlerdir. Deneylerinde farklı darbe enerji seviyelerine göre yapmışlar ve farklı enerjisi seviyesinde oluşan hasarın tipi ve boyutunu ifade etmişlerdir.. S-camı borularda daha küçük ölçekte yüzey çatlak ve delaminasyon hasarı görülmüştür.

Perreux ve Joseph (1997), yaptıkları çalışmada tabakalı kompozit filaman sarma borular kullanmıştır. Frekansın ömür ve hasar etkisi incelemişlerdir Frekans ile ömrün doğru orantılı olduğunu fakat belli bir noktadan sonra frekans artıkça ömrün değişmediğini göstermişlerdir.

3. TEORİK ESASLAR

3.1. Kompozit Malzeme

Kompozit malzeme, farklı özelliklere sahip iki veya daha çok malzemenin, belirli karakteristik ve özellikler sunan yeni bir malzeme türü oluşturmak üzere makro ölçekte bir araya getirildiği bir malzemedir. Kompoziti oluşturan her bir bileşen fiziksel olarak kimliklerini korur, makroskobik seviyede birleştirilir, birbirleri içerisinde çözünmezler ve birbirleri arasında bir ara yüz oluşturmaları zorunludur.

Kompozit malzemeler ana bileşen olarak matris ve üstün mekanik özelliklere sahip takviye malzemesi ve elyaf/matris ara yüzü bileşenlerinden oluşmaktadır. Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı, takviye malzemesi, matris ve takviye malzemesi/matris ara yüzüne bağlıdır. Takviye malzemeleri lif, parçacık veya pul şeklinde olabilirler ve matris fazına gömülü durumundadırlar. Matris malzemeleri sürekli fazdır ve takviye malzemelerini belirli yönlerde birbirine bağlayarak bir arada tutmak, gerilmeyi liflere transfer etmek ve çevresel etkenlerden korumakla görevlidirler. Matrislerin fiziksel ve mekanik özellikleri takviye edici bileşenlere göre daha düşüktür. Bununla birlikte takviye elemanları ile bir araya getirildiklerinde daha üstün özelliklere sahip olan yeni bir malzeme ortaya çıkmaktadır. Elyaf/matris ara yüz bölgesi, takviyeli kompozitlerin mekanik özelliklerinde çok önemli rol oynamaktadır. Ara yüz mukavemeti, yükü taşıyan takviye elemanlarına transfer edilen gerilimi sınırlamaktadır. Takviye malzemesini etkin bir şekilde kullanmak ve yük taşıyan elyaflara yük transferini mümkün kılmak için takviye ve matris arasında güçlü bir yapışma olmalıdır. Ara yüzün bozulması ile özellikle de enine çekme mukavemeti gibi fiber / matris yapışmasına doğrudan bağlı olan malzemenin mekanik özelliklerinde düşmeler olmaktadır (Totten, 2015).

Birden fazla malzemeleri bir araya getirerek oluşturulan kompozit malzemede, yüksek mukavemet, düşük ağırlık, tasarım çeşitliliği, yüksek sertlik, aşınım direnci, ısı kapasitesi, korozyon direnci, ısıl iletkenlik ve estetik görünüm gibi özellikler sağlanabilmektedir. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin bilinen özelliklerinden faydalanılarak o malzemenin yoğunluk, elastisite modülleri ve çekme dayanımları vb. özellikleri hesaplanabilir. Savunma ve havacılık sistemleri, ileri teknoloji alanları ve kritik malzeme özellikleri olan birçok sistemler istenen özelliklerin verilmesi ile kompozit malzemelerden oluşmaktadır.

3.1.1 Takviye Edilen Malzemeler

Kompozit yapıyı oluşturan ana bileşenlerden biri matris malzemesidir. Matris, takviye malzemelerinin yerinde tutulması, yük aktarımının kolaylaştırılması, çevresel bir bariyer sağlanması ve ayrıca elyafların mekanik özelliklerin azalması, yani aşınmadan korunması gibi birçok önemli role hizmet etmektedir.

Matris, malzemenin darbe, dayanım, tokluk gibi özelliklerini belirlemede önemlidir. Mukavemet, elastik uzama, kayma mukavemeti, tokluk ve darbe dayanımının yüksek olması, ısı direnci, ara yüzey bağı, kimyasal ve çözücülere karşı direnci ve raf ömrünün iyi olması, nem emilimi, çekme oranı, öz kütle ve maliyeti düşük olması gibi üstünlükler matris malzemesinden istenilen özelliklerdir. Elyaf matris göre daha mukavemetli ve rijittir. Bu özellik malzeme tasarımında dikkat edilmesi gereken bir husustur. Kompozit malzemeler için uygulamada birçok matris malzemesi kullanılmaktadır. Malzemenin cinsine göre üç ana sınıfa ayrılmaktadır; bunlar metal matrisler, plastik matrisler ve seramik matrislerdir. Bu çalışmada termoset ve termoplastik olarak iki türü bulunan plastik matrisler üzerinde durulmuştur.

3.1.1.1. Termoset matrisler

Bu tür polimer malzemelerin bağ yapıları genelde çapraz ve üç boyutlu şebeke yapısı göstermektedir. Ergitilip soğutulduğunda katılaşma anında çapraz bağlar ilerler ve dolayısıyla katılaşma tamamlandığında tekrar ergitilemezler.

Termosetlerde polimerizasyon sırasında molekülün reaktif olan kısmı moleküller arasındaki zincir yapıyı teşkil eder. Isıtıldıkları zaman akıcı özellikler göstermeleri için kısmen polimerleşmiş durumda kalıplanırlar. Kalıplama sırasında polimerleşme ilerleyerek plastik geniş ölçüde çapraz bağlanmaya geçer ve akıcılık özelliğini kaybeder. Kısmen polimerleşmiş durumdaki termoset polimerlere reçine (rezin) adı verilir. Reçinenin son duruma getirme işlemine ise pişirme veya sertleştirme (curing) denilir.

Termoset, kompozit malzeme üretiminde yaygın olarak tercih edilen malzemelerdir. Düşük maliyet ve üstün özellikteki tasarımlar termoset malzemeler kullanılarak kolaylıkla üretilebilirler. Deniz, otomotiv, inşaat endüstrisinde, depo, tank,

boru ve mobilya gibi geniş üretimin sektöründe düşük maliyet ve üstün özelliklerinden dolayı aranan malzeme konumuna gelmişlerdir.

Plastikler içinde elyaf takviyeli kompozit malzemelerde en çok bilinen plastikler termosetlerdir ve dolayısıyla genellikle matris malzemesi olarak silikon, epoksi reçine, fenolik reçine ve polyester tercih edilmektedirler.

Epoksi hafiflik ve yüksek dayanım aranan alanlarda tercih edilirken, Polyester ucuz, yüksek mukavemet, uzun ömür, yüksek ara yüzey bağı ve sertleşme sırasında düşük çekme oranı şeklinde sayılabilir.

Epoksi reçineler metaller, cam, porselen, taş, beton, lastik, doğal organik maddeler ve plastikler gibi birçok malzeme ile kolayca yapışabilirler. Bundan dolayı kompozit malzeme üretiminde bu reçinelerin yeri büyüktür. Takviye edilmiş epoksi reçineler polyesterlerin uygulama alanlarında kullanılmakla birlikte bu malzemeler mükemmel mekanik ve termal özellikler, düşük sertleştirme büzülmesi, yüksek dielektrik sabitine ve ark direncine sahiptir. Dolayısıyla daha çok elektrik endüstrisinde kullanılırlar. Bununla birlikte, epoksiler tipik olarak yüksek sıcaklıklarda kütleme gerektirir. Dahası, epoksiler nemi havaya ya da malzemeyi bozan suya maruz kaldıklarında nemi emmeye eğilimlidirler. Epoksilerin tipik özellikleri Çizelge 3.1.' de listelenmiştir.

Çizelge 3.1. Yaygın olarak kullanılan termoset matrislerin özellikleri, (Mallick, 2008)

Özellikler	Vinil Ester	Epoksi	Fenolik
Özgül Ağırlık, ρ (g/cm^3)	1.2	1.2-1.3	1.3
Elastisite Modülü, E (GPa)	3.3	4.5	3.0
Çekme Dayanımı, σ (MPa)	75	130	70
Kopma Uzaması (%)	4	2-6	2.5
Maksimum Çalışma Sıcaklığı, T_c ($^{\circ}C$)	100	90-200	120-200

3.1.2. Takviye Eden Malzemeler

Elyaf lar kompozit malzemelerde en çok tercih edilen takviye malzemelerdir. Elyaf lar uzunluk/çap oranı büyük olan malzemeler olmalarının yanı sıra dizilme yönleri ile de önemlidirler. Elyaf ların en önemli görevi yükü taşımaktır. Kompozit malzemenin

mukavemetini ve rijitliğini büyük ölçüde elyaflar sağlamaktadırlar. Kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılan elyaflar şekil ve durumuna göre isimlendirilirler. Eğer elyaf sürekli ise filaman, metalik filamanlara ise tel, elyaf kesit alanı dikdörtgense ve dikdörtgen kenarları oranı dörtten fazla olursa şerit adı verilmektedir.

Takviyeli kompozit malzemenin tasarımında elyafın kimyasal bileşimi, elyaf çapının seçimi ve takviye malzemesinin geometrisi dikkate alınması gereken ölçütlerdir. Bu yüzden cam takviye, büzülmüş veya düz sürekli elyaf, keçe, kumaş ve kırılmış elyaf gibi farklı tiplerde üretilir ve kullanılır. Kısa elyaflar, yüksek aşınma dayanımı, düşük maliyet, izotropik bir yapı gibi özellikler sergilemektedirler.

Elyaf çeşitleri olarak cam elyaflar, bor (boron) elyaflar, karbon elyaflar, aramid elyaflar, silisyum karbür elyaflar, grafit elyaflar, bazalt elyaflar söylenebilir. Bunların yanı sıra alümina elyaflar, silikon karpit de kullanılmaktadır. Ayrıca metal kökenli elyaflar da tercih edilmektedir.

3.1.2.1. Cam elyaflar

Cam elyaflar, ticari olarak yaygın olarak tercih edilen ve maliyeti en düşük olan sentetik organik malzemelerdir. Cam elyaflar yüksek dayanım/ağırlık oranına ve dış etkilere karşı mukavemetli olan kompozit malzemelerin üretiminde kullanılır. Cam elyaf ile takviye edilmiş kompozit malzemelerin rijitlik/yoğunluk oranları, metallere göre daha düşüktür. Ayrıca bulunabilirliği de diğer elyaflar çeşitlerine göre çok daha kolaydır. Çekme mukavemetleri mükemmel olmasına rağmen uzun süreli yükler altında bozulabilirler. Cam elyafların kalıplama özellikleri de çok iyidir. Yüksek kimyasal dayanımı olan cam elyafın E, C ve S camı gibi farklı kimyasal bileşimi olan çeşitleri mevcuttur. E camı iyi derecede mukavemet değeri ve elastisite modülü göstermesinin yanı sıra elektrik uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir. C camı, korozyona dirençli kompozit malzeme üretiminde tercih edilmektedir. S camı ise yüksek silika miktarına sahiptir. Bu sebeple yüksek sıcaklıklara karşı direnç göstermektedir. Ayrıca yüksek kimyasal dayanımı ve kolay işlenebilme özelliğine sahiptir. (Genç 2006). Çizelge 3.2’de Farklı türdeki cam elyaflarının özellikleri gösterilmektedir.

Çizelge 3.2. Farklı türdeki cam elyaf türlerinin özellikleri (Advanced Glassfiber Yarns LLC, 2003)

Özellikler	E camı	S camı	C camı
Yoğunluk, ρ (g/cm^3)	2.60	2.50	2.60
Elastisite Modülü, E (GPa)	72.00	87.00	73.00
Çekme Dayanımı σ (MPa)	3.50	4.50	2.40
Çekme Uzaması (%)	4.00	2.90	4.00
Özgül Modül, E/ρ (MN/m)	27.80	34.80	28.00
Özgül Dayanımı, σ/ρ (MN/m/kg)	1.40	1.80	0.93

Lifleri bir arada tutmak için polyester reçineler yaygın olarak kullanılırlar. Fakat epoksi reçineler maliyet artışına rağmen en yüksek dayanımın istendiği durumlarda elyaflar ile CTP oluşturmada tercih edilir. Cam elyaf olarak adlandırılan bu maddenin bileşiminde yüksek silikon dioksit, kalsiyum oksit, alüminyum oksit, bor oksit, çok az miktarda da sodyum oksit, potasyum oksit ve magnezyum oksit bulunur.

Malzeme reçine içerisine elyafın uygun bir şekilde birleşmesiyle meydana gelmektedir. Takviye ve matris malzeme arasında oluşan ara yüz bağların zayıflığı malzeme hatalarını tetikleyebilir. Ara yüz bağının kuvvetli olması malzeme için çok önemlidir. Zayıf bağdan kaynaklı elyaf ve matris birbirinden ayrılarak, malzemenin performansını düşürür. Bunun önüne geçebilmek için elyaf üzerine kimyasal kaplanabilir.

Olta çubukları, gemi tankları, kruvazörler ve yatlar gibi deniz araçları, tekne gövdeleri, yüzme havuzu kısımları, koruma kaskları, döküm kalıpları, makine parçaları koruma kapakları, planör ve model uçaklar, kapılar, spor donanımları, otomobil parçaları, elektriksel uygulamalar, korozyon dirençli ürünler, inşaat malzemeleri ve ısı yalıtımı gerektiren ürünler cam elyaftan yapılma ürünlerin geniş yelpazesi içerisinde yer almaktadır. Bunun yanı sıra cam elyaflar hafif ama dayanıklı olduğu için devre kartları gibi hassas uygulamalar için de ideal malzemelerdir. (Johnson 2012)

3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Emsallerine göre daha eski ve çok yaygın kullanılan kompozit malzeme tipidir. İki veya daha fazla sayıda değişik levha malzemenin tabakalar halinde dizilerek, tek ve bütün bir eleman gibi birbiriyle birleştirilmesiyle oluşturulan kompozit malzemelere tabakalı kompozit malzeme denir. Tabaka niteliği taşıyan her türlü malzeme tabakalı kompozit üretiminde kullanılabilir. Buradaki asıl nokta birbirlerinin özelliklerini olumlu şekilde destekleyecek bir birleşimin ortaya konulmasıdır. Tabakalama işlemi, tabakaları meydana getiren malzemelerin daha tercih edilen üstün özelliklere sahip bir malzeme oluşturması için yapılmaktadır. Bu işlemde iki farklı faz yer almaktadır. Sürekli faz malzemenin özellikleri sağlarken, bağlayıcı ise malzemeyi oluşturan yapıyı bir arada tutmakla görevli fazdır. Ayrıca, tabakalı kompozitin her tabakası ayrı bir kompozit malzeme olarak değerlendirilebilir. Tabakalama işlemi ile kompozit malzemelerin mukavemeti, rijitliği, korozyon direnci, aşınma direnci, ısı yalıtım ve görünüm gibi özellikleri iyileştirilmekte ve ısıya, neme karşı dayanıklı malzemeler üretilmektedir.

Yapısal uygulamalarda kullanılan çoğu kompozitler özel gereksinimleri karşılamak amacıyla çok katlıdır. Mekanik, fiziksel veya kimyasal özelliklerin ön planda olduğu tasarımlarda, malzemenin ihtiyaç duyduğu özellikleri en az iki veya daha fazla tabaka sayısı ile karşılanmaktadır. Malzemeyi oluşturan tabakalar aynı cins malzemelerden oluştuğu gibi farklı cins malzemelerden de oluşmaktadır. Her tabakadaki elemanlar aynıysa *izotropik* olarak adlandırılır. Farklı malzemelerden oluşuyorsa *ortotropik* veya *karma ve melez laminentler* olarak adlandırılır.

Tabakalı kompozitler çok yaygın olarak havacılık uygulamalarında kanat ve kuyruk grubunun kaplama malzemesi olarak tercih edilmektedirler. Yine havacılık uygulamalarında yaygın olarak kullanılmakta olan sandviç yapılar da vardır. Sandviç yapılar düşük yoğunluktaki çekirdek malzemenin yüzeylerine dayanımı daha yüksek plakaların birleştirilmesi ile meydana gelmektedirler.

3.1.3.1 Polimer esaslı tabakalı kompozit malzemeler

Çeşitli polimer esaslı malzeme katmanlarının bir arada kullanılmasıyla çeşitli kompozit malzemeler üretilmektedir. Cam lifi veya asbest lifi dokumalara silikon emdirilmesiyle yüksek sıcaklığa dayanıklı tabakalı kompozitler de elde edilmektedir.

Ayrıca cam ve naylon elyaf dokumalar çeşitli reçinelerle tabakalar halinde birleştirilerek, çarpmaya, herhangi bir nesnenin batmasına veya benzer etkilere dirençli, çok hafif kompozitler üretilmektedir. Bu malzemeler çeşitli zırh kalkan ve benzeri elemanların yapımında da kullanılmaktadır. Plastik esaslı tabakalı kompozit malzemelerin çok değişik türleri mevcuttur ve farklı alanlarda kullanılmaktadır.

3.1.4 Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

Üretim prosesi takviye ve matris malzemesinin özelliklerine, üretilecek malzemenin tasarımına, ürünün boyut ve şekline, teknik detaylarına, kullanım ortamına bağlı olarak seçilmektedir. Kompozit malzemelerin uçak ve savunma sistemleri, otomotiv, inşaat, elektrik ve elektronik sistemleri, petrol ve doğalgaz gibi kimyasal maddelerin taşınma ve depolanması gibi çok farklı kullanımı mevcuttur. Malzemenin türüne göre üretim prosesi de değişmektedir. Yine kullanılacak matris malzemesine göre üretim prosesi seçilmelidir. Yapılan bir tasarımda malzemenin plastik ya da metal olmasına göre farklı yöntemler kullanılır.

İstenilen özellik ve biçimde kompozit malzeme üretebilmek için farklı yöntemlerle işlem yapılabilir. Bu yöntemler şu şekilde sıralanabilir:

- Hazırlanmış kalıp üzerine takviye elemanları elle yatırılarak üzerlerine akışkan halde olan matris malzemesinin yayıldığı elle yatırma yöntemi,
- Düşük ve orta hacimdeki açık kalıplar için kullanılan püskürtme yöntemi,
- Lifli kompozit kumaş malzemesinin bir kalıp içerisine elle yatırılması ve reçinenin elle kalıp içerisine dağıtılmasını esas alan vakum torbalama yöntemi,
- Basıncı bir metal içerisinde ısıtılmak suretiyle işlem yapılan otoklavda torba kalıplama yöntemi,
- Silindirik şekle sahip olan kalıpların imal edilmesinde kullanılan santrifüj kalıplama yöntemi,
- Hazır kalıplama pestili (SMC) ve hazır kalıplama hamuru (BMC),
- Enjeksiyon kalıplama yöntemi,
- Reçine transfer kalıplama (RTM) yöntemi,
- Sürekli sabit kesitli kompozit profil ürünlerin üretildiği profil çekme (pultrüzyon) yöntemi,
- Elyaf takviyesinin katalist sistemi katılmış reçine ile birlikte iki plastik film arasında sıkıştırılarak çekilirken fırınlanması prensibine dayanan devamlı levha üretim yöntemi.

- Filaman sarım yöntemi (Aktaş 2012)

3.1.4.1 Filaman sarım yöntemi

Kompozit üretim yöntemlerinde diğerlerine göre daha kolay üretim yöntemi olan filaman sarım tekniği, bileşik bir ürün oluşturmak için sürekli takviye elemanlarının tek olarak veya belli genişlikte bir bant oluşturması ile döner bir mandrel (kalıp) üzerine değişik geometrik ölçülerde sarılmaları olarak tanımlanabilir. Sarım süreci, tipik olarak içi boş bir çekirdek ile dairesel kompozit ürünler oluşturmak için kullanılmaktadır.

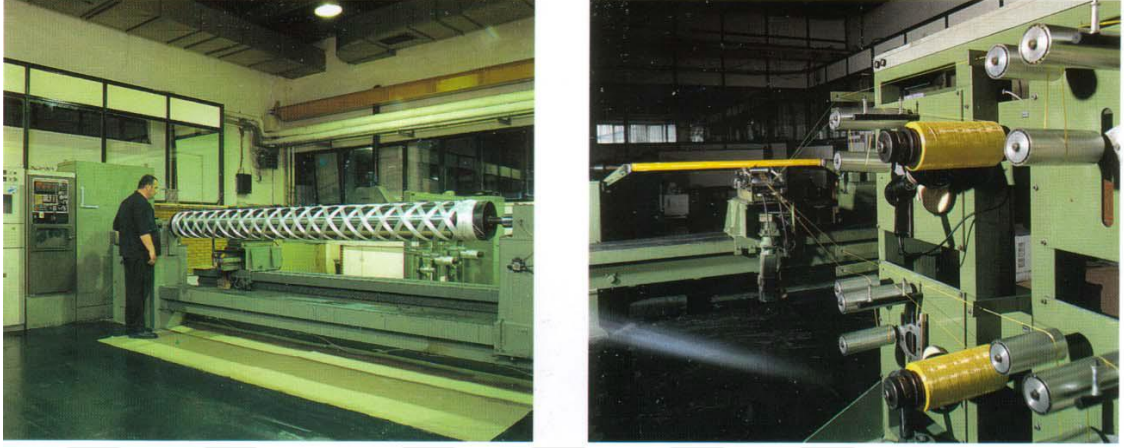
Filaman sarma tezgâhlarında, döner harekete sahip torna tezgâhlarında olduğu gibi döner bir mandrelin dönüş hızı ile takviye malzemesinin ilerlemesinin taşıyıcı bir araba ile senkronize edilmesi suretiyle istenildiği açılarda sarım gerçekleştirilebilir. Sarım işlemi birbirine yapışık belirli bir genişliğe sahip elyaf bantlarının reçine içine daldırılıp çıkarılmasıyla ıslatılarak ya da daha önceden ıslatılmış fakat sertleştirilmemiş elyafla mandrel üzerine sürekli olarak sarılması ile yapılmaktadır. Sarım istenilen bir kalınlığa ulaşılan kadar veya mandrel üzerinde istenilen bir tabaka sayısı elde edilene kadar devam ettirilebilir.

Sarım açısı 25° gibi düşük açılardan başlayarak 90° 'ye yaklaşan açılara kadar arttırılabilir. Daha düşük açılı sarım işlemleri teorik olarak mümkün olmasına rağmen pratikte uygulanabilirliği sarım tezgâhlarının boyutları göz önünde bulundurulduğunda pek mümkün olmamaktadır. Filaman sarım makineleri temel, manuel tezgâhlardan bilgisayar kontrollü çok eksenli makinelere kadar birçok çeşidi mevcuttur. Şekil 3.1' de CNC helisel filaman sargı makinesi görülmektedir.

Genellikle sarım işleminde elyaflar arasında bağlayıcı malzeme olarak termoset reçineler tercih edilirken takviye malzemesi olarak farklı elyaflar tek tek veya birlikte kullanılmaktadır. Islak sarımda, reçine işlem esnasında uygulanırken kuru sarımda ise, önceden reçine emdirilmiş, prepeg elyaf/reçine sistemleri kullanılır. Sarım işlemi tamamlandıktan sonra parçalar yüksek sıcaklıklarda fırınlanır.

Ürün tipine, tasarım parametrelerine, malzeme bileşenlerine ve kullanılan ekipmanlara bağlı olarak üretim sürecinin farklı çeşitleri bulunmaktadır. Filaman sarım tekniği ile üretilen ürünler genellikle daireseldir, istisnai durumlarda birkaç değişiklik ile asimetrik şekillerin üretimi de mümkün olmaktadır. Filaman sarım ürünleri, genellikle çeşitli boyutlarda silindir, boru ve tüp şeklindedirler. Küresel ya da konik şekiller özel uygulamalar ile üretilmektedir. Filaman sarım tekniğin yaygın uygulama

alanlarından biride basınçlı tanklar ve depolama tanklarıdır. Malzeme, kullanılacakları ortam şartlarına ve maruz kalacakları yüklere göre özel olarak tasarlanmaktadır. Ayrıca zorunlu durumlarda farklı malzeme birleşimleri ile üretim yapılmaktadır.



Şekil 3.1 CNC flaman sargı makinesi (Şahin 2004)

Sarım yönteminde her tip sürekli elyaf kullanma olanağı olmasına karşın temel olarak bu teknik bir cam elyaf takviyeli kompozit üretim metodudur. Yaygın olarak kullanılan reçine malzemeleri ise epoksi, polyester ve vinilester olarak verilebilir. Filaman sarım tekniği ile üretim sürecinde üretim parametrelerinin sonuç malzemenin özelliklerine etkisi büyüktür. Elyaf gerginliği, elyaf konumunun homojenliği ve reçinenin sertleşmesi temel parametreler olarak sayılmaktadır. Elyaf gerginliğinin fazla olması, elyaf üzerindeki gerilmenin büyüklüğüne bağlı olarak hasarının temel sebebidir. Reçine miktarı ise korozif ortamın elyaf ile teması bakımından önem kazanırken reçinenin orantılı olarak sertleşmesi ise matris malzemenin tüm bölgelerinin daha tok davranmasına ve çatlak hızının yavaşlatılması hatta durdurulmasına sebep olmaktadır.

Filaman sarma işlemi kullanılarak oluşturulan ürünlerin kullanım alanları şöyle sıralanabilir:

- Golf kulüpleri malzemeleri
- Bisiklet parça ve tüpler
- İletim direkleri
- Tekne direkleri
- Uçak gövdesi
- Gaz ve su tankları
- Çimento Mikserler

- Ağır inşaat ürünleri ve yapı elemanları
- Borular
- Roket namluları
- Depolama tankları
- Spor malzemeleri
- Hidrolik ve pnömatik silindirler

Filaman sarımın içi boş kompozit ürünler yaratma sürecinde birçok avantajı vardır.

Ağırlık, Tüm istenilen ürünlerin içi boş ve kalıcı bir iç sistem olmadan yapılabilmesidir. Çünkü sebebi son derece hafif olmasıdır.

Tasarım, Farklı sargı teknikleri kullanarak tasarım ve mühendislik sürecinde değişiklikler, kür ve malzeme seçenekleri esneklik, kuvvet ve basınç tutma kapasitesi gibi varyasyonlar için izin verir.

Otomasyon, Filaman sarma hızlı ve doğru aynı bileşenleri üretmek için makineler kullanarak yüksek hızlı bir süreç içinde yapılabilir. Bu süreç karmaşık makine ve karmaşık mühendislikte dairesel olmayan kompozit malzeme oluşturmak için bir yazılım içerebilir. Süreci yüksek derecede otomatize edilebilir olduğundan, ölçeklenebilir ve son derece karmaşık bileşenlerin hassas seri üretimi için izin verir.

Etkin Maliyet, Düşük maliyetli malzeme ve otomasyon bileşenleri üretmek için maliyeti önemli ölçüde azaltır. Süreci daha az malzeme, daha az emek ve komponent üretim yöntemleri için daha az nakliye maliyeti içerir.

3.2. Hidrotermal Yaşlanma

Filaman sargılı cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, yüksek mukavemet ve rijitlik, yorulma ve korozyon dirençleri nedeniyle basınç gemileri, boru hatları, roket motoru gövdesi, rüzgâr türbini kuleleri vb. gibi birçok uygulama alanında giderek daha fazla yer almaktadır. Pratikte kullanılan çoğu kompozit yapının nadiren düz plaka halinde olmasına rağmen, yapılan araştırmaların çoğu plaka ve kiriş üzerine odaklanmıştır; kompozit kabuk yapılar üzerinde nispeten az araştırma yapılmıştır. Ayrıca kompozit boruların darbe sonrası davranışları, çevresel (kimyasal madde vb.) etkileri ve basınç dayanımı davranışları da az sayıda incelenmiştir.

Uygulamalarda kompozit borular, malzeme özelliklerinin kötü etkilenmesine neden olan ortam koşullarına maruz kalmaktadır. Tipik olarak nem ve suya uzun süreli

etkileşimleri sonucunda malzemenin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri değişime uğrar. Bu olaya genel olarak yaşlanma (ageing-aging) denilir. Birçok yaşlanma türü olmakla birlikte bunlardan en önemlisi hidrotermal yaşlanmadır ve malzeme özelliklerinin hidrotermal yaşlandırma etkisiyle değişimi, bilinmesi gereken bir mühendislik olayıdır. Aynı şekilde bu kompozit borular, matris çatlağı, delaminasyon, lif kırılması, elyaf-matris giderme ve elyaf çekme gibi çeşitli hasarlara neden olan çapraz darbe yüklemesine maruz bırakılabilir. Bu hasarlar kompozit borunun yapısal özelliklerinde önemli ölçüde azalmaya neden olabilir.

Mekanik özellikler kompozit malzemenin içinde bulunduğu ortama bağlıdır. Cam elyaf takviyeli kompozitler genellikle petrol ve doğal gaz taşımacılığı, denizcilik uygulamaları gibi korozyon ortamlarında kullanılmaktadır. Su ve ısı etkisi, epoksi matrisin şişmesine, plastikleşmesine ve mekanik özellikleri azaltabilen elyaf/matris ara yüzeyinde ayrışmaya neden olabilir. Su emilimi, ortam şartlarında uygulanan polimerik kompozitlerin bozulmasında önemli bir parametredir.

Kompozit malzemenin su emilimi, genellikle üç ana mekanizmayı takip eden malzeme hasar olasılığını artırır:

- Su moleküllerinin matristen ve bazı durumlarda lifler boyunca doğrudan yayılması.
- Su moleküllerinin fiber/matris ara-yüzü boyunca kılcal akması, ardından ara-yüzden reçineye difüzyon. Bu, ara yüzdeki su saldırısı neden olduğu lifler ve matris arasındaki bağ açma mekanizmalarının bir sonucudur.
- Mikro çatlaklardan, gözeneklerden, malzemedeki kusurlardan difüzyon (Zhou & Lucas, 1995).

Toplam nem emme işlemine verilen malzeme cevabında, çatlaklar (yüzey boşlukları dâhil) ve yüzey kütle kaybı (yüzey soyulması ve çözünme dâhil), belirgin kilo değişim davranışı üzerinde büyük etkiye sahiptir. Yüzey soyulma ve reçine çözünmesi, numunenin ağırlık kaybına (toplam ağırlığın bir azalmasına) katkıda bulunurken, lifler arasındaki yüzey çatlağı ve boşluklar, bu nedenle, suyun arttığını ve böylece ağırlık artışının teşvik edilmesini sağlar.

3.3. Çekme Deneyi

3.3.1. Deneyin amacı

Mühendislik malzemeleri rijit olmadığından kuvvet altında deforme olup, şekil ve boyut değişiklikleri gösterirler. Malzeme özelliklerini anlamak üzere mekanik testler yapılır. Bunlardan en önemlisi çekme deneyidir.

Çekme deneyinin amacı; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemektir. Bunun için boyutları standartlara uygun daire veya dikdörtgen kesitli deney parçası; çekme cihazına bağlanarak, eksenel ve değişken kuvvetler uygulanır. Çekme cihazı esas olarak; birbirine göre aşağı ve yukarı hareket edebilen, deney parçasının bağlandığı iki çene ve bunlara hareket veya kuvvet veren, bu iki büyüklüğü ölçen ünitelerden oluşur. Çenelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney parçasına değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvete karşılık gelen uzama kaydedilir.

3.3.2. Tanımlar

Gerilme (σ): Birim alana etkiyen yük anlamına gelir ve aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (3.1)$$

Birim Şekil Değiştirme (ε): Malzemeye kuvvet uygulandığı zaman oluşan boy değişiminin kuvvet uygulanmadan önceki ilk boy oranı.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.2)$$

Elastisite Modülü (E): Malzemenin dayanımının (mukavemetinin) ölçüsüdür. Birim uzama ile normal gerilme (çekme ya da basma gerilmesi) arasındaki doğrusal ilişkinin bir sonucu olup birim uzama başına gerilme olarak tanımlanır. Birim uzama ile normal gerilme (çekme ya da basma gerilmesi) arasındaki doğrusal ilişki şöyle tanımlanabilir:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.3)$$

Malzemeye kuvvet uygulandığında, malzemede meydana gelen uzamalar elastik sınırlar içinde gerilmelerle orantılıdır. Buna Hooke Kanunu adı verilmektedir. Elastisite modülü malzemeye ait karakteristik bir özelliktir.

Akma dayanımı (σ_a): Uygulanan çekme kuvvetinin yaklaşık olarak sabit kalmasına karşın, plastik şekil değiştirmenin önemli ölçüde arttığı ve çekme diyagramının düzgünsüzlük gösterdiği kısma karşı gelen gerilme değeridir.

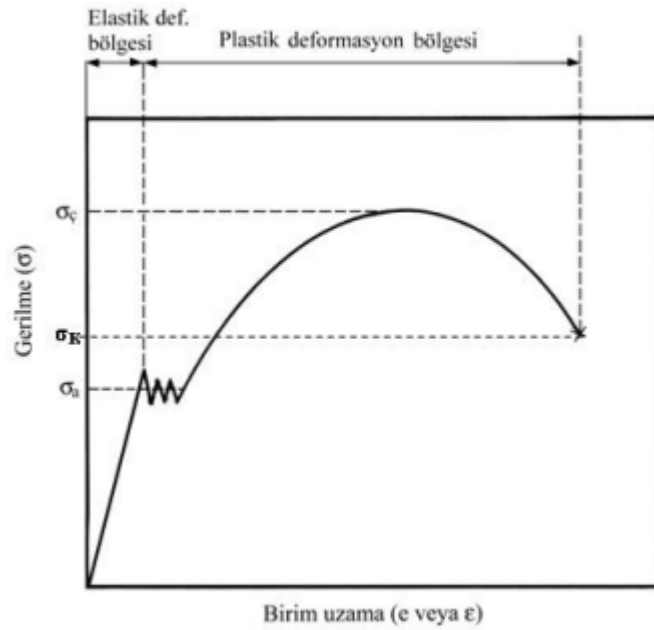
$$\sigma_a = \frac{P_a}{A_0} \quad (3.4)$$

Çekme dayanımı (σ_c): Bir malzemenin kopuncaya veya kırılıncaya kadar dayanabileceği en yüksek çekme gerilmesi olarak tanımlanır. Bu gerilme, çekme diyagramındaki en yüksek gerilme değeri olup, aşağıdaki formül ile bulunur.

$$\sigma_c = \frac{P_{max}}{A_0} \quad (3.5)$$

Kopma Gerilmesi (σ_K): Numunenin koptuğu andaki gerilme değeridir.

$$\sigma_K = \frac{P_K}{A_0} \quad (3.6)$$



Şekil 3.2 Düşük karbonlu yumuşak bir çeliğin çekme diyagramı (web.harran.edu.tr)

Yüzde Kopma uzaması (KU): Çekme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek yüzde plastik uzama oranı olarak tanımlanır. Çekme deneyine tabi tutulan numunenin

kopan kısımlarının bir araya getirilmesi ile son boy ölçülür ve boyda meydana gelen uzama

$$\Delta L = L_k - L_0 \quad (3.7)$$

bağıntısı ile bulunur. Burada L_0 numunenin ilk ölçü uzunluğunu, L_k ise numunenin kırılma anındaki boyunu gösterir. Kopma uzaması ise;

$$KU (\%) = \frac{\Delta L}{A_0} \times 100 \quad (3.8)$$

bağıntısı yardımıyla belirlenir. Bu değer malzemenin sünekliğini gösterir.

Yüzde Kesit Daralması (KD): Çekme numunesinin kesit alanında meydana gelen en büyük yüzde daralma veya büzülme oranı olup;

$$KD (\%) = \frac{A_0 - A_K}{A_0} \times 100 \quad (3.9)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada A_0 deney numunesinin ilk kesit alanını, A_k ise kırılma anındaki kesit alanını veya kırılma yüzeyinin alanını gösterir. A_k nın hesaplanması için hacmin sabit kalacağı ifadesi kullanılır.

$$V_0 = V_K \rightarrow A_0 L_0 = A_K L_K \rightarrow A_K = A_0 \frac{L_0}{L_K} \quad (3.10)$$

Kesit daralması, kopma uzaması gibi sünekliğin bir göstergesidir. Sünek malzemelerde belirgin bir büzülme veya boyun verme meydana gelirken, gevrek malzemeler büzülme göstermezler. Şekil 3.3'te (a) gevrek ve (b) sünek malzemelerin kırılma davranışları şematik olarak gösterilmiştir.



(a)



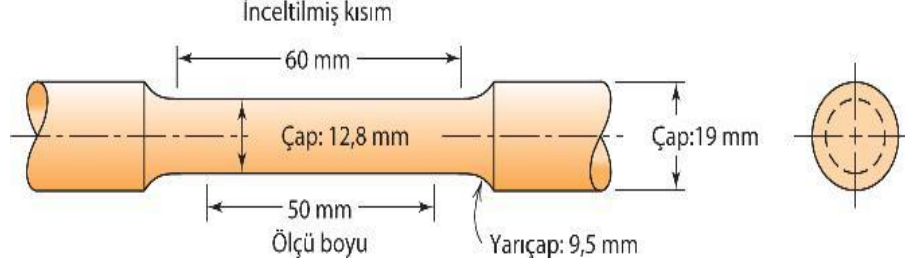
(b)

Şekil 3.3 (a) Gevrek , (b) Sünek malzemenin kırılma davranışı (web.harran.edu.tr)

3.3.3. Deneyin yapılışı

Çekme deneyi için önce test edilecek malzemeden standartlara uygun bir çekme numunesi hazırlanır (Şekil 3.4). Çekme deney makinesinin çeneleri arasına düzgün ve ortalayacak bir şekilde sıkıştırılan bu numune gittikçe artan bir yük ile kopuncaya kadar

çekilir. Bu esnada uygulanan F yükü ile buna karşı malzemenin gösterdiği uzamalar (ΔL) cihaz ile ölçülür. Deney sonucu elde edilen yük (F) ve uzama (ΔL) değerlerinden yararlanarak ($F - \Delta L$) diyagramı elde edilir. Bu diyagrama çekme diyagramı da denir.



Şekil 3.4 Standartlara uygun dairesel kesitli bir çekme numunesi (web.harran.edu.tr)

Her nokta için σ ve ϵ değerleri hesaplanır ve mühendislik açısından büyük önem taşıyan gerilme uzama diyagramı çizilir.

- Kuvvet ile cihaz ve video eksantrometreden alınan uzama verileri kullanılarak her ikisi için ayrı ayrı gerilme – şekil değiştirme diyagramının elde edilmesi.
- Gerilme – şekil değiştirme diyagramlarından elastisite modüllerinin hesaplanması.
- Gerilme – şekil değiştirme diyagramlarından akma gerilmesi, çekme dayanımı ve kopma gerilmelerinin hesaplanması
- Yüzde kopma uzaması ve yüzde kesit daralmalarının hesaplanması.
- Bulunan değerlerin karşılaştırılarak yorumlanması.

3.4 Kompozit Malzemelerde Darbe Hasarı

Malzeme üzerine dış etkenlerden gelen etkilere karşı tahmin edilemeyen durumlar meydana gelebilir. Malzemenin bu aniden ortaya çıkabilen etkilere karşı verebileceği en uygun cevabı verebilmesi istenir. Darbe etkileri malzemenin kullanım amacı ve ortam şartlarına göre farklılık göstermektedir. Çarpmanın ilk aşamasında kompozit malzeme üzerinde ciddi bir hasar meydana gelmeyebilir. Ancak darbe sırasında, kompozitin iç kısmında matris çatlaması, delaminasyon ve/veya elyaf çatlaması şeklinde hasara neden olabilir. Yapıda oluşan bu hasarlar, kompozitin mukavemet ve sertliğinde önemli bir azalmaya yol açabilir.

Kompozitler, fiber ve matris olarak iki alt malzemedен oluşmaktadır. Elyaf ve matris özellikleri, kompozit yapının genel ve temas sertliğini etkileyerek hasarın

başlamasını ve yayılmasını önemli ölçüde etkiler. Elyafın kalınlığı, boyutu ve istifleme sırası, elastik özellikleri, şekli, çarpma tertibatının başlangıç hızı ve ayrıca sıcaklık ve nem gibi çevresel koşullar kompozit malzemelerin hasar karakteristiğini etkileyen faktörlerdir. (Abrate 1998).

Elyaf takviyeli kompozit malzemelerde, kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise enine doğrultudaki elastik özellik düşük olacaktır. Bundan dolayı da en büyük darbe hasarı bu yönde meydana gelir. Enine darbeye maruz kalan kompozit malzemeler, düzlem hasarında önemli ölçüde zarar görebilir ve bu da genel yük taşıma kapasitesinin azalmasına neden olur. Malzemenin bu çarpma yüklerine verdiği tepki karmaşıktır, çünkü yapısal konfigürasyonun yanı sıra içsel malzeme özelliklerine de bağlıdır. Ayrıca, çarpma tertibatının malzemesine, geometrisine ve hızına da bağlıdır. Her bir parametre, eksenel etkinin malzemenin genel etkisini karakterize etmede önemli bir rol oynamaktadır.

Darbe boyunca malzeme üzerine gelecek enerji miktarı, gelen enerjinin karşılanabilmesi için oluşan hasar modlarını tanımlayacaktır. Bundan dolayı tabakalı kompozitlerde darbeden kaynaklı hasarı belirlemek için darbe hızının tayini önemli derecede rol oynamaktadır.

3.4.1. Düşük hızlı darbenin belirlenmesi

Kompozit malzemelerin darbe yüklemesi altındaki davranışlarının, özellikle son yıllarda pek çok araştırmacı tarafından çalışıldığı bilinmektedir. Darbe cevabı, temas yasaları, darbe dinamiği, hasar mekanizması, yapısal dinamik, hasar başlaması ve yayılımı, kararlılık, hasar modları, hasar toleransı ve mikro mekanik gibi konuları kapsayan birden fazla makale ve kitaplar literatürde bulunmaktadır. (Cantwell & Morton, 1991).

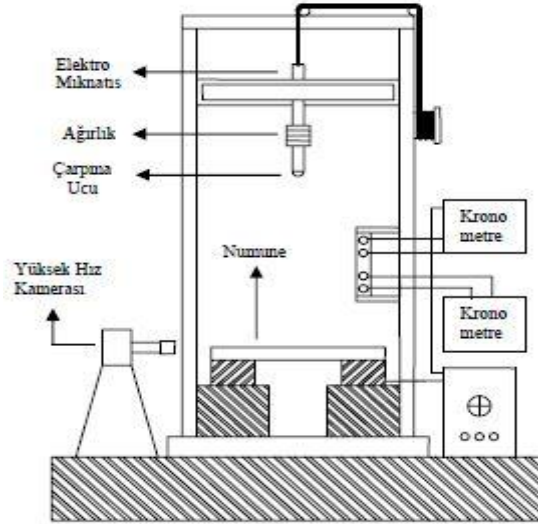
Darbe testi, düşük hızlı, yüksek hızlı ve aşırı hız etkisi gibi üç ana kategoriye kolayca ayrılabilir. Fakat bu kategorilerin sınırlarını belirlemek için net bir sınır yoktur. Sjoblom ve ark. (1988), Shivakumar ve ark. (1985) ve Cantwell ve Morton, (1991) düşük hız etkisini 10 m/sn.' ye kadar tanımlamışlardır. Bununla birlikte, Abrate (1991), bir makalesinde, çarpma hızının 100 m/sn.' den az olması nedeniyle düşük hız etkisini tespit etmiştir. Düşük hızlı etki, delaminasyon ve matris çatlaması ile karakterizedir, yüksek hızlı etki ise penetrasyon kaynaklı elyaf kırılmasıdır.

Uygulamada kompozit malzemenin darbe yüklerine karşı davranışını belirlemek amacıyla birçok test süreci ve bu süreçler boyunca kullanılan cihazlar geliştirilmiştir. Bunlar; ağırlık düşürme testleri, yüksek hızlı darbe testleri (Basınçlı hava ve Split-Hopkinson), sarkaç testleri, ankastre edilmiş kiriş darbe test metodu olarak sınıflandırılabilir.

3.4.2. Ağırlık düşürme testi

Son zamanlarda kompozit malzemelerin düşük hız etkisini karakterize etmek için ağırlık düşürücü darbe test cihazları ile testleri yapılmaktadır. Kompozit malzemeler için ağırlık düşürücü test cihazı geniş bir alanda test parametrelerinin belirlenmesi ve hasar analizinin kolay yapılabilmesi için tercih edilen bir yöntemdir (Kara, 2006).

Ağırlık düşürme testi ile yer değiştirme ve/veya ivmeyi ölçerek yük, yer değiştirme ve ivmenin temas sırasındaki etkisi belirlenir. Test sonucunda elde edilen veriler, temas kuvveti-zaman ve darbe enerjisi-zaman grafiklerine dönüştürülür. Bu grafiklerin incelenmesiyle temas noktasındaki kuvvet ve absorbe edilen enerji gibi özellikler oluşan hasarla karakterize edilebilir. Şekil 3.5’ te ağırlık düşürme test cihazı görülmektedir. Böyle bir cihaz, numune platformu, kuvvet ölçme hücresi, temas sırasındaki hızı ölçen fotoelektrik sistem ve darbeyi görüntülemek için kullanılan yüksek hız kamerası gibi elemanlardan oluşmaktadır. Düşük hızlı darbe, çarpma tertibatının teması boyunca yapı deformasyonu oluşturur ve bu durum çarpma tertibatı ve etkilenen malzeme sınırı arasında oluşan gerilim dalgaları göz ardı edilerek yarı statik olarak kabul edilir. (Ceyhun ve Turan 2003).



Şekil 3.5 Tipik bir ağırlık düşürme test cihazı (Ceyhun ve Turan 2003)

3.4.2.1. Serbest düşme hareketi

Hava sürtünmesinin göz ardı edildiği ve yerçekiminin yükseldikçe sabit kaldığı kabul edilir ise, serbest düşme hareketi sabit ivmedeki bir boyutlu hareketle özdeşdir. Bundan dolayı bir boyutlu hareket için verilen kinematik eşitlikleri kullanılabilir. Serbest düşme eşitlikleri;

$$v = v_0 - gt$$

$$v_{\text{ort}} = (v_0 + v) / 2$$

$$y = 0,5gt^2 + v_0t + y_0$$

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

İlk hız sıfır olduğu için;

$$v = 2gh^{0,5}$$

3.4.2.2. Darbe Enerjisi

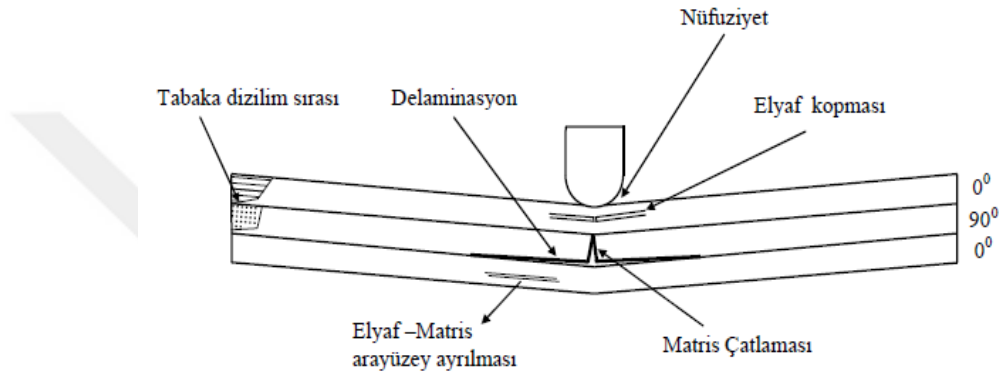
h konumunda vurucu kütesinin potansiyel enerji;

$$\Pi = m \cdot g \cdot h$$

Her bir çarpma hızı için hesaplanan darbe ucu kütesinin darbeden önce sahip olduğu potansiyel enerji değerleri hesaplanabilmektedir.

3.4.3. Darbe sonucu oluşan hasar modları

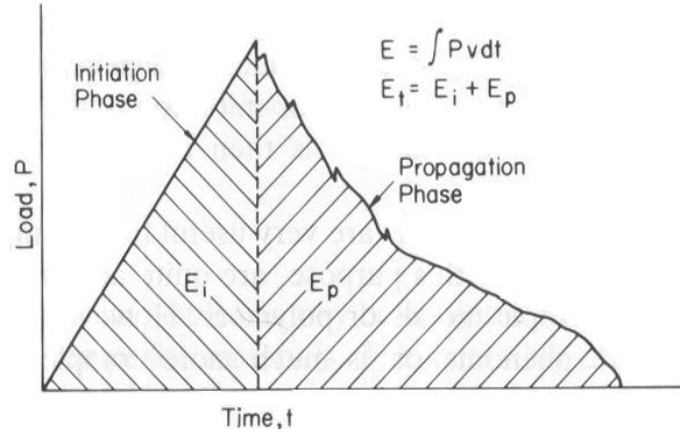
Darbe testleri sonrasında, hasar modları, makroskobik ve mikroskobik hasar modları olarak tanımlanmaktadır. Makroskobik hasar modları girinti, penetrasyon, perforasyon ve bükülme kırığı olarak tanımlanırken mikroskobik hasar modun da ise darbe hasarı esas olarak matris kontrollüdür ve hasar modları matris hatası, matris çatlağı, tabaka ayrılması ve elyaf hasarları olarak sıralanabilir. Bu hasar modları, hasara uğrayan malzemenin özelliklerinde önemli ölçüde azalmalara neden olmaktadır.



Şekil 3.6 Darbe sonucu kompozit malzemede oluşan hasar çeşitleri (Kara 2006)

Hasar matris malzemesinin çatlamasıyla başlar ve delaminasyon (tabakalar arası ayrılma) oluşumu ile devam eder. Malzemenin maruz kaldığı darbe enerjisinin artmaya devam etmesiyle sırasıyla elyaf hasarı, vurucu cismin malzemeye saplanması ve malzemenin delinmesi şeklinde hasar meydana gelmektedir. Şekil 3.6’ de hasar aşamalarına ait şematik bir görüntü verilmektedir.

Darbe testi sonrasında tipik bir yük- zaman eğrisi şekil 3.7 'ta şematik olarak verilmektedir. Yük-zaman eğrisinde ilk ve ikinci bölge sırasıyla çatlak başlangıç fazı ve çatlak ilerleme fazı olmak üzere ayrılabilir.

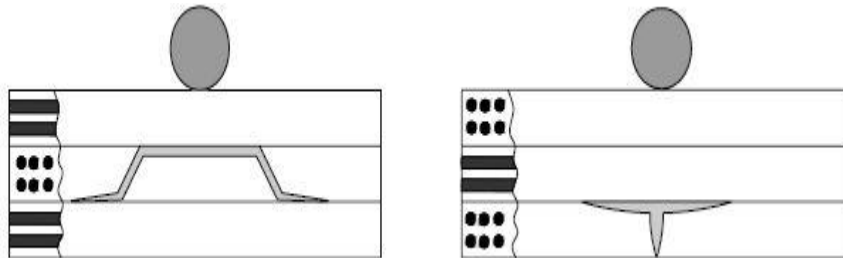


Şekil 3.7 Darbe testi sonrasında tipik bir yük-zaman eğrisi (Shyr & Pan, 2003)

Çatlak, en dış elyafların gerilme hasarı ya da iç tabakaların kesme hasarı ile başlar. Yük, kritik kuvvetine ulaştığında, çatlak başlama fazı, çatlak yayılma fazını temsil eder. Bu fazda kompozit malzeme, gerilme ve kesme dayanımlarının nispi değerleri nedeniyle ya gerilme hatası ya da kesme hatası ile hasara uğrayabilir.

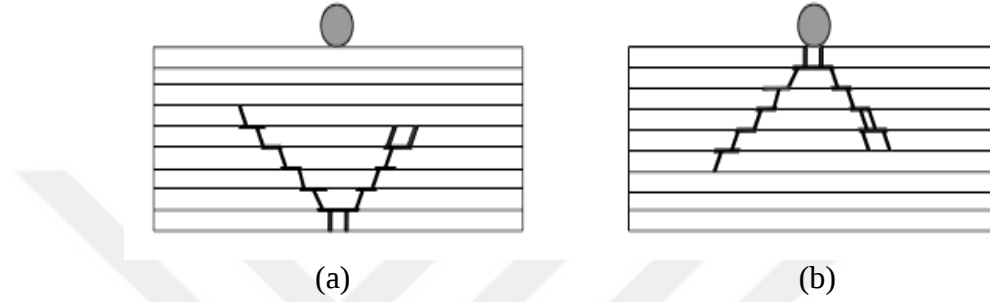
3.4.3.1 Matris Hasarı

Darbe yükünde, epoksi, kompozit malzeme içindeki elyaflardan daha kırılgan bir alt malzeme olarak davranır. Bu nedenle, hasar süreci ilk olarak matris çatlaklarını daha sonra da tabaka ara yüzeylerinde ayrılmayı (delaminasyon) başlatır. Darbe sonrasında, matris çatlağı, çekme çatlağı veya kayma çatlağı olarak iki farklı şekilde gözlemlenebilmektedir (Şekil 3.8). Tabakaların enine gerilme mukavemetini aşan düzlem içi normal gerilmeler nedeniyle çekme çatlakları meydana gelmektedir. Orta yüzeyde belirli açılarda bulunan kayma çatlakları kayma gerilmelerinin oluşumunda önemli bir rol oynadığını göstermektedir.



Şekil 3.8 İki tip matris çatlaması; (a) kayma çatlağı, (b) çekme çatlağı (Abrate, 1998)

Kalın tabakalı kompozit malzemelerde, matris çatlakları ani, kuvvetli ve noktasal temas gerilmelerin dolayı vurucu uçtan etkilenen ilk tabakada meydana gelir. Bu nedenle, hasar bir çam ağacı deseni gibi yukarıdan aşağıya doğru ilerler (Şekil 3.9-a). Bunun yanı sıra, ince tabakalı kompozitlerde, tabakanın arka tarafındaki eğilme gerilmeleri nedeniyle matris çatlakları en alt tabakada başlar (Şekil 3.9-b). Böylece, hasar yine matris çatlakları ve delaminasyon modelini başlatır ve ters çam ağacı desenine yol açar (Abrate 1998).

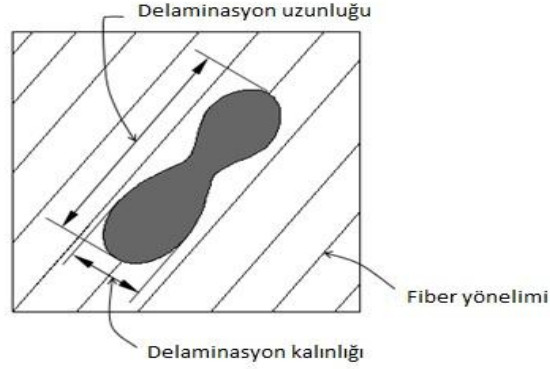


Şekil 3.9 (a) Ters çevrilmiş çam ağacı (b) çam ağacı şeklindeki hasar görüntüleri (Abrate 1998)

3.4.3.2 Delaminasyon

Delaminasyon, kompozit malzemelerde bitişik tabakalar arasındaki bağlanmadır ve tabakanın mukavemetini azaltıcı yönde hasara uğratmaktadır. Delaminasyon, farklı elyaf yönelimleri olan tabakalar arasındaki ara yüzlerde oluşur ve tabaka ara yüzeyi ile bir matris çatlağının kesişme noktasında başlar. Yapılan birçok deneysel araştırmalar sonucunda iki bitişik tabaka aynı elyaf yönelimlerine sahip ise tabakalar arası ara yüzde delaminasyon olmamaktadır (Abrate 1998).

Delaminasyonun oluşması matris çatlamasına bağlıdır. Elyaf yönünde ilerleyen matris çatlağı tabaka ara yüzeyine geldiğinde durdurulmakta ve delaminasyon olarak devam etmektedir. Durdurma işlemi farklı elyaf yönelimleri sayesinde gerçekleşmektedir.



Şekil 3.10 Delaminasyon alanının elyaf yönlendirme açısına göre şekli (Abrate 1998)

Tipik bir delaminasyon özelliği şekil 3.12 'de verilmiştir. Bir yerfıstığı gibi görünen delaminasyonun başlıca sebeplerinden biri kompozit malzemede bitişik tabakaların eğilme davranışlarının farklı olmasıdır. Tabakaların eğilme davranışı da farklı elyaf yönlendirilmelerinden kaynaklanmaktadır. Delaminasyon boyutu tabakaların eğilme davranışlarındaki uyumluluğa bağlıdır. Yani uyumsuzluk ne kadar fazla ise delaminasyon boyutu o derece fazladır. Ayrıca malzeme çeşidi, Tabaka sayısı ve kalınlığı gibi diğer faktörlerde malzemede delaminasyon oluşumuna birer etki olmaktadır.

3.4.3.3 Elyaf Hasarı

Elyaf hasarı, matris hasarı ve tabaka ayrılmasından sonra meydana gelen hasar tipidir. Ancak elyaf hasarı ile ilgili yapılan çalışmalar matris çatlaması ve delaminasyonun elyaf hasarına etkisinin olmadığı yönündedir. Vurucu cismin delmesiyle darbe bölgesinde oluşan elyaf hasarı, yüksek eğilme gerilmelerinden dolayı darbe bölgesinin dışında da olabilmektedir.

3.4.3.4 Nüfuziyet

Malzeme hasarının makroskobik bir modu olan nüfuziyet, vurucu ucun malzemedeki dalma miktarını veya delme miktarını temsil etmektedir. Farklı boyutlardaki malzemelerde aynı elyaf hacim oranlarında vurucunun nüfuziyet alanı yaklaşık olarak aynıdır.

4. DENEYSEL YÖNTEM

4.1. Giriş

Bu bölüm tezin deneysel genel bakışını ele almaktadır. Deneysel çalışma dört alt bölümde sunulacaktır. İlk bölüm kompozit örneklerin üretim yöntemi ve hazırlanması, ikinci bölüm, kompozit numunelerin hidrotermal yaşlandırma işlemi, üçüncü bölüm, kompozit örneklerin halka çekme testi ile dayanımlarının belirlenmesi ve son bölüm olarakta darbe hasarının belirlenmesi şeklinde olmuştur.

4.2. Malzeme Üretimi ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

İzoreel Kom. İzo. Mal. San. Tic. Ltd. Şti.' nde yaş sargı yöntemi ile $\pm 55^\circ$ sarım açılı olarak üretilmiştir. Takviye elemanı olarak filaman sarım süreci için 17 μm ve Vetrotex 1200 tex elyaf çaplı sürekli E camı takviye malzemesi olarak, Ciba Geigy, Bisphenol A, epoksi CY 225 matris malzemesi olarak seçilmiştir. Bu matris ve takviye malzemelerinin mekanik özellikleri çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Elyaf ve matris özellikleri (Samancı 2004)

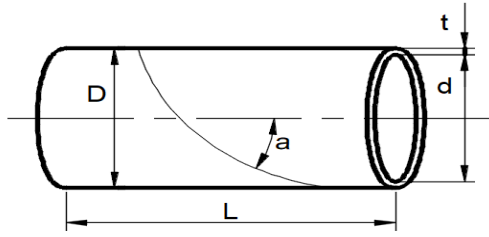
	E (MPa)	σ_c (GPa)	ρ (g/cm ³)	ε (%)
E-camı (Takviye malzemesi)	73000	2400	2.60	4-50
Epoksi reçine (Matris malzemesi)	3400	50-60	1.20	1.50-20

Şekil 4.1' de şematik olarak verilen 300 mm uzunluğunda 72 mm çapında 5' er adet 6 tabaka, 8 tabaka ve 10 tabaka olmak üzere 15 adet cam elyaf takviyeli kompozit boru numuneleri hazırlanmıştır.

Çizelge 4.2. Hidrotermal yaşlandırma süreleri ve farklı tabaka sayısı için numune sayısı

Yaşlandırma Süresi (Hafta)	Farklı tabaka sayısı için numune sayısı (Ad.)			Numune Sayısı (Ad.)
	6 tabaka	8 tabaka	10 tabaka	
0	1	1	1	3
1	1	1	1	3
2	1	1	1	3
3	1	1	1	3
4	1	1	1	3
Genel Toplam				15

Hazırlanan cam/epoksi kompozit numunelere 80 °C saf su ortamında hidrotermal yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Saf su ortamına maruz bırakılmayan ve kuru olarak gösterilen bir dizi örnek referans özelliklerini elde etmek için hazırlanmıştır. Çizelge 4.2' de deney için kullanılacak kompozit borulara ait tabaka sayıları ve yaşlandırma süreleri ile ilgili bilgiler yer almaktadır.



n	6 Tabaka	8 Tabaka	10 Tabaka
L	300	300	300
D	76,75	78,33	79.92
d	72	72	72
t	2,375	3,165	3,960
a	$\pm 55^\circ$	$\pm 55^\circ$	$\pm 55^\circ$

Şekil 4.1. Numune Geometrisi

4.3. Hidrotermal Yaşlandırma

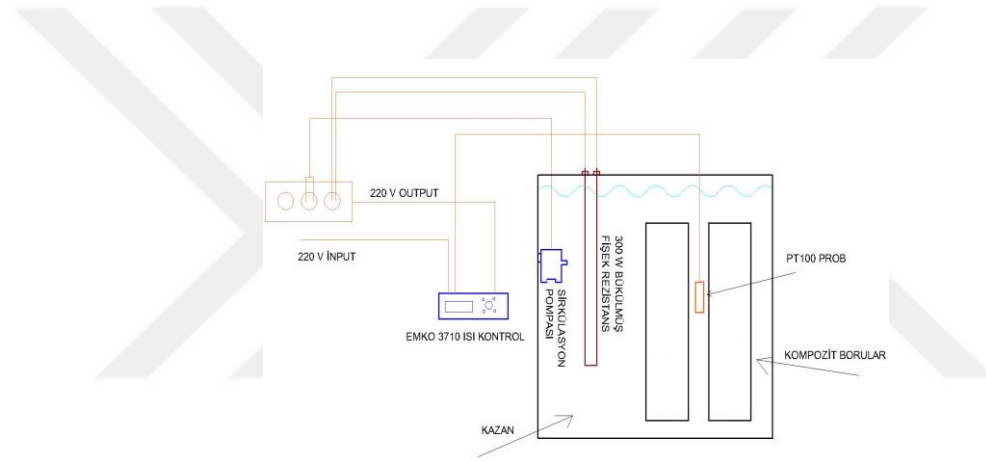
Bu çalışmada, hidrotermal yaşlandırma etkisinin kompozit borunun darbe davranışına ve dayanımına etkisi araştırılmıştır. Şimdiye kadar yapılan çalışmalarda, deniz suyuna daldırmanın darbe dayanımına ve kompozit malzemelerin dayanımına etkileri ile ilgili çalışmalar yapılmış ancak 80 °C saf su ortamına maruz bırakılarak yapılan bir hidrotermal yaşlandırma işlemine rastlanılmamıştır.



Şekil 4.2. Hidrotermal yaşlandırma ünitesi

Hidrotermal yaşlandırma işlemi yapılmamış ve kuru olarak gösterilen bir dizi örnek referans değerleri de Kara ve ark. Yaptığı çalışmadan alınmıştır. Diğer örnekler 1, 2, 3 ve 4 er haftalık zaman dilimlerinde hidrotermal yaşlandırma işlemi için özel hazırlanan cam haznede 80 °C saf su ortamına maruz bırakılmıştır (Şekil 4.2).

Hidrotermal yaşlandırma işlemi için 40x40x40 cm ölçüsünde ısıya dayanıklı 7mm kalınlığında temperli camdan 64 litre kapasiteli cam hazne yaptırılmıştır. Test düzeneğinin 80°C sıcaklıkta sabit kalması için 2 adet 300 kW rezistans, kontrol sistemi için yüksek hassasiyette ısı kontrol özelliği olan sıvı problu dijital kontrol cihazı, sıcaklığın eşit dağılımı için 2.2 W değerinde dolaşım pompası ve kazanın yalıtımı için yalıtım malzemesi kullanılmıştır. Sistem şematik olarak Şekil 4.3.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Hidrotermal yaşlandırma ünitesi şematik gösterimi

4.4. Halka Çekme Testi

Çekme testi, malzemenin özelliklerini belirlemede yaygın olarak kullanılan testlerden birisidir. Test sonucunda, malzeme özellikleri hakkında oldukça detaylı ve faydalı bilgiler elde edilmektedir. Test edilecek malzemeden standartlara uygun olarak hazırlanan çekme numunesi iki ucundan çeneler arasına yerleştirilmekte ve bu numune gittikçe artan bir yük vasıtasıyla kopartılması sağlanmaktadır. Çekme boyunca kuvvet-uzama değerleri ölçülmektedir. Ölçülen yük-uzama değerlerinden yararlanarak gerilme – şekil değiştirme eğrileri oluşturulur. Bu eğrilere çekme diyagramı da denir. Her malzemenin kendine özgü bir gerilme şekil değiştirme eğrisi vardır.

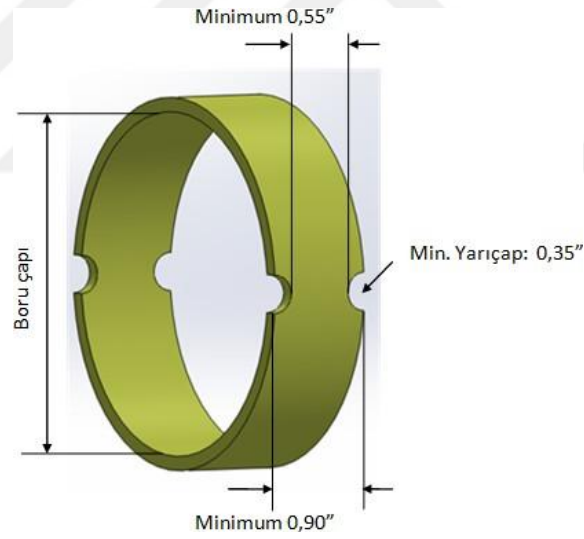
Çekme testi sonucu malzemenin, çekme dayanımı, akma dayanımı, elastisite modülü, kopmadaki yüzde uzaması, üniform uzama yüzdesi, kopmadaki kesit daralma yüzdesi gibi değerleri elde edilmektedir.

Çekme deneyleri ASTM D 2290 Prosedür A'ya göre yapılmıştır. Bu standartta verilen test süreci, birçok malzemenin bölünmüş bir disk veya halka parçası kullanarak belirli ön koşullar altında (sıcaklık, nem ve test hızı vb.) malzeme dayanımını belirlemek için yapılan çalışmalardır. Bu test üretim yönteminden bağımsız olarak kompozit malzemelere uygulanabilir. Prosedür A takviyelendirilmiş termoset reçine kompozit borular için kullanılmaktadır.

Teğetsel gerilme değerinin hesaplanması Prosedür A'ya göre Eşitlik 4.1' de verilen formül ile bulunur:

$$\sigma_T = P_b / 2A_m \quad (4.1)$$

P_b numunenin kırıldığı en büyük kuvvet değeri (N), A_m azaltılmış bölgedeki en küçük kesit alanıdır.



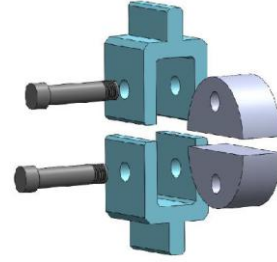
Şekil 4.4. Prosedür A' ya göre halka çekme numuneleri (Kara ve Uyaner 2017)

1, 2, 3 ve 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış 6, 8 ve 10 tabakalı cam elyaf takviyeli kompozit borulardan Şekil 4.4.'te verilen ölçülere uygun olarak halka çekme numuneleri hazırlanmıştır. Prosedür A'ya göre numunenin her iki tarafına azaltılmış bölge açılması kullanıcının tercihinine bırakılmıştır. Halka çekme testlerinde test makinesi çenesinin çekme hızı, nem, sıcaklık ve numune kalınlığı gibi şartlar dikkate alınmıştır. Sıcaklık; standart laboratuvar atmosfer sıcaklığı olan $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$,

nem; $\%50 \pm 5$ 'dir. Test hızı en az 0,1 inç/dk' dır. Şekil 4.6' da halka çekme testinin yapılışı görülmektedir.



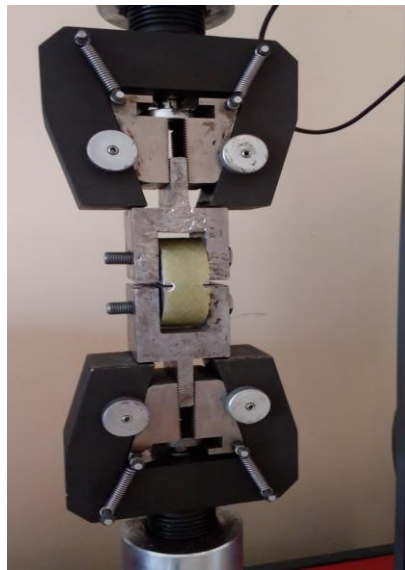
(a)



(b)

Şekil 4.5. (a) Üniversal çekme-basma test cihazı, (b) Halka çekme testi ekipmanları

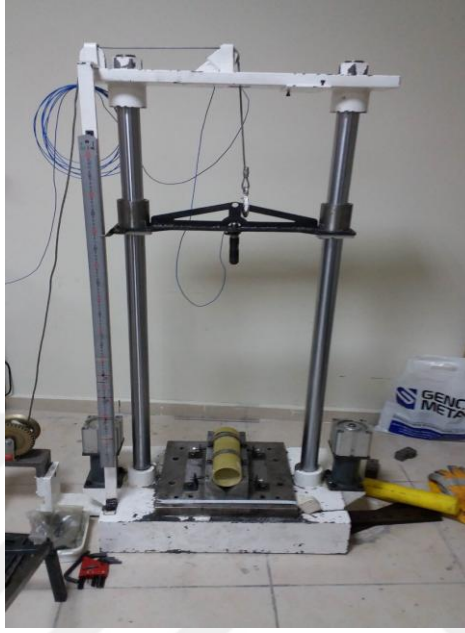
Hidrotermal yaşlandırma işleminin cam elyaf takviyeli kompozit borunun mekanik dayanımına etkisini incelemek üzere Şekil 4.5. (a)' da Kalitest Makine tarafından üretilen üniversal çekme basma test cihazı kullanılmıştır. Cihaz farklı özelliklerde test numuneleri için çok fazla test imkânı sağlamaktadır. Cihaza uygun yazılımıyla tüm test sonuçları raporlanabilmekte ve istenildiği takdirde saklanabilmektedir. Cihaz çok sayıda test sonucunu (gerilme, kopma kuvveti, kopma uzaması, % uzama vb.) verebilme imkânına sahiptir.



Şekil 4.6. Halka çekme testi

4.5. Düşük Hızlı Darbe Deneyleri

Şekil 4.7 'da özel olarak üretilmiş düşük hızlı darbe test cihazı, bu çalışma için kullanılmıştır. Test cihazı, değişik darbe enerji seviyeleri ve hızlarda deney yapma ve yapılan deney sonuçlarını raporlama ve değerlendirme imkânı sağlamaktadır.

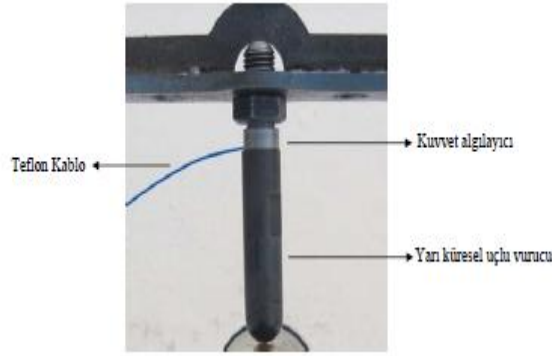


Şekil 4.7. Ağırlık düşürme test cihazı

Ağırlık düşürme test cihazı,

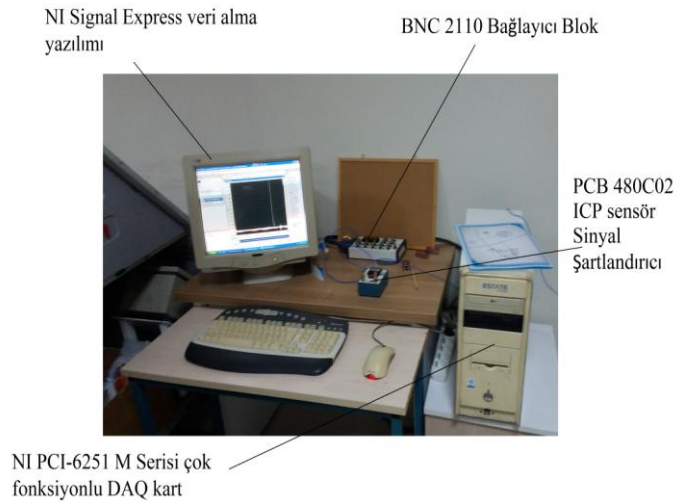
- iki krom kaplı mil üzerinde düşey hareket eden vurucu kütlesi ve kuvvet algılayıcılarının da bulunduğu sistem,
- cam elyaf takviyeli kompozit boru numunelerinin yataklanması için kullanılan V yatağı,
- elektronik kontrol ünitesi(Şekil 4.9.b) olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır.

Test cihazında yataklanmış krom kaplı miller kullanılarak vurucu kütlenin minimum sürtünme ile serbest düşmesi sağlanmaktadır. Bağlı olduğu sistem ile birlikte 6,35 kg ağırlığa sahip vurucu kütle (Şekil 4.8.), çapı 24 mm ve yarı küresel uçlu bir yapıdadır.



Şekil 4.8. Vurucu cisim ve kuvvet algılayıcı bağlantısı

Temas kuvveti, vurucu kütlesi ve vurucu arasında yer alan bir kuvvet algılayıcı ile ölçülmektedir. Şekil 4.8’de vurucu ile kuvvet algılayıcı bağlantısı görülmektedir. PCB Quartz ICP Force Sensor (M202B04) modeli olan kuvvet algılayıcısı maksimum 22,6 kN’ a kadar ölçüm yapabilmektedir. (Kara, 2012)



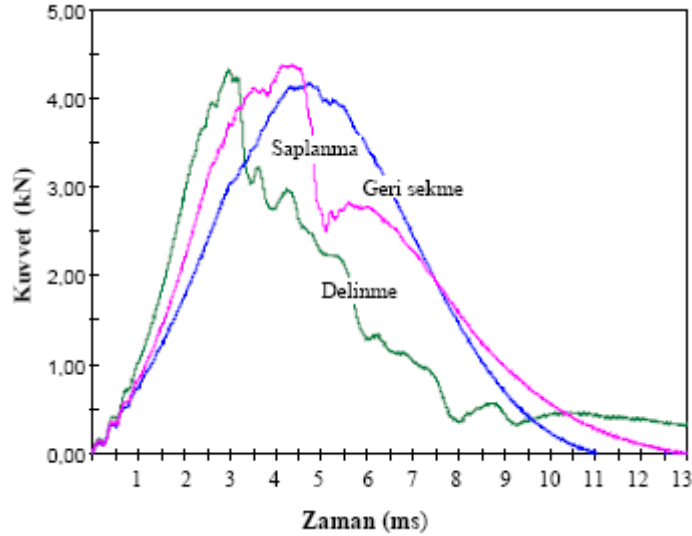
Şekil 4.9. Düşük hızlı darbe cihazının elektronik kontrol ünitesi

4.6. CTP Kompozit Borularda Darbe Karakteristiği

Farklı enerji seviyelerinde yapılan ağırlık düşürme testlerinin sonucunda kompozit borunun darbe karakteristiğini ortaya koyan temas kuvveti-yer değiştirme, temas kuvveti-zaman darbe enerjisi-zaman ve darbe hızı- zaman eğrilerini oluşturmak mümkündür. Bu eğriler, vurucu cismin geri sekmesi, saplanması ve delmesi gibi durumların incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu durumlara ait grafik incelemeleri sonraki bölümlerde verilmiştir (Kara, 2012).

4.6.1. Kuvvet-zaman eğrileri ($F-t$)

Şekil 4.10' da numune yüzeyi ile vurucu cismin darbe sırasındaki birbirleri ile olan (geri sekme, saplanma, delip geçme) davranışlarını gösteren kuvvet- zaman eğrileri verilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere düşük enerji seviyelerinde geri sekme eğrisi oluşurken, enerji seviyelerinin artması ile maksimum kuvvette artmakta ve saplanma ve delinme eğrileri oluşmaktadır.



Şekil 4.10. Kuvvet-zaman ($F-t$) eğrileri (Sayer 2009)

Geri sekme ve saplanma eğrilerinde kuvvet sıfırlanırken, delinme eğrisinin uç kısmının yatay ile paralel ilerlemesinin sebebi vurucu cisim ve numune arasındaki sürtünmeden dolayı kaynaklanmaktadır. (Kara 2012).

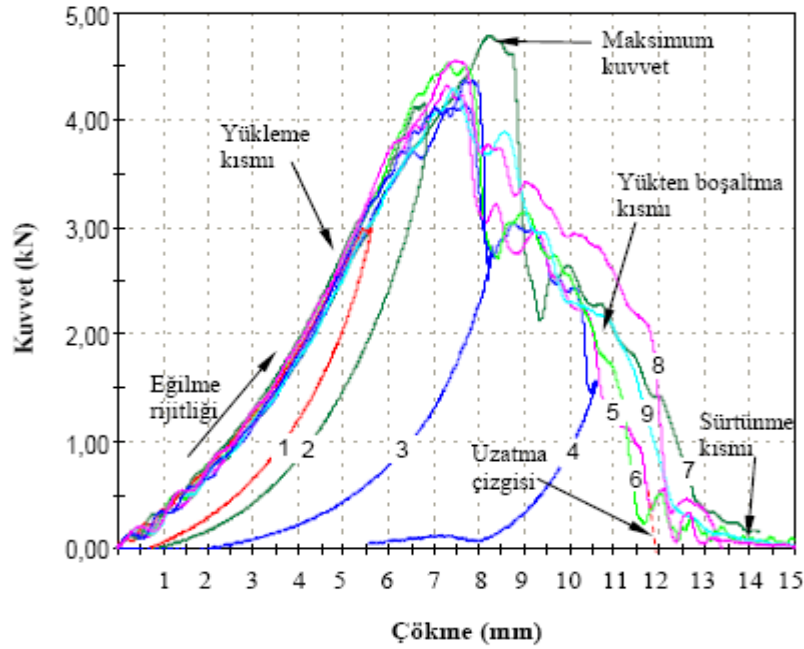
4.6.2. Kuvvet-çökme eğrileri ($F-d$)

Kompozit malzemenin darbe karakteristiğini değerlendirmede kullanılan eğrilerden biri de yer değiştirme eğrileridir. Şekil 4.11'de darbe enerjisinin artan değerine karşın malzeme üzerine gelen kuvvetin çökmeye karşı davranışını temsil eden bir $F-d$ grafiği verilmektedir.

Kapalı ve açık tip olmak üzere iki farklı tipte oluşan bu eğriler bir artma kısmından, bir maksimum kuvvetten ve azalma kısmından meydana gelmektedir. Vurucu cismin numuneye temasından sonra geri sekmesi ile meydana gelen eğri kapalı tip eğridir. Kapalı tip eğride darbe enerjisinin büyük bir kısmı malzeme tarafından absorbe edilirken enerjinin kalan kısmı vurucu cismin geri sekmesini sağlamaktadır.

Kapalı tip eğriler şekilden de anlaşılacağı üzere düşük enerji seviyelerinde oluşan eğrilerdir (ilk 3 numune). Yüksek enerji seviyelerinde ise vurucu cismin geri sekme enerjisi düşmekte ve dolayısıyla malzemede oluşan çökme artmaktadır. Kapalı tipten açık tip eğriye geçiş noktasında bulunan numune 4, enerji seviyesinin artırılması ile açık tip eğri (numune 5) olur.

Vurucu cisim numune üzerine saplanmış veya numuneyi delmiş ise yer değiştirme eğrisi açık tip bir eğri olmaktadır. Buna göre geri sekme olayı gözlenmez ve vurucu cisim numune içine doğru kalınlığı ölçüsünde ilerlemeye devam eder. Dolayısıyla, yer değiştirme eğrileri, şekilden de görüleceği üzere numune 5 ve diğerleri gibi açık tip eğri şeklinde olmaktadır.

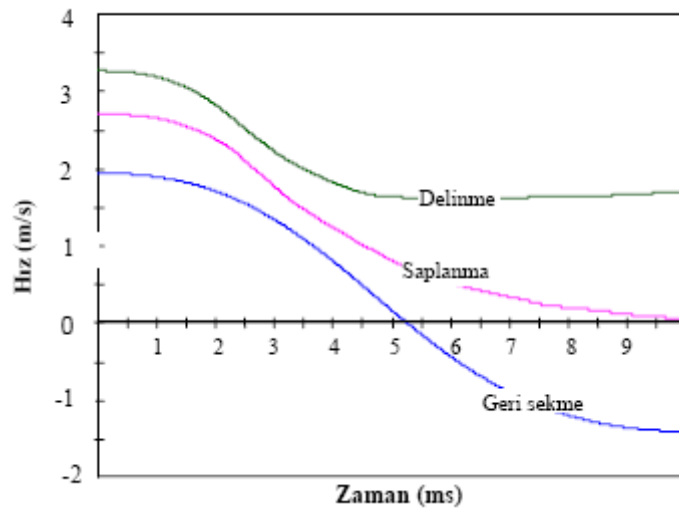


Şekil 4.11. Kuvvet - çökme (F-d) eğrileri (Sayer, 2009)

Delinme olayı artan enerji seviyesi ile vurucunun malzeme içinde ilerlemesi ve sonunda da numunenin diğer yüzeyinden çıkmasıyla meydana gelmektedir. 6-9 eğrileri vurucunun delmiş olduğu numunelere ait eğrilerdir. Şekil incelendiğinde eğriler sona doğru paralel şekilde ilerlemektedir. Bu kısım sebebi malzeme ve vurucunun arasında sadece sürtünmenin oluşmasıdır. (Kara 2012).

4.6.3. Hız-zaman eğrileri (V-t)

Kompozit malzemenin darbe karakteristiğini değerlendirmede kullanılan eğrilerden bir diğeri de şekil 4.12.' de verilen hız-zaman eğrileridir. Vurucu cismin geri sekme durumunda serbest düşme hareketi yaparak belli bir hız kazanır ve numune ile temasından sonra hızı azalmaktadır. Temastan sonra ise ters yöne hareket etmesinden dolayı negatif hıza sahip olmaktadır.



Şekil 4.12. Hız-zaman (V-t) eğrileri (Sayer, 2009)

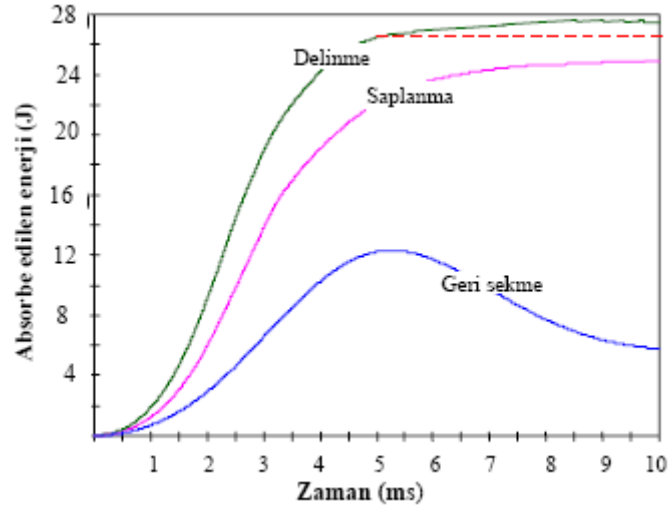
Malzemeye belirli hızla temas eden vurucu cisim malzemeye saplanır ve geri sekme olayı olmadığından dolayı hız sıfırlanmaktadır.

Vurucu cismin malzemeyi deldiği durum ise, belirli bir hızla malzemeye saplanıp malzeme boyunca ilerlerken sahip olduğu hızda düşme meydana gelmektedir. Bu düşüş vurucu cisim ve numune arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Ancak yine vurucu cisim numuneden geri sekmediği ve numune içinde hızını kaybetmesine pozitif bir hızla ilerleyecektir (Kara 2012).

4.6.4. Enerji-zaman eğrileri (Ea-t)

Şekil 4.13' te deney numunesine ait darbe karakteristiğini belirlemede kullanılmakta olan eğrilerden bir tanesi de absorbe edilen enerji-zaman (E_a-t) eğrisi olarak verilmektedir. Yer değiştirme ($F-d$) eğrisinin altında kalan alandan hesaplanan enerjinin hepsi numune tarafından absorbe edilmez ve geriye kalan enerji ise vurucu cismin numune yüzeyinden geri sekmesi için kullanılmaktadır. Eğer darbe enerjisinin

tamamı numune tarafından absorbe edilir ise vurucu cismin geri sekmesi için gerekli enerji olmadığı için numuneye saplanacaktır.



Şekil 4.12. Enerji-zaman (E_a-t) eğrileri (Sayer, 2009)

Vurucu cismin numuneyi delip geçmesi durumunda ise, sürtünme kısmının altında kalan alanın hesaplanan enerji miktarına katılmasından dolayı eğri belli bir değerde sabitlenmemektedir. Toplam enerji miktarından sürtünme kısmının altında kalan alan çıkarıldıktan sonra malzemenin emdiği enerji ise şekilden de görüldüğü üzere kesikli çizgiye karşılık gelen enerji seviyesidir (Kara 2012).

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Cam elyaf takviyeli (CTP) kompozit malzeme endüstriyel uygulamalarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu malzemenin mekanik özelliklerinin bilinmesi, işletme şartlarındaki hasar koşullarına ve çevresel şartlara uygun malzeme seçimi konusunda çok önemli bir ölçüt olmaktadır. Bu amaçla, farklı tabaka sayılarına sahip cam elyaf takviyeli kompozit borulara hidrotermal yaşlandırma etkisi altında halka çekme ve ağırlık düşürme testleri uygulanmıştır. Deneyler sonucu elde edilen bulgular hidrotermal yaşlandırma ve tabaka sayısına göre malzemenin mekanik özellikleri ve hasar davranışları grafiksel olarak gösterilmiştir.

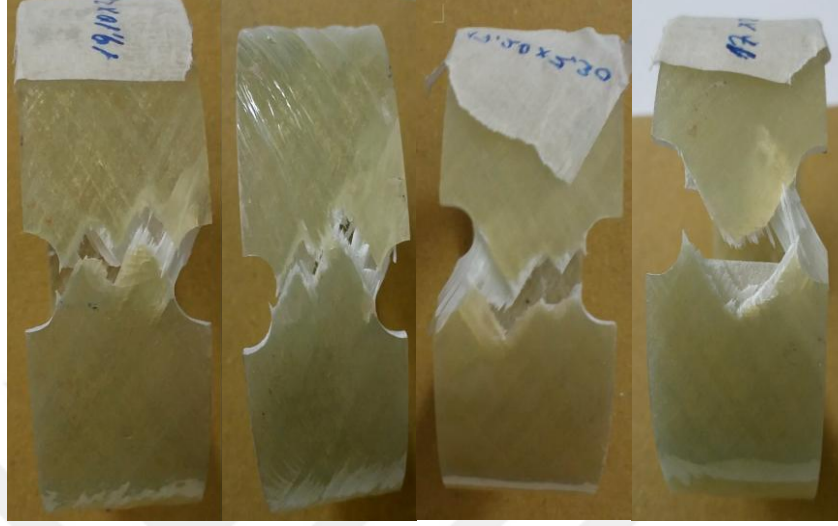
Üretici firmadan temin edilen farklı tabaka sayılarındaki cam elyaf takviyeli kompozit boru numuneler, özel olarak hazırlanan hidrotermal yaşlandırma ünitesinde 80°C sabit sıcaklıktaki saf su içerisinde belirli periyodik zaman dilimlerinde yaşlandırılmıştır. Tabaka sayısı değişiminin ve yaşlandırma işleminin numune üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla ASTM 2290 Prosedür A' ya göre halka çekme testleri yapılmış ve numunelere ait yük-uzama eğrileri çizilmiştir. Aynı şekilde farklı ortam şartlarında kompozit boru üzerine gelen darbelerin etkisi anlayabilmek için hidrotermal yaşlandırılmış numunelere düşük hızlı ağırlık düşürme testi uygulanmış ve numunede oluşan darbe hasarı incelenmiştir.

5.1. Halka Çekme Deneyi

Bu bölümde, yaşlandırma işleminden sonra yapılan halka çekme testlerinin sonuçları değerlendirilmektedir. ASTM 2290 Prosedür A' ya göre Şekil 4.4.' te verilen ölçülere göre hazırlanan farklı tabaka sayılarında, farklı sürelerde hidrotermal yaşlandırmış olan cam elyaf takviyeli kompozit borular sabit hızda çekme yüklemesine maruz bırakılmıştır. Her bir deney numune kopuncaya kadar devam etmiştir. Buradaki ana amaç, 3 farklı tabaka sayısında numunenin hidrotermal yaşlandırma süresine göre çekme mukavemetinin değişimini incelemektir.

Halka çekme testi uygulanan numunelerin sonuçları, hidrotermal yaşlandırma süresine göre en düşük süreden başlanarak sıralanmıştır. Aynı yaşlandırma sürelerine sahip farklı tabakadaki boruların sonuçları da aynı grafikte karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

Şekil 5.1' de sırasıyla a) 1, b) 2, c) 3 ve d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 6 tabakalı cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin halka çekme testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 5.1. Çekme sonrası a) 1, b) 2, c) 3 ve d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 6 tabakalı CTP kompozit numuneler

Şekil 5.1 ' de görüldüğü üzere tüm 6 tabakalı kompozit boru numuneleri azaltılmış bölgeden yarılarak ikiye ayrılmıştır ve yarılmanın elyaf doğrultusunda ($\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde) olduğu görülmektedir.

1 hafta süre ile yaşlandırılmış 6 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 26,88 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 6 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 319,826 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 36,96 olmuştur.

2 hafta süre ile yaşlandırılmış 6 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 26,24 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 6 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 312,282 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 39,28 olmuştur.

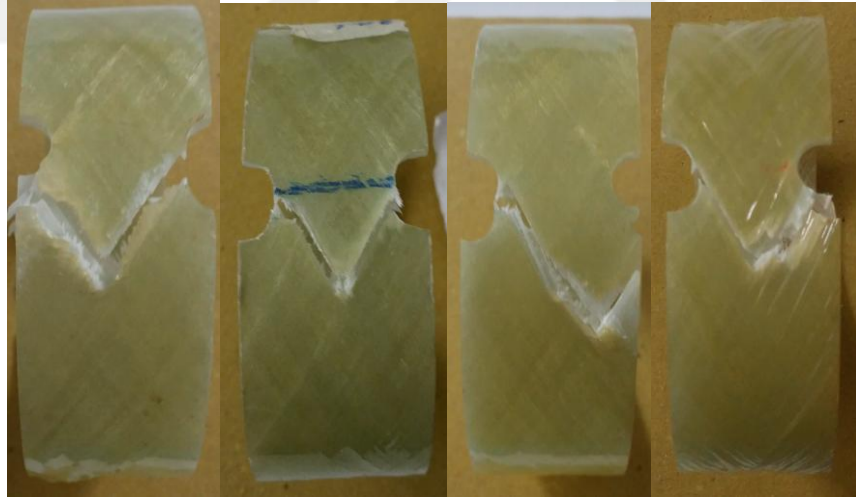
3 hafta süre ile yaşlandırılmış 6 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 25,45 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 6 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi is 304,856 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 43,33 olmuştur.

4 hafta süre ile yaşlandırılmış 6 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 25,19 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 6 tabakalı kompozit

numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 294,67 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 46,54 olmuştur.

6 tabakalı numunelerde yaşlanma süresinin artması sonucu maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme değerlerinde azalmalar olmuştur. Yaşlandırma süresi 1 hafta olan numune referans alındığında, yaşlanma süresi 2 hafta olduğunda maksimum kuvvet %2,38 ve teğetsel gerilme %2,36 oranında azalmıştır. Süre 3 olduğunda maksimum kuvvet %5,32 ve teğetsel gerilme %4,68 oranında azalmıştır. Süre 4 hafta olduğunda ise maksimum kuvvet %6,29 ve teğetsel gerilme %7,87 oranında azalmıştır. Yaşlandırma süresi 2 hafta olan numune referans alındığında, yaşlanma süresi 3 hafta olduğunda maksimum kuvvet %3,01 ve teğetsel gerilme %2,38 oranında azalmıştır. Süre 4 hafta olduğunda ise maksimum kuvvet %4 ve teğetsel gerilme %5,64 oranında azalmıştır. Yaşlandırma süresi 3 hafta olan numune referans alındığında, Süre 4 hafta olduğunda maksimum kuvvet %1,02 ve teğetsel gerilme %3,34 oranında azalmıştır.

Şekil 5.2' de sırasıyla a) 1, b) 2, c) 3 ve d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 8 tabakalı cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin halka çekme testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 5.2. Çekme sonrası a) 1, b) 2, c) 3 ve d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 8 tabakalı CTP kompozit numuneler

Şekil 5.2' de görüldüğü üzere tüm 8 tabakalı kompozit boru numuneleri azaltılmış bölgeden yarılarak ikiye ayrılmıştır ve yarılmanın elyaf doğrultusunda ($\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde) olduğu görülmektedir.

1 hafta süre ile yaşlandırılmış 8 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 35,95 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 8 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 339,655 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 36,56 olmuştur.

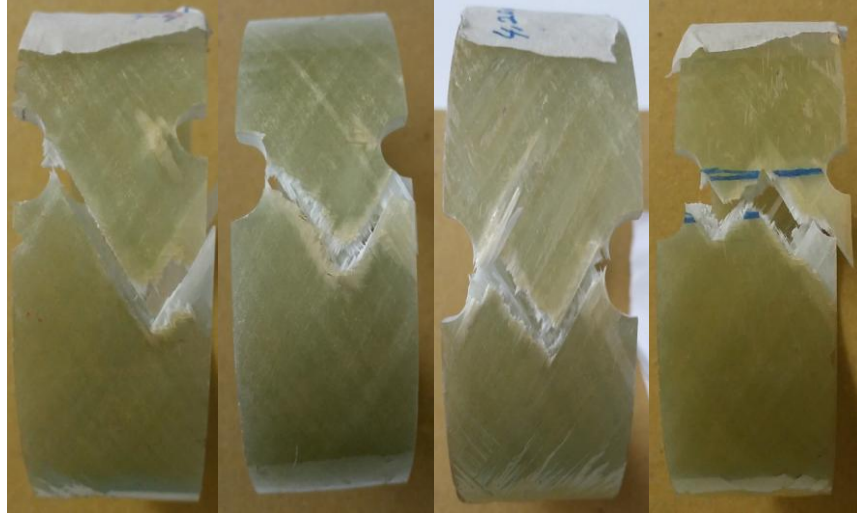
2 hafta süre ile yaşlandırılmış 8 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 34,23 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 8 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 330,62 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 36,61 olmuştur.

3 hafta süre ile yaşlandırılmış 8 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 34,16 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 8 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 327,59 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 38,90 olmuştur.

4 hafta süre ile yaşlandırılmış 8 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 33,94 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 8 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 321,63 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 40,55 olmuştur.

Numunelerde yaşlanma süresinin artması sonucu maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme değerlerinde azalmalar olmuştur. Yaşlandırma süresi 1 hafta olan numune referans alındığında, yaşlanma süresi 2 hafta olduğunda maksimum kuvvet %4,78 ve teğetsel gerilme %2,66 oranında azalmıştır. Süre 3 olduğunda maksimum kuvvet %5,03 ve teğetsel gerilme %3,55 oranında azalmıştır. Süre 4 hafta olduğunda ise maksimum kuvvet %5,59 ve teğetsel gerilme %5,31 oranında azalmıştır. Yaşlandırma süresi 2 hafta olan numune referans alındığında, yaşlanma süresi 3 hafta olduğunda maksimum kuvvet %0,20 ve teğetsel gerilme %0,92 oranında azalmıştır. Süre 4 hafta olduğunda ise maksimum kuvvet %0,85 ve teğetsel gerilme %2,72 oranında azalmıştır. Yaşlandırma süresi 3 hafta olan numune referans alındığında, Süre 4 hafta olduğunda maksimum kuvvet %2,95 ve teğetsel gerilme %1,82 oranında azalmıştır.

Şekil 5.3' te sırasıyla a) 1, b) 2, c) 3 ve d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 10 tabakalı cam elyaf takviyeli kompozit numunelerin halka çekme testi sonucunda elde edilen son hasar fotoğrafları verilmiştir.



Şekil 5.3. Çekme sonrası a) 1, b) 2, c) 3 ve d) 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 10 tabakalı CTP kompozit numuneler

Şekil 5.3 ' de görüldüğü üzere tüm 10 tabakalı kompozit boru numuneleri azaltılmış bölgeden yarılarak ikiye ayrılmıştır ve yarılmanın elyaf doğrultusunda ($\pm 55^\circ$ sarım açısı yönünde) olduğu görülmektedir.

1 hafta süre ile yaşlandırılmış 10 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 51,61 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 10 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 358,371 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 49,69 olmuştur.

2 hafta süre ile yaşlandırılmış 10 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 51,28 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 10 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 356,098 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 51,31 olmuştur.

3 hafta süre ile yaşlandırılmış 10 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 50,91 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 10 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 353, 587 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 58,13 olmuştur.

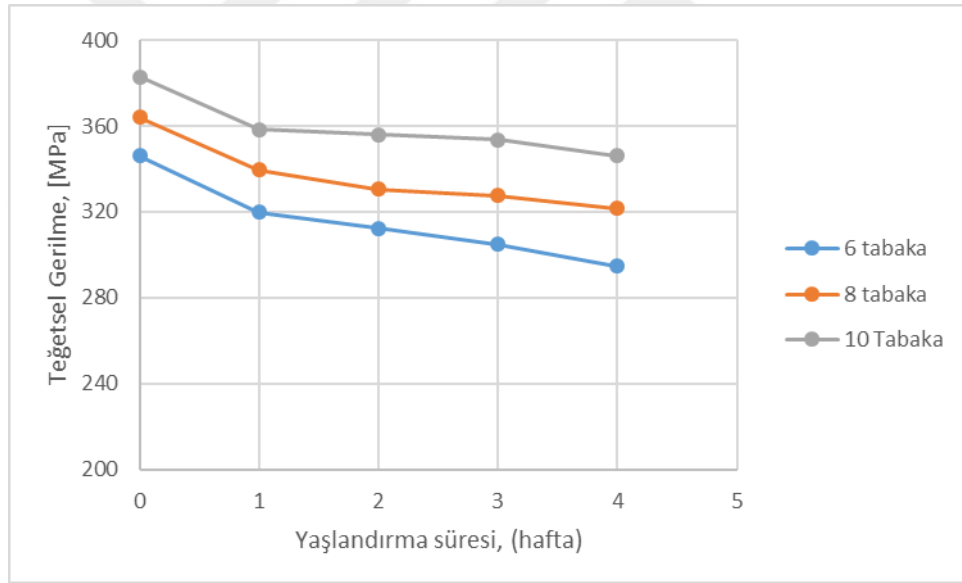
4 hafta süre ile yaşlandırılmış 10 tabakalı kompozit boru deney sonucunda, numune maksimum 49,87 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca 10 tabakalı kompozit numunenin maksimum teğetsel gerilmesi ise 346 303 MPa' dır. Numunenin deney süresi boyunca maksimum kopma uzaması ise % 59,48 olmuştur.

Numunelerde yaşlanma süresinin artması sonucu maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme değerlerinde azalmalar olmuştur. Yaşlandırma süresi 1 hafta olan numune

referans alındığında, yaşlanma süresi 2 hafta olduğunda maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme % 0,63 oranında azalmıştır. Süre 3 olduğunda maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme % 1,33 oranında azalmıştır. Süre 4 hafta olduğunda ise maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme %3, 26 oranında azalmıştır.

Yaşlandırma süresi 2 hafta olan numune referans alındığında, yaşlanma süresi 3 hafta olduğunda maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme % 0,72 oranında azalmıştır. Süre 4 hafta olduğunda ise maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme % 2,75 oranında azalmıştır. Yaşlandırma süresi 3 hafta olan numune referans alındığında, Süre 4 hafta olduğunda maksimum kuvvet ve teğetsel gerilme % 2,02 oranında azalmıştır.

Farklı tabaka sayılarındaki numuneler için, yaşlandırma süresine karşı teğetsel gerilme Şekil 5.4' de verilmiştir. Yaşlandırma işlemine maruz kalmamış numunelerde (Kara ve ark.) teğetsel gerilme genel olarak 6, 8 ve 10 tabakalı numunelerde deniz yaşlandırma süresine bağlı olarak azalmaktadır.



Şekil 5.4 Farklı tabaka sayılarındaki numuneler için, farklı yaşlandırma süreleri altında teğetsel gerilme değişimi

Maksimum teğetsel gerilme, tüm yaşlandırma süreleri için 10 tabakalı numunelerde meydana gelirken, minimum teğetsel gerilmeler ise yine tüm yaşlandırma süreleri için 6 tabakalı numunelerde meydana gelmiştir. Çizelge 5.1 ' de deneyler sonucunda tüm numunelere ait teğetsel gerilme değerleri verilmiştir.

Çizelge 5.1 Çekme deneyi sonucunda numunenin teğetsel gerilme değerleri

	Yaşlandırılmamış Numune* (MPa)	1 hafta (MPa)	2 hafta (MPa)	3 hafta (MPa)	4 hafta (MPa)
6 tabaka	346,08	319,826	312,282	304,856	294,67
8 tabaka	363,904	339,655	330,62	327,59	321,63
10 Tabaka	382,719	358,371	356,098	353,587	346,303

*Kara ve ark. (2017) yaptığı çalışmadan alınmıştır.

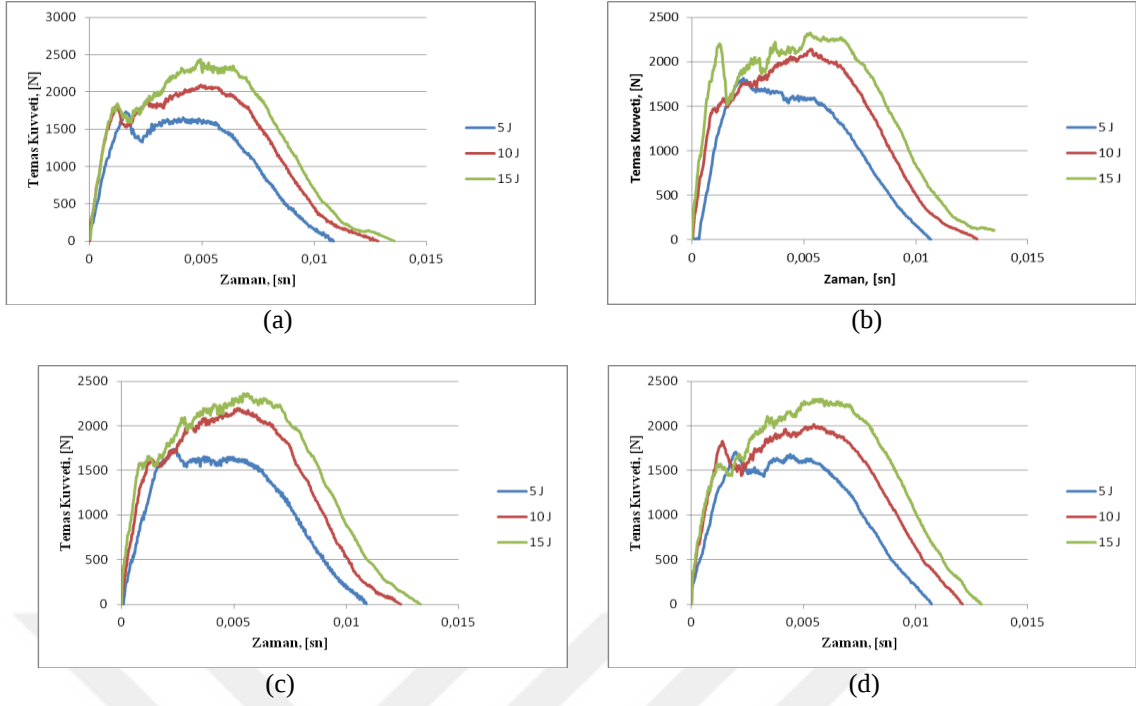
5.2. Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Darbe deneyleri 1, 2, 3 ve 4 hafta süre boyunca yaşlandırma işlemine maruz bırakılmış 6, 8 ve 10 tabakalı CTP kompozit boru numuneleri üzerinde 5, 10 ve 15J olarak gerçekleştirilmiştir. Kompozit boruların darbe karakteristiğini değerlendirmede emilen enerji (E_a), maksimum temas kuvveti ve maksimum sapma, üç önemli parametredir. Emilen enerji, darbe olayından kompozit örnek tarafından numunenin içindeki hasarın oluşmasıyla emilen enerjidir. Yukarıdaki parametrelerin ortalama değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanmış ve verilmiştir.

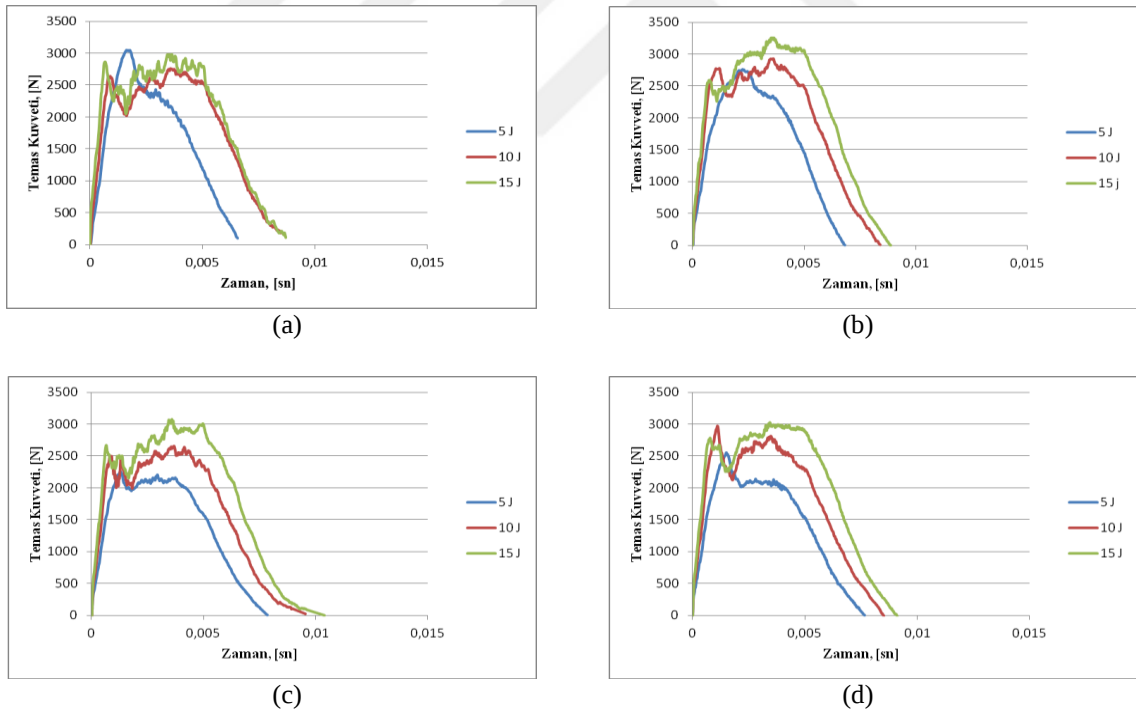
5.2.1. Numunenin hasar davranışına darbe enerjisinin etkisi

Dört farklı yaşlandırma süreleri için 6 tabaka sayısına sahip 5, 10 ve 15 J enerjilerine etki eden numunenin kuvvet-zaman eğrisi Şekil 5.5' de verilmiştir. Artan darbe enerjisi ile birlikte dört farklı süre için temas kuvvetinin arttığı görülmektedir.

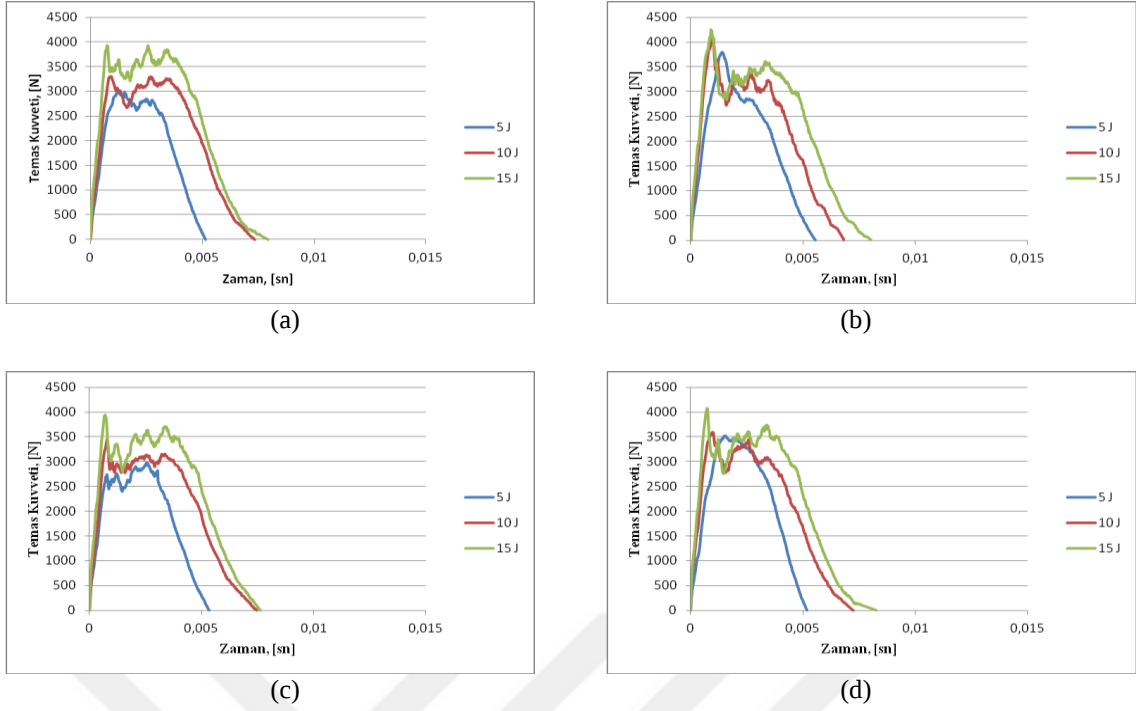
8 ve 10 tabaka sayısına sahip numunelerin temas süresi diyagramlarına karşı temas kuvveti Şekil 5.6. ve 5.7' de gösterilmektedir. Bu örneklerin temas kuvveti-zaman karakteristikleri 6 tabakalı numuneye benzerdir.



Şekil 5.5. (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları



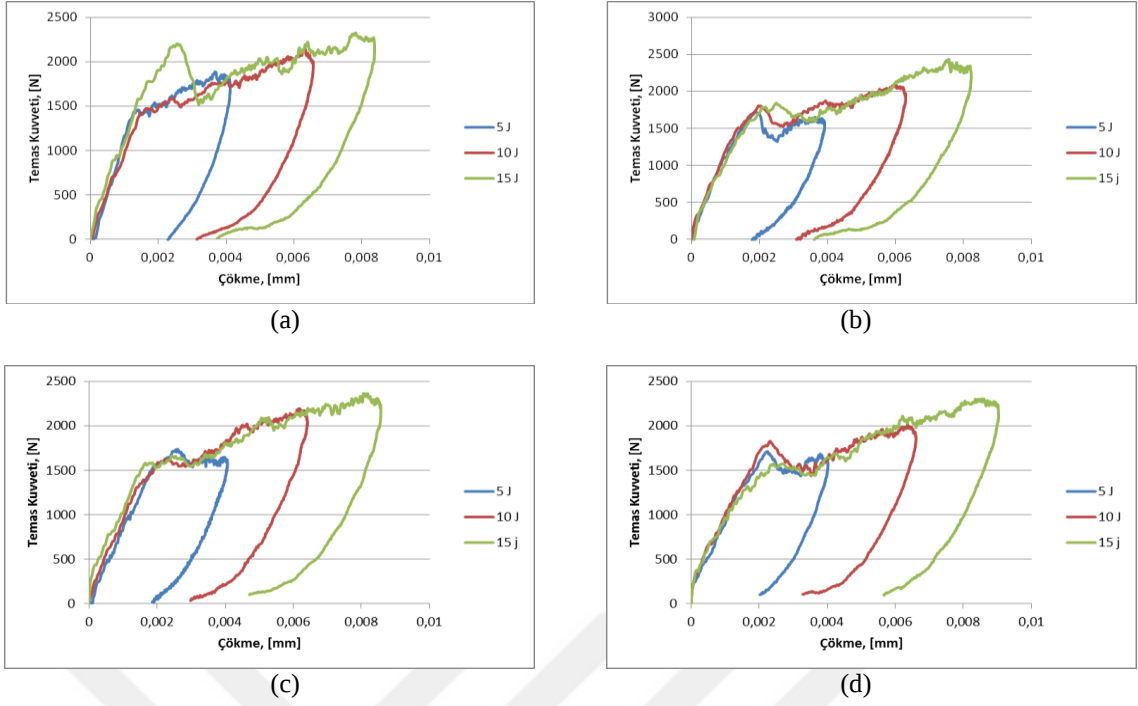
Şekil 5.6. (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları



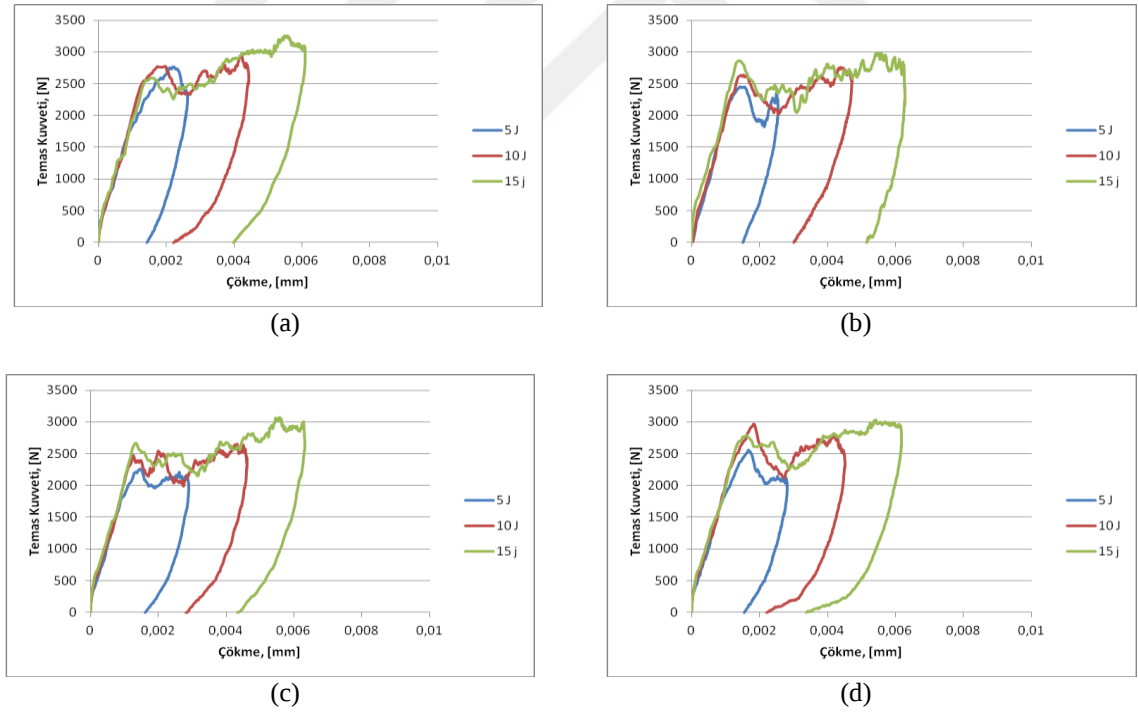
Şekil 5.7. (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları

6 tabaka sayısına sahip ve 4 farklı süre boyunca hidrotemal yaşlandırma işlemine maruz kalmış boruların temas kuvveti- yer değiştirme karakteristiklerini gösteren eğriler Şekil 5.8' de verilmiştir. Şekilde, tüm koşullar için artan darbe enerjisine karşın maksimum temas kuvvetinin ve maksimum yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir. Tüm eğrilerde iki eğim gözlemlenmektedir. İkinci eğim, örneklerde matris çatlakları, delaminasyonlar ve lif kırıkları gibi hasarların ortaya çıkması nedeniyle ilkinden daha küçüktür. İkinci eğime sahip olan ikinci bölümün sonunda, yük kaldırma eğrileri, geri dönüşü gösteren eğrinin kaynağına geri dönmektedir. Bu çalışmada testlerden elde edilen eğriler, geri tepme olayıdır. Vurucu cismin kompozit boruya saplanması veya delinmesi gözlemlenmemiştir.

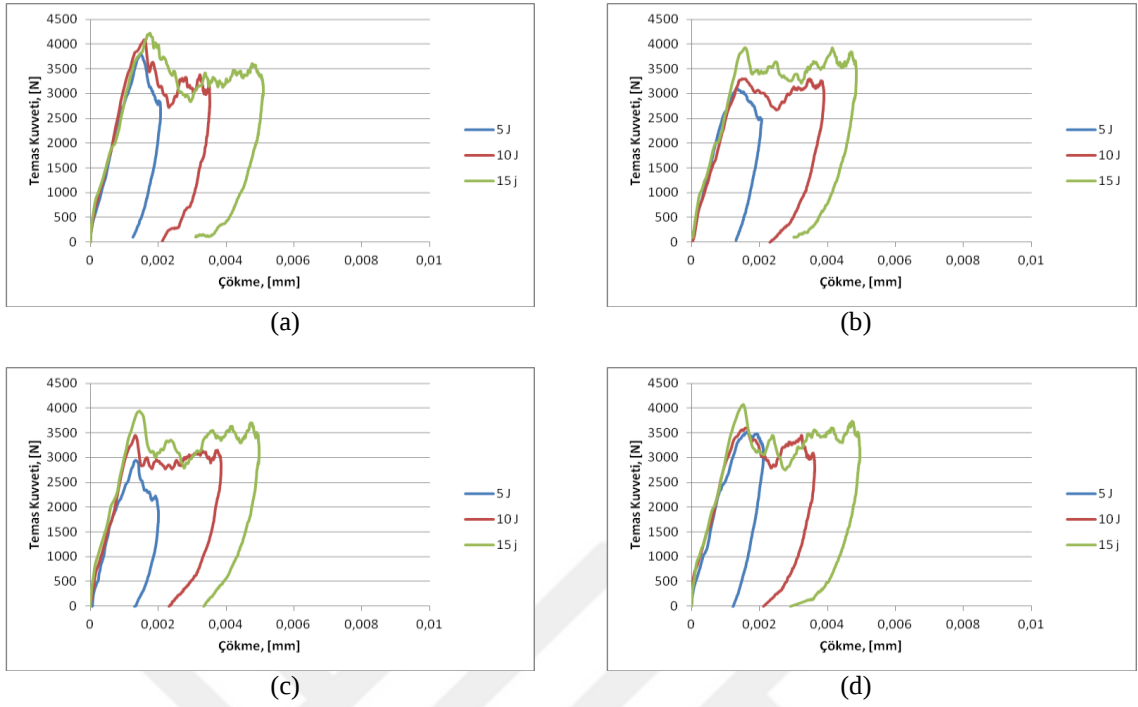
8 ve 10 tabaka sayısına sahip numunelerin temas kuvvetlerine yer değiştirme eğrileri Şekil 5.9 ve 5.10' de gösterilmektedir. Bu örneklerin temas kuvveti-zaman karakteristikleri 6 tabakalı numuneye benzerdir.



Şekil 5.8. (a) 1, (b) 2 , (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti- yer değiştirme diyagramları

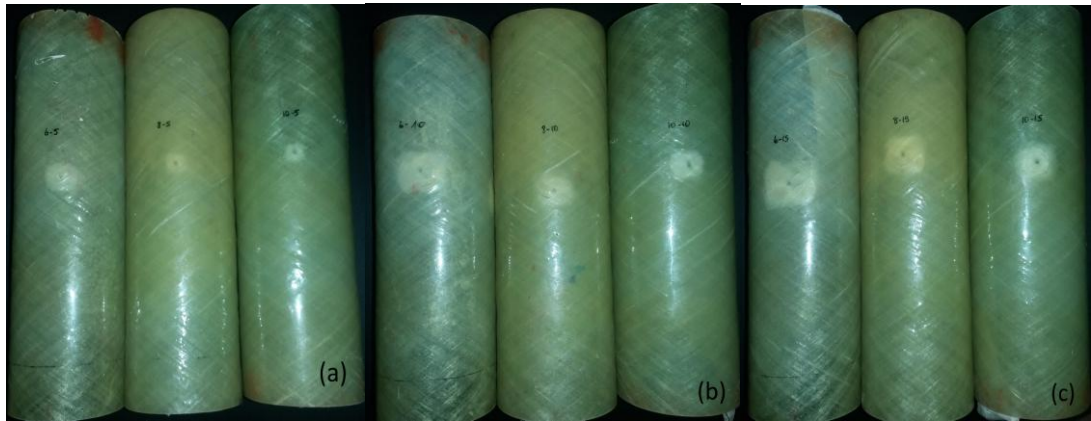


Şekil 5.9. (a) 1, (b) 2 , (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları

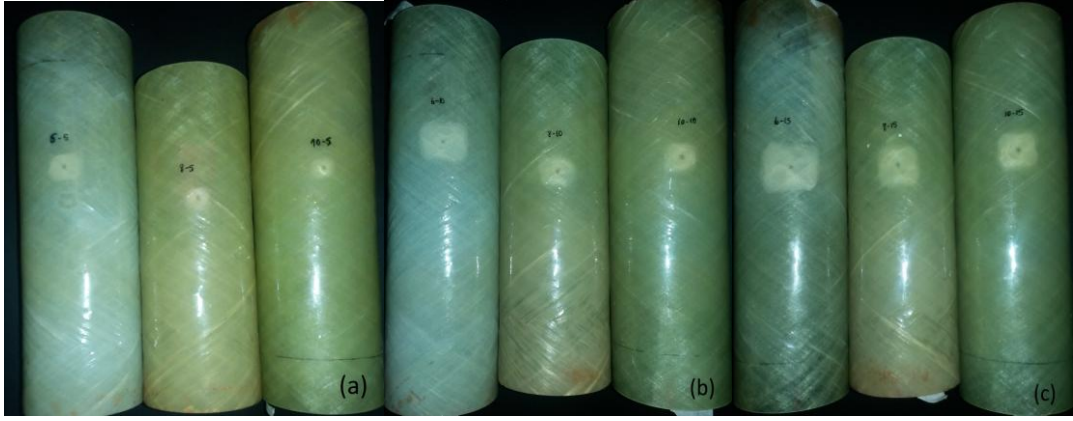


Şekil 5.10. (a) 1, (b) 2, (c) 3 ve (d) 4 hafta süre boyunca hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları

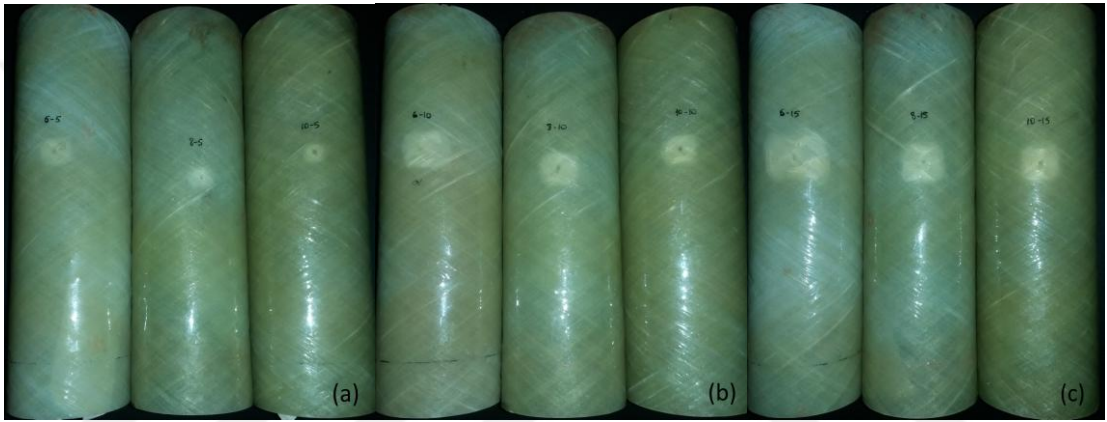
Hasar durumlarını açıklamak için, 6, 8 ve 10 tabaka sayınındaki CTP kompozit boruların çevresel koşullar (1, 2, 3, 4 hafta yaşlandırma süresi) altında 5, 10 ve 15J darbe enerjilerindeki hasar görüntüleri Şekil 5.11-14' de verilmiştir.



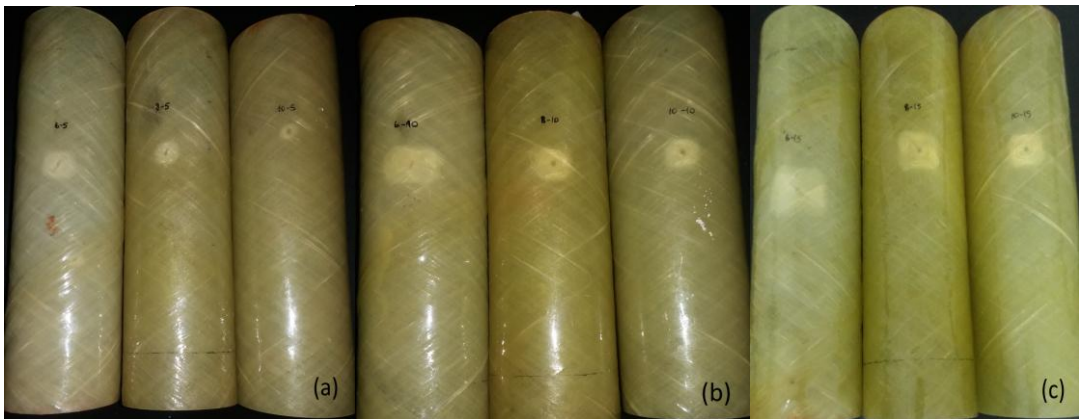
Şekil 5.11. 1 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri



Şekil 5.12. 2 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri



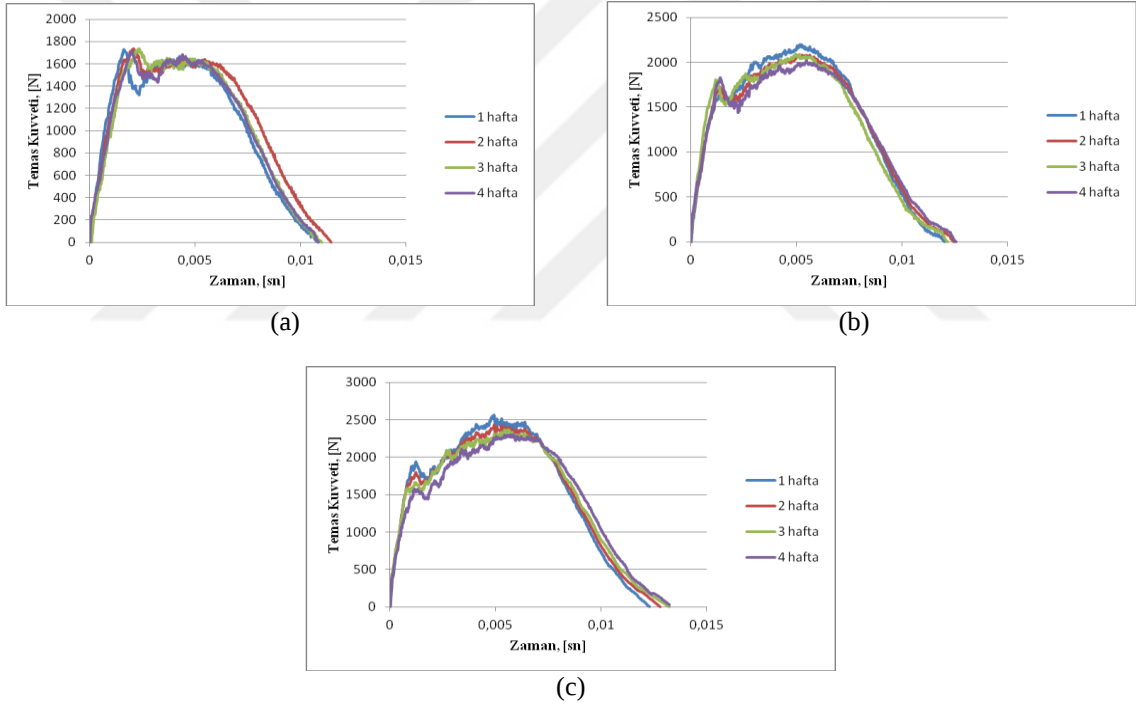
Şekil 5.13. 3 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri



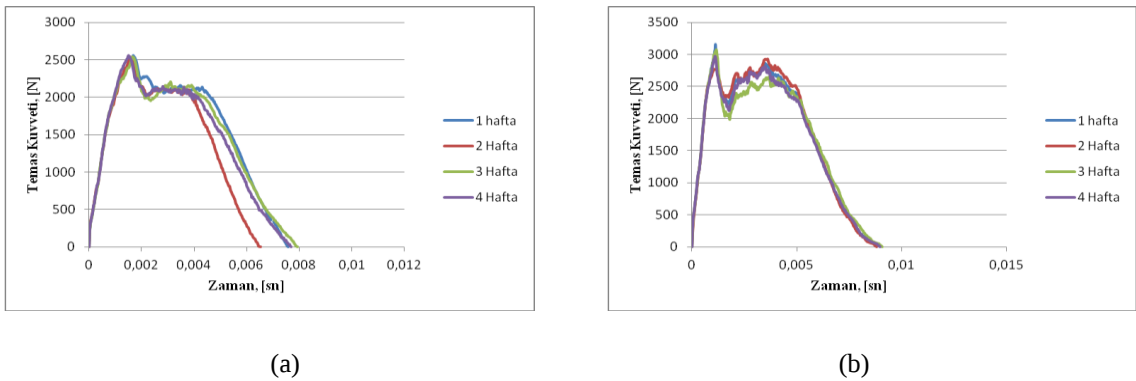
Şekil 5.14. 4 hafta süreyle hidrotermal yaşlandırılmış (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri

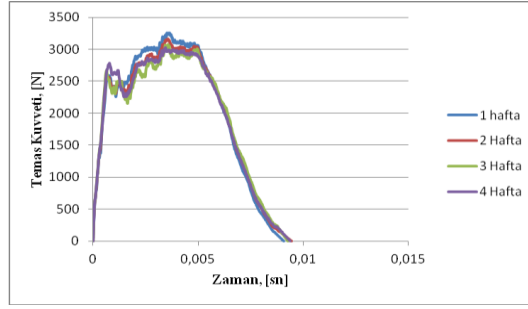
5.2.2. Numunenin hasar davranışına yaşlandırmanın etkisi

Farklı darbe enerjileri için daha önce temas kuvveti-yer değiştirme karakteristiği ile tartışma yapılmıştır. Bu nedenle, bu bölümde, temas kuvveti-yer değiştirme karakteristiği üzerindeki çevresel etkiler tartışılacaktır. Kompozit numunelerin kuvvet-yer değiştirme davranışları, farklı yaşlandırma süreleri, çarpma enerjileri ve numune tabaka sayıları için Şekil 5.15-17' de gösterilmiştir. Şekil 5.15' ten görülebileceği gibi, yaşlandırma işlemi, temas kuvveti-çökme eğrilerinin yüklenmesi durumunda önemli ölçüde etkilememektedir. Ancak yaşlandırma şartlarının yük kaldırma durumunda önemli etkisi vardır. Yaşlandırma süresinin artmasıyla su ara yüzeyi zayıflar ve kompozit numunede farklı hatalar meydana gelebilir.



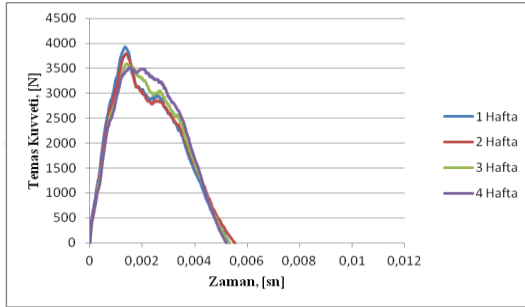
Şekil 5.15. (a) 5J , (b) 10J ve (c) 15J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları



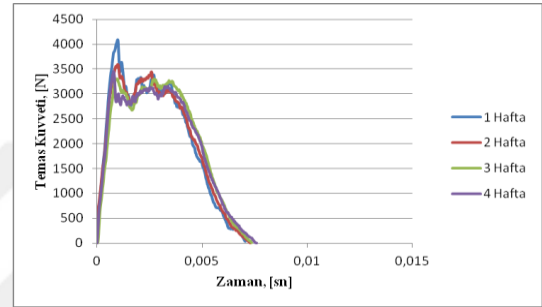


(c)

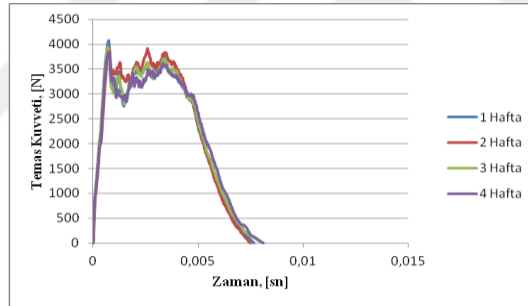
Şekil 5.16. (a) 5J , (b) 10J ve (c) 15J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları



(a)



(b)

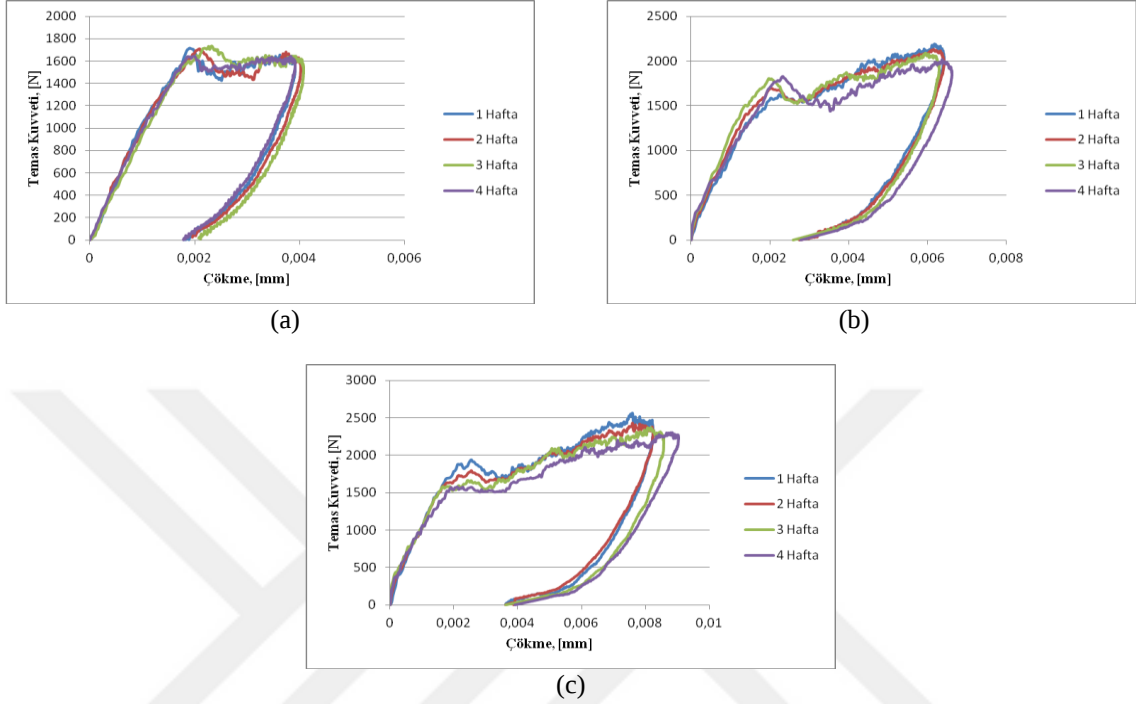


(c)

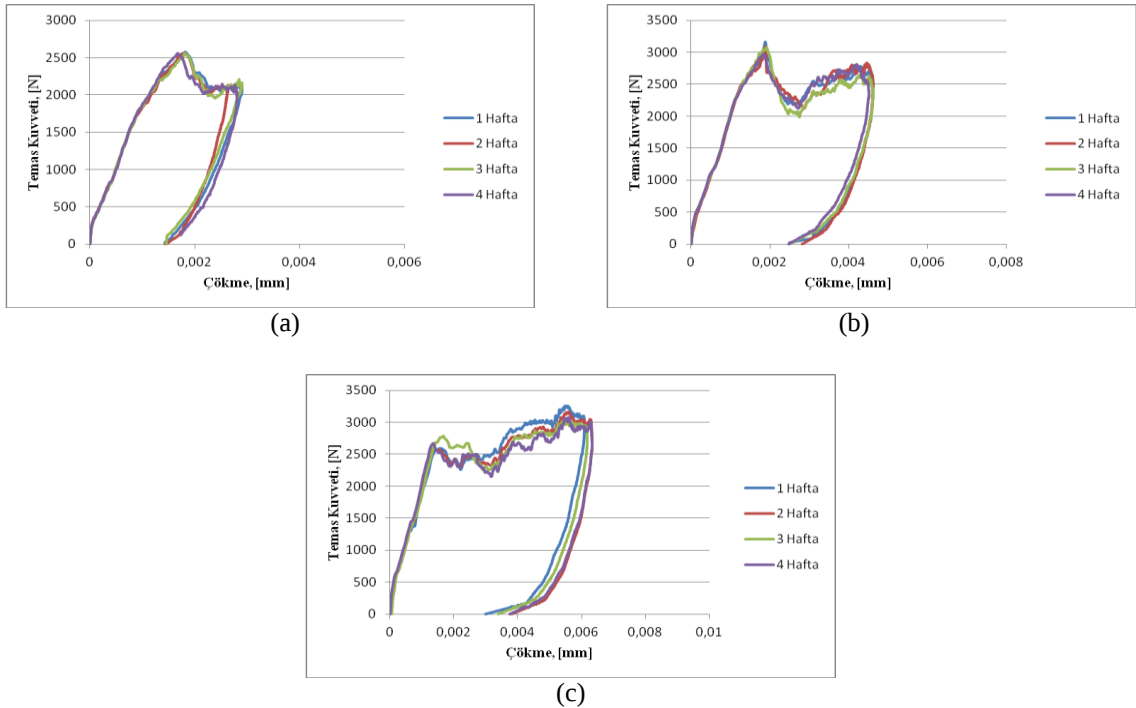
Şekil 5.17. (a) 5J , (b) 10J ve (c) 15J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti-zaman diyagramları

6 tabaka sayısına sahip ve 3 farklı enerji, seviyesinde hidrotermal yaşlandırma işlemine maruz kalmış boruların temas kuvveti – yer değiştirme karakteristiklerini gösteren eğriler Şekil 5.18’ de verilmiştir. Şekilde, tüm koşullar için artan darbe enerjisine karşın maksimum temas kuvvetinin ve maksimum yer değiştirme değerlerinin arttığı görülmektedir. Düşük tabakalı numunelerde iki eğim gözlemlenmektedir. İkinci eğim, örneklerde matris çatlakları, delaminasyonlar ve lif kırıkları gibi hasarların ortaya çıkması nedeniyle ilkinden daha büyüktür. İkinci eğime sahip olan ikinci bölümün sonunda, yük kaldırma eğrileri, geri dönüşü gösteren eğrinin kaynağına geri dönmektedir. Bu çalışmada testlerden elde edilen eğriler, geri tepme olayıdır. Vurucu cismin kompozit boruya saplanması veya delinmesi gözlemlenmemiştir.

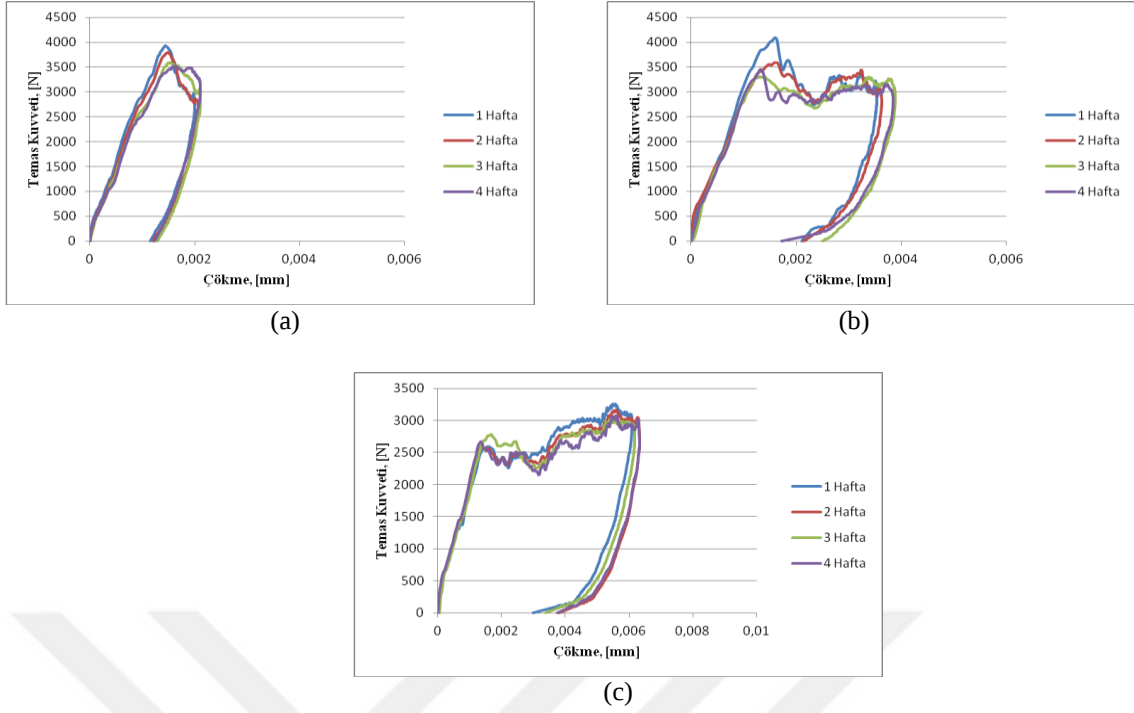
8 ve 10 tabaka sayısına sahip numunelerin temas kuvvetlerine yer değiştirme eğrileri şekil 5.19 ve 5.20' de gösterilmektedir. Bu örneklerin temas kuvveti-zaman karakteristikleri 6 tabakalı numuneye benzerdir.



şekil 5.18. (a) 5J , (b) 10J ve (c) 15J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 6 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları

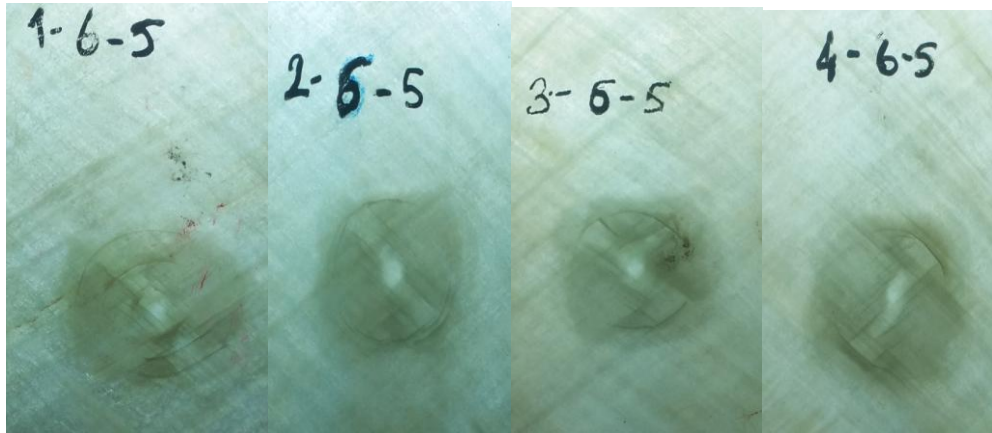


şekil 5.19. (a) 5J , (b) 10J ve (c) 15J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 8 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları

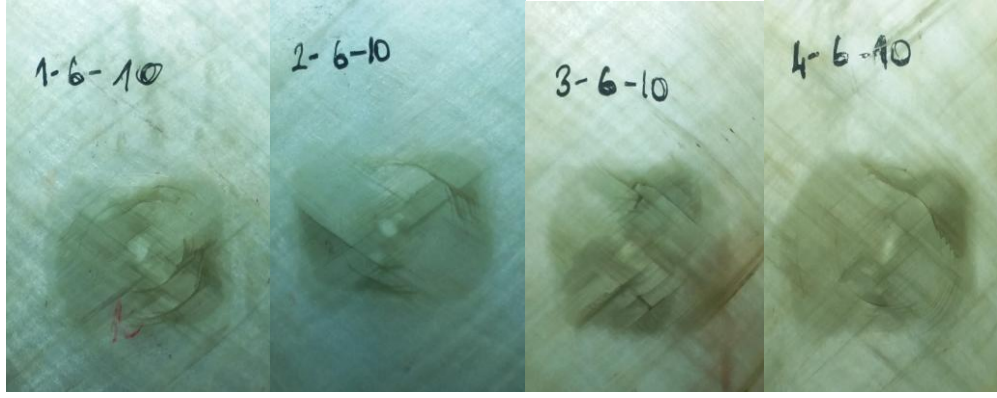


Şekil 5.20. (a) 5J , (b) 10J ve (c) 15J enerji seviyelerinde hidrotermal yaşlandırılmış 10 tabakalı boruların temas kuvveti-yer değiştirme diyagramları

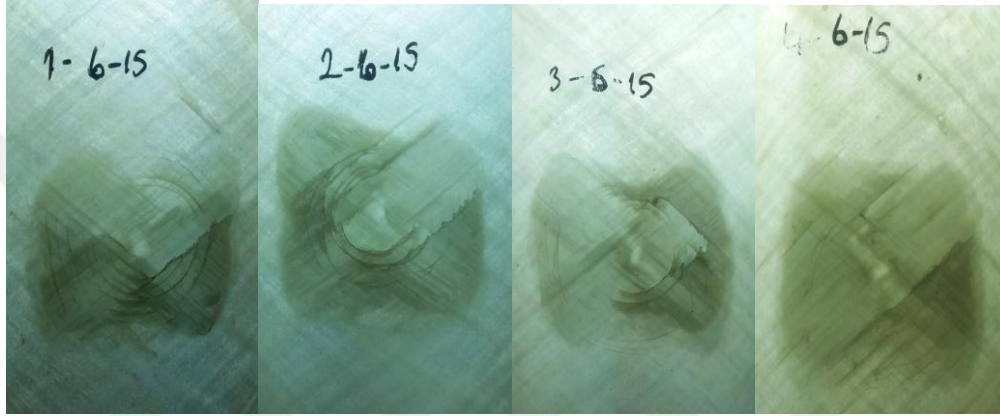
Hasar durumlarını açıklamak için, 6, 8 ve 10 tabaka sayınındaki CTP kompozit boruların çevresel koşullar (1, 2, 3, 4 hafta yaşlandırma süresi) altında 5, 10 ve 15J darbe enerjilerindeki hasar görüntüleri Şekil 5.21-23' te verilmiştir.



(a)



(b)

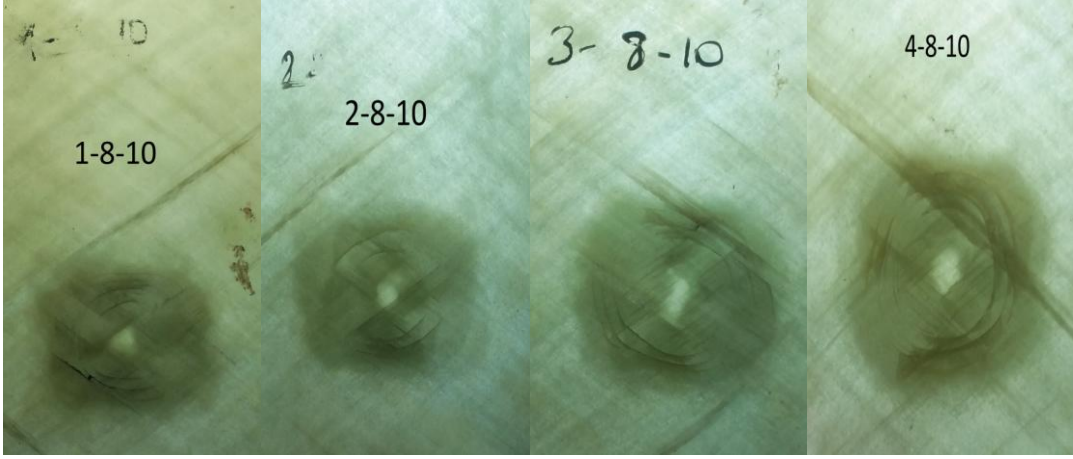


(c)

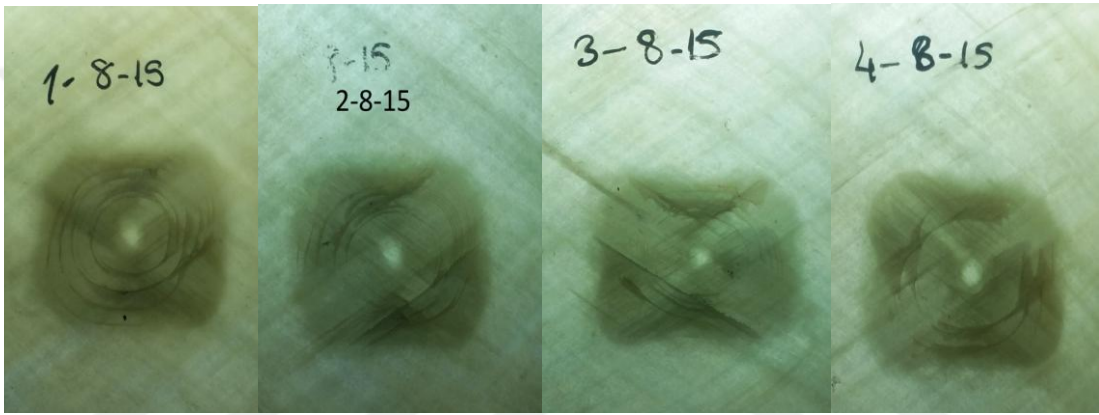
Şekil 5.21. (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde 6 tabakalı kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri



(a)

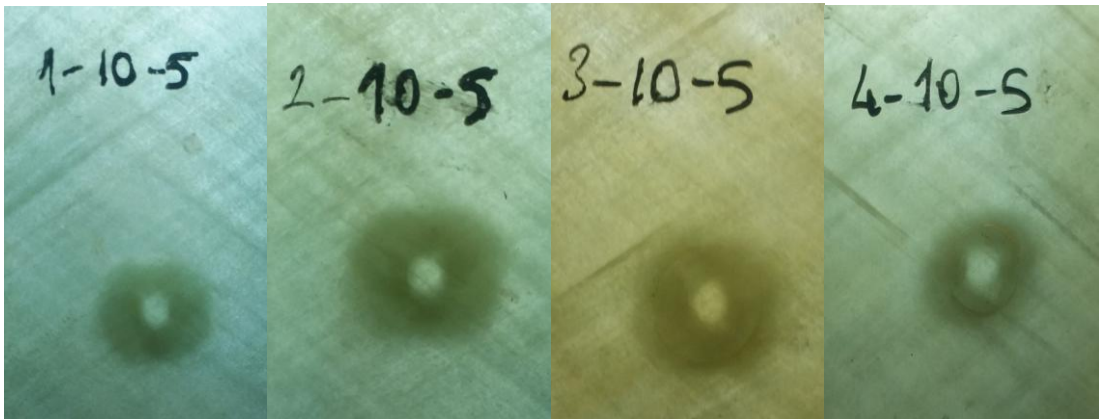


(b)

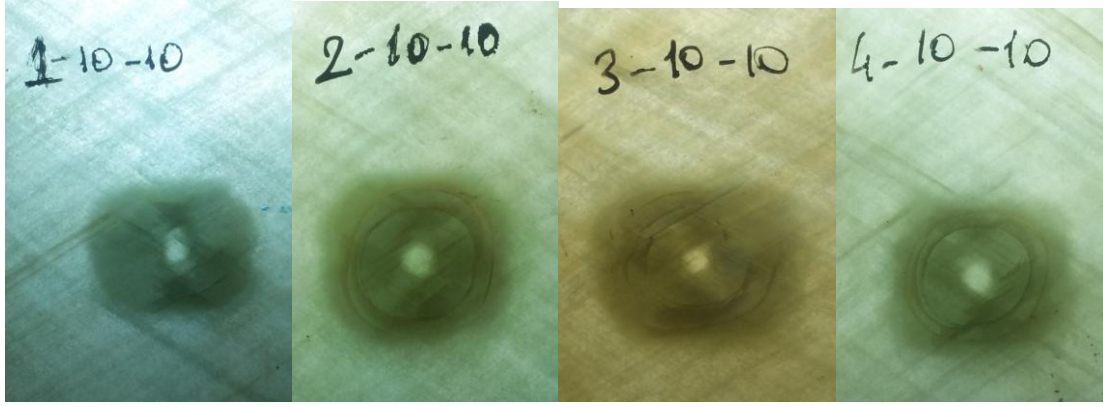


(c)

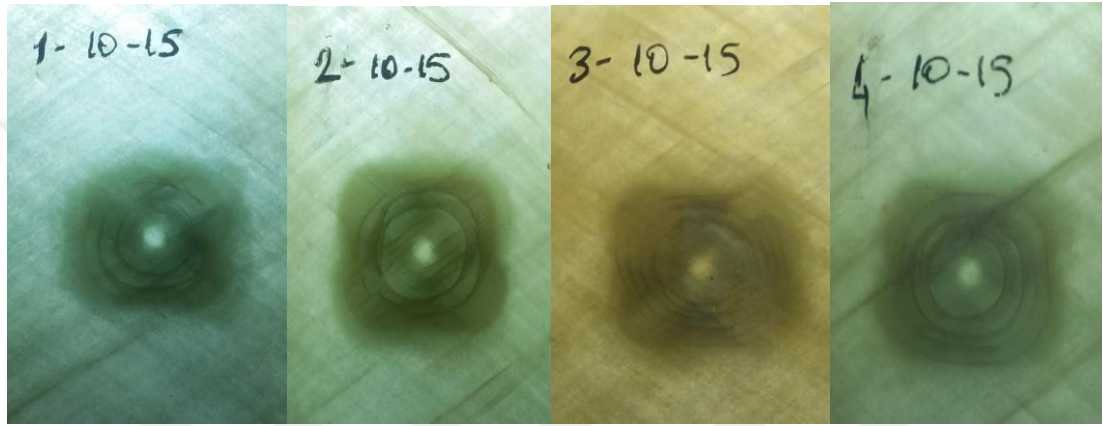
Şekil 5.22. (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde 8 tabakalı kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri



(a)



(b)



(c)

Şekil 5.23. (a) 5 , (b) 10 ve (c) 15 J enerji seviyelerinde 10 tabakalı kompozit numunelerin temas noktasındaki hasar görüntüleri

Şekiller, darbe esnasında numunelerin temas noktalarındaki hasarların incelenmesine olanak sağlamaktadır. Bu şekilde matris çatlakları, delaminasyonlar ve lif hasarları görülebilir. Düşük tabaka sayısındaki numune şekillerden de görülebileceği gibi, delaminasyon alanı sarım açısı gibi malzemenin yapısına bağlıdır. Etkilenen kompozit borularda, elyaf yönüne paralel çapraz çizgiler ile kelebek şekli gözlenmiştir. Özellikle daha düşük tabaka sayısına sahip boru numuneleri için delaminasyon alanları artan darbe enerjisi ile artmaktadır. Çünkü daha büyük tabaka sayılı örnekler daha rijittir ve daha az elastik enerjiye sahiptir. Ayrıca, delaminasyon alanlarının aynı tabaka sayısına sahip numunelerde yaşlandırma sürelerinin artmasıyla azda olsa değiştiği görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmanın temel amacı, çevre koşullarının enine darbe dayanımı ve çeşitli tabaka sayılarındaki kompozit boruların teğetsel gerilme dayanımı üzerindeki etkisini araştırmaktır. E-Cam / epoksi, filaman sarım yöntemi ile [$\pm 55^\circ$] sarım açısında üretilen kompozit borular kullanıldı. Hidrotermal yaşlandırma süresine ve darbe enerjilerine göre dayanım özellikleri elde edilmiştir. Bu deneysel çalışmanın sonuçlarına dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir;

- ❖ Halka çekme deneylerinde tabaka sayısının artmasıyla cam elyaf takviyeli kompozit boru numuneleri üzerinde oluşan en büyük teğetsel gerilme ve maksimum kuvvet miktarı artmaktadır.
- ❖ Aynı şekilde çekme deneylerinde artan yaşlandırma süresine bağlı olarak numunelerin teğetsel gerilme ve maksimum kuvvet değerleri azalmaktadır.
- ❖ Halka çekme testine maruz bırakılan numuneler azaltılmış bölgelerden yarılarak ikiye ayrılmıştır. Yarıma takviye elemanı elyaf doğrultusundadır.
- ❖ Darbe deneylerinde artan enerji seviyesinde cam elyaf takviyeli kompozit boru numunelerinde oluşan temas kuvveti, çökme miktarı, temas süresi artmaktadır.
- ❖ Elde edilen temas kuvveti - çökme grafikleri, darbe enerjisinin artmasıyla numune tarafından absorbe edilen enerjinin arttığını belirtmektedir. Ancak hiçbir deney koşulunda enerjinin tamamı absorbe edilmemiştir. Yani vurucu cisim numuneden geri sekmiştir.

- ❖ Numunelerde meydana gelen hasarlar darbe enerjisinin artması ile artmaktadır. Daha düşük enerji seviyelerindeki numunelerde yüzeyde matris çatlamları ve delaminasyon alanı daha küçükken enerji seviyesinin artmasıyla daha büyük matris çatlamları ve delaminasyon alanı oluşmuştur. Tüm enerji seviyelerinde numunelerde saplanma veya delinme olayı görülmemiştir.
- ❖ 10 tabakalı cam elyaf takviyeli kompozit borularda hasar alanı 8 ve 6 tabakalı kompozit borulara göre daha küçük oluşmuştur.
- ❖ Tüm etki özellikleri için yaşlandırma zamanının artmasıyla 4. haftanın sonunda yapılan deneyler, maksimum çökme değerlerine ve tepe kuvvetinin maksimum değerlerine sahip olduğunu göstermektedir.
- ❖ Çökme değerleri, numune borularının darbe cevabını değerlendirmek için önemli özelliklerdir. Tüm numuneler için çökme değerleri artan enerji ve yaşlandırma süresi ile artmaktadır.

6.2. Öneriler

Filaman sargı üretim yöntemiyle üretilen $\pm 55^\circ$ elyaf açısında cam elyaf takviyeli kompozit borular üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Üretilen numuneler 80 °C saf suda 1, 2, 3 ve 4 hafta süreyle bekletilerek hidrotermal yaşlandırılmışlardır. Farklı kimyasallar kullanılarak ve farklı sürelerde bekletilerek yeni çalışmalar yapılabilir. Yaşlandırılmış kompozit borulara 5, 10 ve 15 J darbe enerjilerinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Enerji seviyelerini değiştirerek farklı düşük hızlı darbe deneyleri ortaya konulabilir. Ayrıca hidrotermal yaşlandırılmış borular yorulma deneylerine de tabi tutulabilir.

KAYNAKLAR

- Abrate, S., 1998, Impact on Composite Structures. Cambridge, Cambridge University Press. 135-160.
- Advanced Glassfiber Yarns LLC, Technical Paper, “*High Strength Glass Fibers*”, p. 2-11, March 2003.
- Aktas, M., Atas, C., İcten, B.M., ve Karakuzu, R., 2009, An experimental investigation on impact response of unidirectional composite laminates. *Composite Structures*, 87(4), 307-313.
- Arikan, H., 2010, Failure analysis of $[\pm 55^\circ]$ filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure. *Composite Structures*, 92, 182–187.
- Aslan, Z., Karakuzu, R. & Okutan, B., 2003, The Response of Laminated Composite Plates under Low-Velocity Impact Loading. *Composite Structures*, 59, 119-127.
- Aslan, Z. & Karakuzu, R., 2002, Transient Dynamic Analysis of Laminated Composite Plate Subjected to Low-Velocity Impact. *Mathematical & Computational Applications*, Vol. 7, No.1, 73-82.
- Avci, A., Sahin, O. S., & Tarakcioglu, N., 2007, Fatigue behavior of surface cracked filament wound pipes with high tangential strength in corrosive environment. *Composites, Part A*, 38, 1192–1199.
- ASTM Standard D2290-16, 2012, " Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe" *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2012, DOI: 10.1520/D22290-16, www.astm.org.
- Barkoula, N. M., Paipetis, A., ve Matikas, T., 2009, Environmental degradation of carbon nanotube-modified composite laminates: a study of electrical resistivity. *Mechanics of Composite Materials*, 45(1), 21-32.
- Cabanelas, J. C., Prolongo, S. G., ve Serrano, B., 2003, Water absorption in polyamino siloxane–epoxy thermosetting polymers. *Journal of Materials Processing Technology*, 144, 143-144.
- Çalık, I. C., 2010, Investigation of Sea Water Effect on Impact Behavior of Laminated Composite Plates, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Ceyhun, V., & Turan, M., 2003, Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.
- Chow, W. S., 2007, Water absorption of epoxy/glass fiber/organo- montmorillonite nanocomposites. *EXPRESS Polymer Letters*, 1, 104-108.

- Deniz, M. E., Karakuzu, R., 2012, Seawater effect on impact behavior of glass-epoxy composite pipes. *Journal of Composites Part B: Engineering*, 43(3), 1130-1138. 12.
- Deniz, M. E., Özdemir, O., Özen, M., ve Karakuzu, R., 2013, Failure pressure and impact response of glass-epoxy pipes exposed to seawater. *Journal of Composites Part B: Engineering*, 53, 355-361. 11.
- Ersoy, H.Y., 2001, Kompozit Malzeme, Literatür Yayınları. İstanbul, 175-215
- Gemi, L., Tarakcioglu, N., Akdemir, A., & Sahin, O. S., 2009, Progressive fatigue failure behavior of glass/epoxy $[\pm 75^\circ]_2$ filament-wound pipes under pure internal pressure. *Materials and Design*, 30, 4293–4298.
- http://web.harran.edu.tr/assets/uploads/other/files/MekanikDeneyFoyu_1.pdf, Erişim Tarihi: 13.05.2017
- Kara, M., 2013, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama İle Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 127s.
- Kara, M., 2006, Düşük Hızlı Darbeye Maruz Tabakalı Kompozitlerin Dinamik Cevabı, Yüksek Lisan Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 85s.
- Karakuzu, R. Calık, İ.C., Deniz, M. E., 2017, Tabakalı Kompozit Plakların Darbe Davranışı Üzerine Deniz Suyu Etkisinin Araştırılması, *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, Cilt 7 Sayı 2/2)
- Karakuzu, R., Erbil E., Aktas, M., 2010. Impact characterization of glass/epoxy composite plates: An experimental and numerical study. *Journal of Composites Part B: Engineering*, 41(5), 388- 395.
- Kayrak, M.A., 1999, Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet-Maliyet Analizleri, *Anadolu Üniversitesi Yayınları*, Eskişehir, 1-10.
- Kootsookos, A., & Mouritz, A.P., 2004, Seawater durability of glass and carbonpolymer composites. *Composites Science and Technology*, 64, 1503-1511.
- Mallick, P. K., 2008, Fiber-Reinforced Composite, 3rd edn. CRC press, Boca Raton, FL, p. 61.
- Naik, M. K., 2005, The effect of environmental conditions on the hydrostatic burst pressure and impact performance of glass fiber reinforced thermoset pipes. Master of Science thesis, Dhahran: *Faculty of School Natural and Applied Sciences of King Fahd University of Petroleum & Minerals*.
- Nogueira, P., Ramirez, C., ve Torres, A., 2001, Effect of water absorption on the structure and mechanical properties of an epoxy resin system. *Journal of Applied Polymer Science*, 80, 71-80..

- Rafiee, R., 2013, Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes . *Composites, Part B*, 45, 257-267
- Samancı, A., 2004, Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP boruların iç basınç altında yorumlama davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 109s.
- Sayer, M., 2009, Hibrit kompozitlerin darbe davranışlarının incelenmesi, Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 134s.
- Shenoi, R. A., Wellicome, J. F., 1993, Composite materials in maritime structures. (*Fundamental Aspects*, vol. 1). Cambridge University Press.
- Shyr, T. W., Pan, Y. H., 2003, Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Composite Structures*, 62, 193-203.
- Sorucu, A., 2007, Orthotropic Malzemelerde Çatlak İlerlemesi Ve Kırılma Tokluğu Tayini, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir.
- Şahin, Y., Kompozit Malzemelere Giriş, *Gazi Kitabevi*, Ankara, (2000).
- Şahin, Ö.S., (2004), Yüzey çatlaklı filaman sarım CTP kompozit boruların korozyon ortamda yorulma davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 150s.
- Tarakcioglu N, Akdemir A, Avcı A., 2001, Strength of filament wound GRP pipes with surface crack. *Composites: Part B*, 32:131–8.
- Totten, K., 2015, Determination of the tensile strength of the fiber/matrix interface for glass/epoxy & carbon/vinylester, M.S. Thesis. *Florida Atlantic University*, Boca Raton, Florida.
- Xiao, G. Z., Delamar, M., ve Shanahan, M. E. R., 1997, Irreversible interactions Applied Polymer Science, 65, 449-458.
- Xiao, G.Z., ve Shanahan, M. E. R., 1998, Swelling of DGEBA/DDA epoxy resin during hydrothermal ageing. *Polymer*, 39, 3253-3260.
- Yılmaz, S., Arıcı, A.A., Yılmaz, T., 2010, Hidrotermal Yaşlandırmanın Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen Malzemenin Kırılma Davranışına Etkisi, 3. *Ulusal Polimer Bilim ve Teknolojisi Kongresi ve Sergisi*, Kocaeli Üniversitesi, S62.
- Yılmaz, S., 2010, Çok Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilenin Hidrotermal Yaşlandırma Etkisi Altındaki Kırılma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, 96s.
- Zhou, J., ve Lucas, J. P., 1999, Hygrothermal effects of epoxy resin. *Polymer*, 40(20), 5505-5512.

ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Konya'nın Akşehir ilçesinde doğdu. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünden birincilik derecesiyle mezun oldu. 2015 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisansını başladı ve 2016 yılında Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalına yatay geçiş yaparak 2018 yılında tamamladı. 2016-2018 yılları arasında Akşehir Belediyesinde Makine Mühendisi olarak görev yaptı. 2018 Mayıs ayında Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak başladı.

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yasin AKIN
Uyruğu : T.C
Doğum Yeri ve Tarihi : Akşehir – 10.11.1992
Telefon :
e-mail : yasinakin@sakarya.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Akşehir Selçuklu Anadolu Lisesi	2010
Üniversite	: Karadeniz Teknik Üniversitesi	2015
Yüksek Lisans	: Necmettin Erbakan Üniversitesi	2018
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2016-2018	Akşehir Belediyesi	Makina Mühendisi

YABANCI DİLLER

İngilizce, Almanca

YAYINLAR

Uluslararası Kongre Bildirileri:

1. Kara, M., Akın, Y., 2017, Effect of Hydrothermal Ageing on the Mechanical Properties of FRP Composite Tubes, *International Conference on Engineering Technologies*, Konya, TURKEY. (Yüksek Lisans Tezinden yayınlanmıştır.)