T.C.
HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KOMPOZİT TÜPLERİN EKSENEL BASMA KUVVETLERİ ALTINDA EZİLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Muhammed Fatih ZORLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU

KASIM 2016
ÇORUM

Muhammed Fatih ZORLU tarafından hazırlanan "Kompozit Tüplerin Eksenel Basma Kuvvetleri Altında Ezilme Davranışının İncelenmesi" adlı tez çalışması 28 / 11 / 2016 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği / ~~oy çokluğu~~ ile Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Yrd. Doç. Dr. Muhammed Emin ERDİN .....

Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU .....

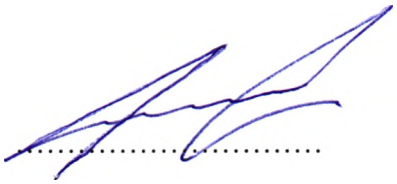
Yrd. Doç. Dr. Mehmet Burak BİLGİN .....

Hitit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 29/11/2016 tarih ve 2016/233 sayılı kararı ile Muhammed Fatih ZORLU'nun Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Ali KILIÇARSLAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

TEZ BEYANI

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.



Muhammed Fatih ZORLU

KOMPOZİT TÜPLERİN EKSENEL BASMA KUVVETLERİ ALTINDA EZİLME DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Muhammed Fatih ZORLU

HİTİT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Kasım 2016

ÖZET

Bu çalışmada, polimer matrisli cam elyaf takviyeli, farklı geometrilere sahip kompozit borulara eksenel statik basma testi uygulanmıştır. Deney numuneleri silindirik ve kare profil formda, 100 mm. ile 150 mm. uzunluklarında ve 20 mm., 40 mm. ve 60 mm. çaplarında veya kenar uzunluklarındadır. Numunelerde geometrik farklılıklar dışında kimyasal bir farklılık yoktur. Statik basma deneyi ise sabit sıcaklıkta ve sabit basma hızında gerçekleştirilmiştir. Tüm deneyler 25 ± 2^{0}C sıcaklık ve 5 mm/dk basma hızı ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonucunda numunelerin kuvvet-uzama eğrileri, maksimum enerji absorbsiyonları, toplam enerji absorbsiyonları ve özgül enerji absorbsiyonları değerleri her bir numune için ayrı ayrı ve tüm numuneler için karşılaştırılmalı olarak sonuçlar verilmiştir. Çalışmanın sonucunda elde edilen sonuçların kompozit malzemeler ve mekanik deneyler açısından değerlendirilmesi yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozit, eksenel statik basma deneyi, mekanik davranış, hasar modları, enerji absorbsiyonu

INVESTIGATION OF CRUSHING BEHAVIOR UNDER AXIAL COMPRESSION FORCES OF COMPOSITE TUBES

Muhammed Fatih ZORLU

HITIT UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
November 2016

ABSTRACT

In this study, axial static compression is applied to fiber reinforced polymer matrix composite pipes with different geometries. Test specimens are in the form of square and cylinder, 100 mm. and 150 mm. in length and 20 mm., 40 mm. and 60 mm. in diameter or edge length. There are no chemical differences in specimens except from geometrical differences. Static compression test is done under stable temperature and compression speed. All the tests are carried out under 25 ± 2^0C and 5 mm/min compression speed. At the end of the experiment, the force-elongation curve, maximum energy absorption, the total absorption of energy, and the specific energy absorption values are compared individually for all samples and the results are given for each sample. The results obtained from the study are evaluated in terms of composite materials and mechanical tests.

Keywords: glass fiber reinforced polymer matrix composites, axial static compression test, mechanical behavior, failure modes, energy absorption

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca yanımda olan ve desteğini esirgemeyen eşime ve geniş aileme sonsuz teşekkür eder, tez çalışmamı onlara ithaf ederim.

Ayrıca çalışmamı tamamlamamda yardımını ve ilgisini esirgemeyen değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU'na ve Fibermak Mühendislik Makine Kalıp Kompozit Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. firması çalışanlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Bu tez çalışmasına, MUH19004.15.009 numaralı proje kapsamında vermiş oldukları destekten dolayı Hitit Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER viii

ÇİZELGELER DİZİNİ x

ŞEKİLLER DİZİNİ xi

RESİMLER DİZİNİ xiii

SİMGELER VE KISALTMALAR xv

1.GİRİŞ 1

2.LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 6

3.GENEL BİLGİLER 11

3.1.Cam Elyaf Kompozitler 11

3.2.Basma Test Metodu ve Hasar Modları 14

3.2.1.Eksenel statik basma testi 14

3.2.2.Eksenel kuvvet sonucu oluşan hasar modları 15

3.3.Basma Dayanımının Sayısal Analizleri 17

3.3.1.Toplam enerji sönümleme 18

3.3.2.Maksimum çarpışma kuvveti 19

3.3.3.Ortalama çarpışma kuvveti 19

3.3.4.Çarpışma kuvveti verimi 19

3.3.5.Özgül enerji sönümlemesi 20

4.MATERYAL VE YÖNTEM 21

Sayfa

4.1.Deney Numunelerinin Üretimi 21

4.2.Deney Metodolojisi 28

5.DENEYSEL SONUÇLAR 30

5.1.Statik Basma Dayanımı 30

5.1.1.Silindirik profillerin statik basma dayanımı 31

5.1.2.Kare profillerin statik basma dayanımı 40

5.2.Farklı Malzemelere Uygulanan Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması 58

6.SONUÇ VE ÖNERİLER 60

KAYNAKLAR 63

EKLER 67

EK-1 68

ÖZGEÇMİŞ 69

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. Cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri 13

Çizelge 3.2. Kompozit malzemelerde oluşan hasar modları..... 16

Çizelge 4.1. Kompozit boruların boyutları 23

Çizelge 4.2. Malzemelerin mekanik özellikleri.....23

Çizelge 4.3. Deney planı 29

Çizelge 5.1. Tüm numunelerin sayısal analizi 57

Çizelge 5.2. Karşılaştırma yapılan malzemelerin mekanik özellikleri..... 58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.1. Kompozit malzemelerdeki kırılma mekanizmaları 15

Şekil 3.2. Hasar modlarının şematik görünümü 17

Şekil 3.3. Basma etkisinde kuvvet-yer değiştirme grafiği 19

Şekil 4.1. Prepreg hazırlama cihazının şematik görünümü 22

Şekil 5.1. Boyu 100 mm. çapı 20 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 31

Şekil 5.2. Boyu 100 mm. çapı 40 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 32

Şekil 5.3. Boyu 100 mm. çapı 60 mm. olan numunenin statik basma deneyisonucu grafiği 33

Şekil 5.4. Boyu 100 mm. olan silindirik numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği 34

Şekil 5.5. Boyu 150 mm. çapı 20 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 35

Şekil 5.6. Boyu 150 mm. çapı 40 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 36

Şekil 5.7. Boyu 150 mm. çapı 60 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 37

Şekil 5.8. Boyu 150 mm. olan silindirik numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği 38

Şekil 5.9. Tümsilindirik numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği 39

Şekil 5.10. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 40

Şekil 5.11. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 41

Şekil 5.12. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 42

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.13. Boyu 100 mm. olan kare profil numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği 43

Şekil 5.14. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 44

Şekil 5.15. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 45

Şekil 5.16. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği 46

Şekil 5.17. Boyu 150 mm. olan kare profil numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği 47

Şekil 5.18. Tüm kare profil numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği 48

Şekil 5.19. Boyu 100 mm. 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği 49

Şekil 5.20. Boyu 100 mm. 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği 50

Şekil 5.21. Boyu 100 mm. 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği 51

Şekil 5.22. Boyu 150 mm. 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği 52

Şekil 5.23. Boyu 150 mm. 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği 53

Şekil 5.24. Boyu 150 mm. 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği 54

Şekil 5.25. Tüm numunelerin enerji sönümleme değerleri 55

Şekil 5.26. Tüm numunelerin özgül enerji sönümlemeleri 56

RESİMLER DİZİNİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. Statik basma deneyi cihazı 15

Resim 4.1. Kompozit malzemelerdeki örgü tipleri 21

Resim 4.2. Cam elyaf prepreg malzeme 24

Resim 4.3. Prepreg malzemenin kalıba sarılmış hali 24

Resim 4.4. Shrink Tape malzemesi ve kalıbın üzerindeki görüntüsü 26

Resim 4.5. Kompozit borunun fırınlanma görüntüsü 26

Resim 4.6. Kalıptan çıkarılan cam elyaf kompozit boru 27

Resim 4.7. Çalışmada kullanılan tüm numune resimleri 28

Resim 5.1.Hasar modlarının görünümü 30

Resim 5.2. Boyu 100 mm. çapı 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 31

Resim 5.3. Boyu 100 mm. çapı 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 32

Resim 5.4. Boyu 100 mm. çapı 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 33

Resim 5.5. Boyu 150 mm. çapı 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 35

Resim 5.6. Boyu 150 mm. çapı 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 36

Resim 5.7. Boyu 150 mm. çapı 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 37

Resim 5.8. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 40

Resim 5.9. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 41

Resim 5.10. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 42

Resim **Sayfa**

Resim 5.11. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 44

Resim 5.12. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 45

Resim 5.13. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri 46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
^{0}	derece
%	yüzde
^0C	derece santigrat
h	yükseklik
d	çap
m	kütle
E	elastisite modülü
P	basınç (kuvvet)
A	yüzey alanı
n	tur
z	kalınlık
L	uzunluk
SiO_2	silisyum dioksit
Al_2O_3	alüminyum oksit
Fe_2O_3	demir oksit
CaO	kalsiyum oksit
MgO	magnezyum oksit
Na_2O	sodyum oksit
K_2O	potasyum oksit
B_2O_3	bor oksit
BaO	baryum oksit
δ	yer değiştirme
σ	mukavemet
ε	yüzde uzama
ρ	yoğunluk
$\approx$	yaklaşık

Kısaltmalar	**Açıklama**
Ar-Ge	araştırma geliştirme
ark.	arkadaşları
b10020	100 mm. boyunda 20 mm. çapında silindirik numune
cm^3	santimetreküp
GFRP	cam elyaf takviyeli polimer
GPa	gigapaskal
gr	gram
k15040	150 mm. boyunda 40 mm. kenar uzunluğunda kare numune
m^2	metrekare
mm	milimetre
MPa	megapaskal
SEM	sonlu elemanlar metodu

1. GİRİŞ

Günümüzde, teknolojik gelişmelerin ışığında üstün özellikli yeni malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Gerekli olan üstün özellikleri karşılamakta doğal malzemeler yeterli tepkiyi gösterememektedirler. Bazen de gerekli özellikleri doğal malzemelerden elde etmek çok maliyetlidir. Bu nedenler göz önüne alındığında çeşitli alanlarda üstünlük sağlamak için kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu alanda yapılan çalışmalar ve yeni malzemelerin geliştirilmesi de günümüzde devam etmekte ve büyük Ar-Ge projeleri geliştirilmektedir.

Genel bir tanımla; kompozit malzeme, belirli bir amaç doğrultusunda kimyasal bileşenleri farklı, birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen ve karşılıklı olarak birbirlerinin zayıf yönlerini iyileştirerek üstün özellikler elde etmek amacıyla, benzer olmayan iki veya daha fazla malzemenin kullanım yerindeki aranan özellikleri verebilecek daha uygun malzeme oluşumu için, makro seviyede birleştirilmesi sonucu meydana gelen malzemelerdir (Abrate, 1998; Yavuzyılmaz, 2007; Işık, 2008; Güvensoy, 2010; Şahin, 2011). Bu malzemeler, belirli uygulama alanları için üstün mekanik ve fiziksel özellikler elde etmek amacıyla spesifik konfigürasyonda değişik fazdaki malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşan malzemeler olduklarından çok fazlı malzeme olarak da adlandırılırlar (Asi, 2008). Farklı malzemelerin birleşmesiyle yeni, farklı arayüzeyler oluşur. Bu sebeple, oluşan kompozit malzemenin karakteristik özellikleri, onu oluşturan malzemelerin karakteristik özelliklerinden farklılık gösterir. Kullanım yerine veya malzemede aranan özelliğe göre kompozit malzeme, özelliği bilinen malzemelerin doğru konfigürasyonuyla ve uygun üretim tekniğiyle elde edilebilir.

Kompozit malzemeyle bazı avantajlar sağlanabilir. Ancak malzeme özelliklerinin hepsi aynı anda geliştirilemez. Bu yüzden kullanım yerine göre istenilen özelliklerde malzeme üretilmelidir. Genel olarak kompozit malzemelerin avantajları:

- yüksek mukavemet,
- tasarım esnekliği,
- boyutsal stabilite,

- hafiflik,
- korozyona karşı dayanım,
- elektriksel özellik,
- şeffaflık ve kalıcı renk,
- sıcaklık dayanımı ve yanmazlık,
- metal, beton ve ahşap yüzeylere uygulanabilme,
- tamir edilebilme,
- işlenebilme,
- titreşim sönümleyebilme,
- çevre koşullarına uyum,

olarak sıralanabilir (Deniz, 2005; Karadayı, 2012; Acar, 2013).

Kompozit malzemeler içerdiği birden fazla farklı maddeler nedeniyle değişik şekillerde sınıflandırılabilirler. Kompozit malzemeler matris malzemesine ve takviye elemanına göre iki gruba ayırılır:

Matris elemanlarına göre kompozit malzemeler:

1) Metal matrisli kompozitler
2) Seramik matrisli kompozitler
3) Polimer matrisli kompozitler
    a) Termoplastikler
    b) Termosetler
    c) Elastomerler

Takviye elemanlarına göre kompozit malzemeler:

1) Parçacık takviyeli kompozitler
2) Lamine kompozitler
3) Elyaf (fiber) takviyeli kompozitler
    a) Doğal elyaflı kompozitler
    b) Sentetik elyaflı kompozitler
        i) Cam elyaf kompozitler

ii) Karbon elyaf kompozitler
iii) Aramid elyaf kompozitler
iv) Bor elyaf kompozitler (Demircioğlu, 2006; Yavuzyılmaz, 2007; Asi, 2008).

Malzeme içerisinde hacimce yoğun olan malzeme matris malzemesi olarak adlandırılır. Matris malzemesi, kompozit malzemenin birçok fonksiyonunu sağlar (Deniz, 2005; Tanboğa, 2007). Bu nedenle malzeme üretiminde kullanılacak matris malzemesinin seçimi büyük önem taşımaktadır. Malzemelerin üretim şekli ve kullanılacağı durumda matris seçiminde önemli rol alır.

Matris malzemesiyle belirli oranda birleştirilerek kompozit malzemeyi oluşturan maddelere takviye malzemesi adı verilir. Kompozit malzemenin özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptirler. Takviye malzemesiyle birlikte kompozit malzemenin elastisite modülü ve mukavemet değerleri artış gösterir (Deniz, 2005; Tanboğa, 2007). Malzemede aranan özelliğe göre matris ve takviye malzemesi seçimi yapılır ve bunların birleşim oranları da istenen özelliğe göre farklılık gösterir.

Cam elyaf kompozit malzeme, polimer matrisli malzemenin sentetik cam elyaf takviyeli halidir. Bu malzeme diğer kompozit türleri ve metallere göre esnek bir yapıya sahiptir. Yük altında düzgün olarak kopma noktasına kadar uzar, çekme yükünün kalkması sonucunda herhangi bir akma özelliği göstermeden başlangıç boyutuna döner ve bunun sonucunda büyük miktarlarda enerjiyi kayıpsız olarak depolama ve bırakma olanağı sağlar (Ekici, 2009). Cam elyaf kompozit malzemelerin özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan matris ve takviye türünün yanı sıra elyaf malzemenin yönlenmesi de önemlidir (Beylikçi, 1994; Erden, 2009; Karadayı, 2012).

Cam elyaf kompozit malzemeler çok geniş kullanım alanına sahiptir. Geleneksel malzemelere göre çok fazla avantajları bulunan kompozitlerin teknolojisinin gelişimi ile kullanımı daha da artacağı varsayılmaktadır.

Bu malzemelerin kullanım alanları:

- havacılık/uzay/savunma sanayi,
- ev aletleri ve iş ekipmanları,
- tarım/gıda sektörü,
- yapı sektörü,
- denizcilik sektörü,
- elektrik/elektronik sektörü,
- tüketim malları/spor/eğlence,
- askeri uygulamalar,
- taşımacılık ve otomotiv sektörü,

olarak sıralanabilir (Asi, 2008; Işık, 2008; Güvensoy, 2010).

Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde statik basma testleri sıkça kullanılan bir yöntemdir. Statik basma deneylerinin numunenin boyutsal özelliklerine ve uygulanmak istenen deneye göre farklı türleri vardır (Sayer, 2009; Acar, 2013). Boru şeklindeki malzemelerin basma dayanımının tespit edilmek istendiği yöne göre basma testi radyal veya eksenel olarak uygulanabilir.

Kompozit malzemeler üzerine yapılmış çalışmalar çoğunlukla karbon fiber malzemeler üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun nedeni, karbon fiber kompozit malzemelerin çok üstün mukavemet değerlerine ulaşabilmesidir (Erden, 2009; Gemi, 2014). Karbon fiberin yanısıra cam elyaf kompozit malzemelerde endüstride çokça tercih edilen malzemelerdendir. Buna karşın cam elyaf kompozit boruların eksenel basma davranışı az çalışılmış konulardandır.

Çalışmanın amacı polimer (epoksi) matrisli cam elyaf takviyeli farklı geometrilerde, çaplarda ve boylarda kompozit borular (tüpler) üretmek ve bu borulara eksenel statik basma testi uygulayarak basma dayanımları ve enerji sönümleme değerleri tespit edilerek aralarında kıyaslama yapmaktır.

Tezin birinci bölümünde, kompozit malzemeler ve statik basma testi hakkında genel bilgiler verilerek teze giriş yapılacaktır. Tezin ikinci bölümünde, kompozit malzemeler ve bunlara uygulanan mekanik deneylerle alakalı literatür araştırması yapılacak ve bundan önceki çalışmalar incelenecektir. Tezin üçüncü bölümünde, tezde kullanılan malzeme türü olan polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozit malzeme hakkında bilgi verilecektir. Bunun yanı sıra, tezde uygulanacak olan statik basma testi ve bu basma sonucunda oluşan hata modları hakkında bilgiler verilecektir. Ayrıca, malzemeye uygulanan mekanik kuvvet sonucu malzemenin basma dayanımının sayısal olarak nasıl analiz edileceği bu bölümde işlenecektir. Tezin dördüncü bölümünde, tezde kullanılan numunelerin üretilmesi ayrıntılı bir şekilde anlatılacaktır. Ayrıca, uygulanacak deney metoduyla alakalı bilgilerde burada paylaşılacaktır. Tezin beşinci bölümünde, uygulanan deney sonuçları, her bir numune için teker teker ve benzer numunelerde karşılaştırılmalı olarak kuvvet-uzama, toplam enerji sönümleme ve özgül enerji sönümleme değerleri sayısal olarak ve grafiklerle gösterilecektir. Ayrıca bu bölümde tez farklı malzemeler ile yapılmış olan benzer çalışmalarla karşılaştırılacaktır. Tezin altıncı bölümünde, yapılan tez çalışması sonucunda elde edilen sonuçlar değerlendirilecektir. Yapılan çalışmanın avantajları ve dezavantajları tartışılacaktır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozit malzeme ve bunlara uygulanan mekanik deneylerle alakalı literatür araştırması yapıldığında çeşitli bilgilere erişilmiştir. Literatürde yapılan tarama sonucunda edinilen bilgiler bu bölümde paylaşılmıştır.

Teknolojinin gelişmesi, imalat alanındaki araştırmaların sonuç vermesi, büyük ölçüde malzeme biliminin gelişmesine bağlıdır. Son yıllarda büyük ölçüde geliştirilmeye çalışılan kompozit malzemeler yavaş yavaş şimdiye kadar kullanılan malzemelerin yerini almaktadır (Beylikçi, 1994). 20. yüzyılın ikinci yarısında üretimin hızla gelişmesi, beraberinde sanayinin temel girdisi olan malzeme biliminde de gelişmelerin hızlanmasını sağlamıştır. Bu dönemde daha ekonomik, daha mukavemetli ve daha hafif malzemelerin üretimi için yapılan çalışmalar yoğunluk göstermiştir. Böylece malzemeyi teşkil eden bileşenlerin, özellikleri farklı olan kombinasyonlarının verdikleri kompozit malzemeler, büyük bir önem kazanmıştır (Deniz, 2005).

Cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) malzemeler özgül mekanik özelliklerinin yüksekliği ve düşük maliyetleri nedeniyle özelikle otomotiv ve uçak sanayinde gittikçe artan miktarda kullanılan malzemelerdendir. Bunun yanında cam takviyeli kompozitler, büyük kuvvetlerin iletilmesi gereken yerler için de tercih edilen malzeme grubunda yer almaktadır. İletilecek yüksek kuvvet ve şekil değişim özellikleri elyafların uygun yönlenmesi sağlanarak elde edilebilmektedir (Akkuzu, 2012). Kompozit malzemelerin geleneksel malzemeler karşısında üstün mekanik özellikler sergilemesi son yıllarda bunların üretim teknikleri üzerinde daha yoğun çalışmalar yapılmasına da yol açmıştır (Deniz, 2005).

Mamalis ve ark. (1995), yaptıkları çalışmada ince cidarlı cam elyaf kompozit tüpler kullanmışlardır. Bu numunelere eksenel statik basma kuvveti uygulanmıştır. Uygulanan deney sonucunda oluşan bütün enerji absorbsiyon mekanizmaları

incelenmiştir. Ayrıca çalışmada kompozit malzemelerin enerji absorbsiyon kapasitelerinin teorik hesaplanması da çalışılmıştır.

Beylikçi (1994), çalışmasında elyaf takviyeli kompozit malzemelerde takviye malzemesi olarak kullanılan çeşitli elyaf malzemelerin boy, yön ve çapındaki değişimlerin mekanik özelliklere ne ölçüde etki ettiğini araştırmış ve sonuçları grafiklerle belirtmiştir.

Akkuzu (2012), çalışmasında kompozit malzemelerin işlenebilme kabiliyetlerini araştırmıştır. Pek çok uygulamada farklı geometriler halinde üretilen kompozitler için; kullanım öncesi delik delme, tornalama, frezeleme gibi talaşlı imalat uygulamalarına ihtiyaçtan bahsetmiştir. Bu talaşlı imalat uygulaması sırasında malzeme üzerinde ayrılma, kopma gibi hasarlar oluşabilmekte ve ayrıca kompozit takviye malzemesinin de kesici takımlar üzerinde olumsuz aşındırıcı etkilerinin oluştuğunu gözlemlemiştir. Bu nedenle, kompozit malzemelerin geleneksel yöntemlerle işlenmesinde uygun takım özellikleri ve işlem parametreleri belirlenmesinin öneminden bahsetmiştir.

Deniz (2005), çalışmasında özellikle metal ve polimer esaslı kompozit malzemeleri üretmek için kullanılan farklı teknikleri incelemiştir. Bunlar; sıvı metal emdirilmesi, sıkıştırmalı veya sıvı dövme döküm, basınçlı ve basınçsız infiltrasyon, sıvı metal karıştırması, hızlı katılaştırma, plazma püskürtme, toz metalürjisi, vakumda presleme, helisel sarma, el yatırma, soğuk presleme ve ısıl işlemle presleme teknikleridir. Çalışmada, metal ve polimer esaslı kompozit malzemeleri üretmek için kullanılan metotlar ve bu metotların karakteristik bazı özellikleri incelemiştir.

Kompozit malzemeler kullanım alanları gereğince eksenel yüklemelere maruz kalabilmektedirler. Bu yüklemeler gerçek hayatta statik basma kuvveti veya dinamik darbe kuvveti şeklinde olabilirler. Ayrıca kompozit malzemeler kullanıldıkları yere göre farklı geometrik özelliklerde olabilirler.

Kakogiannis ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada 100 mm. uzunluğunda, 2 mm. kalınlığa sahip 23 mm. ve 30 mm. çapında, ağızları 30^0 ve 60^0 eğiminde tırtıklı şekilde kesilerek özel ürettikleri E-camı polimer matrisli 4 çeşit kompozit boruya eksenel dinamik darbe kuvveti uygulayarak deneyler yapmışlardır. Yapılan deneyler sonucunda kompozit malzemenin çapındaki büyümenin maksimum enerji absorbsiyonu ve toplam enerji absorbsiyonu değerlerini arttırdığını, ağız kısmındaki eğimin artmasının ise enerji absorbsiyon değerlerini azalttığını gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra, çalışmalarında sonlu elemanlar yöntemleri kullanarak, bilgisayar ortamında aynı şekillerde modelledikleri borulara kuvvet uyguladıklarında elde ettikleri sonuçlarla gerçek yapılan deneydeki sonuçlar karşılaştırıldığında, sonuçların birbirlerine benzedikleri ancak bilgisayar ortamında yapılan deneylerin sonuçlarının daha düşük değerlerde çıktığı belirlenmiştir.

Oshkovr ve ark. (2012), yaptıkları araştırmada kare şekilli doğal ipek-epoksi kompozit tüplerin çarpışma karakteristiklerini incelemişlerdir. Deneyde kullanılan numunelerin boyutları, 80x80 mm. kenar uzunluklarında ve 50, 80, 120 mm. boylarındadır. Ayrıca numuneler 12, 24, 30 olmak üzere farklı sarım sayılarına sahiptirler. İpek-epoksi kompozitlerin enerji absorbsiyon kapasiteleri eksenel statik basma kuvveti uygulayarak hesaplanmıştır. Bu numunelere uygulanan deneyler sonucunda toplam enerji absorbsiyon ve çarpışma kuvveti verimi değerleri karşılaştırılmıştır.

Ghazijahani ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada 300 mm. uzunluklarında, 1.6 mm. kalınlığa sahip 76.2 mm çapında karbon fiber takviyeli kompozit borular kullanmışlardır. Boruların içine 1. numunede tamamen borunun içi dolacak şekilde, 2. numunede ise kenarları boruya dolacak artı (+) şeklinde kerestelerle doldurulmuşlardır. Bu şekilde hazırlanan numuneler eksenel statik basma kuvvetlerine maruz bırakılmışlardır. Uygulanan deney sonucunda içerisi tamamen kereste ile doldurulmuş olan karbon fiber boruda burkulma hatası boru uzunluğunun orta bölümlerinde olurken, içerisi artı şeklinde kereste ile doldurulmuş olan numunede burkulma hatası kompozit borunun ağız kısmında gerçekleşmiştir. Kompozit boruların orta bölümünde oluşan hasarlar borunun eksenel mukavemetinin

ani olarak düşmesine neden olduğundan istenmeyen bir hasar şeklidir. Boru ağzında oluşan hasar ise yavaş yavaş ilerleyeceğinden daha güvenilir ve daha kullanışlıdır. Bu nedenle kompozit boruların içerisinin doldurularak kullanılacağı durumlarda, borunun tamamen doldurulması yerine artı şeklinde doldurulması tavsiye edilmiştir.

Kalhor ve Case (2015), çalışmalarında S camı epoksi matrisli 304 paslanmaz çelik metal takviyeli kompozit kare hibrit tüpler kullanmışlardır. Çalışmada kullanılan metal takviye malzemesinin kalınlığı 1.65 mm. ve 2.11 mm. olmak üzere 2 çeşittir. Ayrıca kullanılan kompozit malzemeler farklı oryantasyonlarda ve kalınlıklardadırlar. Bu numunelere statik basma kuvveti 150 mm. yer değiştirme boyunca uygulanmıştır. Deneyin uygulandığı basma test cihazı 250 kN kuvvet uygulama kapasitesine sahiptir. Uygulanan deney sonucunda kompozit tüpler yüksek kuvvet (≈ 190 kN) absorbe etmişlerdir. Elde edilen deney sonuçları arasında karşılaştırılmalı grafikler verilmiştir.

Ataollahi ve ark. (2012), yaptıkları araştırmada doğal ipek-epoksi kare kompozit tüpler kullanmışlardır. Bu tüplerin mekanik kuvvet altındaki enerji absorbsiyonları ve hata davranışları incelenmiştir. Kullanılan numunelerin sarım sayıları aynı, uzunlukları farklıdır. Kompozit boruların üretiminde termoset reçine tercih edilmiştir. Araştırma sonucunda farklı uzunluklardaki kompozit tüplerin eksenel statik basma kuvvetine karşı oluşturdukları hata modları incelenmiştir.

Kompozit malzemeler, elyaf ve matris bileşenlerinden meydana gelmiştir. Bu durum malzemenin hasar davranışını karmaşık hale getirmektedir. Mekanik kuvvet sonucunda kompozit malzemede farklı hasar oluşumları meydana gelmektedir. Bu hasar oluşumlarının meydana gelmesi, kompozit malzemenin sahip olduğu mekanik ve geometrik özeliklere bağlıdır. Bunun yanında kuvveti uygulayan geometrinin ve hızının da önemli bir yeri vardır (Karadayı, 2012).

Bambach ve ark. (2008), yaptıkları çalışmada polimer matrisli karbon fiber takviyeli kare kesitli kompozit borular kullanmışlardır. Bu çalışmada, kullanılan kompozit boruların üretilmesinde elyaf malzemeleri eksenel veya radyal olarak

yönlendirilmiştir. Üretilmiş olan kare kesitli kompozit borular eksenel darbeye maruz bırakılmıştır. Deneyin uygulanmasının ardından oluşan farklı hasar modlarını incelemişlerdir. Yapılan deney sonucunda kompozit borularda 2 farklı hasar modunu gözlemlemişlerdir. Bu hasar modları ilerlemeli hasar ve yıkımsal hasardır.

Guades ve ark. (2013), yaptıkları çalışmada ise polimer matrisli fiber takviyeli kare kesitli kompozit borular kullanmış ve bu borulara130 sefer tekrar eden darbe deneyleri uygulamışlardır. Deneyin uygulandığı borular 100 mm. kenar uzunluğa ve 5.25 mm. kalınlığa sahiptir. Deney sonucunda kaçıncı darbe sonrasında malzemede hangi hasar mekanizmaları oluştuğunu incelemişlerdir. Tüm numunelerde darbe sayısı arttıkça numunenin absorbe edebildiği enerji miktarının azaldığını gözlemişlerdir. Ayrıca tüm numunelerde ilerlemeli hasar modu oluşmuş ve matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında ayrılmalar oluşmuştur.

Karadayı (2012), yaptığı çalışmada farklı geometride, farklı hızlara sahip vurucunun, tabakalı kompozit malzemedeki etkilerini sonlu elemanlar metodu (SEM) kullanılarak ANSYS LS-DYNA yazılımı ile ortaya koymuştur. Düşük hızlı darbe şartlarında tabakalı kompozit malzemenin, tabaka sayısının, tabaka kalınlığının, takviye açısının, E_1/E_2 oranının, sınır şartlarının ve yüzey alanının değişimi gibi durumlarda kompozit malzemenin mekanik davranışının nasıl değiştiğinin cevabı ortaya konulmuştur.

Liu ve ark. (2015), çalışmalarında polimer matrisli karbon elyaf takviyeli kompozitten çift katlı imal edilmiş tüplerin çarpışma karakteristiğini ve deney sonucunda oluşan hasarları incelemeyi amaçlamışlardır. Çalışmada 3 farklı kalınlık ve uzunluğa sahip kompozit borular kullanılmıştır. Dinamik çarpışma testlerinden 3 belirgin hata modu gözlenmiştir. Bunlar; ilerlemeli hasar ve yıkımsal hasar türlerinden olan orta yüzey hasarı ve boyuna hasardır.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Cam Elyaf Kompozitler

Cam elyaf kompozitler polimer matrisli ve elyaf takviyeli kompozit malzemelerin içerisinde yer alır. Bu kompozitler elyaf takviyeli kompozitler arasında en fazla bilinen ve kullanılanıdır (Wu ve ark., 1997; Karacaer, 2009; Akkuzu, 2012; Bayraktar, 2014). Cam malzemesi metalik olmayan hafif bir malzeme olan silisyum elementinden elde edilir. Genellikle bir silisyum atomu dört oksijen atomuyla çevrilmiş, silis halde (SiO_2) bulunur. Silis elementi, 3 boyutlu moleküler yapıdadır ve cam, düzensiz (amorf) yapıdadır. Bunun yanında koleminat, alüminyum oksit ve soda gibi malzemelerden de cam üretilebilir. Camın elde edilmesi ve amorf yapının sağlanması için camı oluşturacak malzemeler birlikte ergitilir ve kristalize olmadan soğutularak katılaştırılması sağlanır. İyi bir cam elde edilmesi için ergitme fırınına konulan malzemelerin iyi ayarlanması gerekir.

Cam elyaf kompozitlerin bazı özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Elyaf takviyeli kompozitler arasında en çok tercih edilen ve ucuz olan malzemelerdendirler,
- Cam elyaflar polimer malzemelerde güçlendirici olarak kullanılırlar,
- Çoğu cam alaşımlarında %50-60 oranında SiO_2 içerirler,
- Çekme kuvvetine karşı dayanımları yüksektir,
- Yoğunlukları düşüktür,
- Kimyasal maddelere karşı dayanımlıdırlar,
- Isıl dirençleri düşüktür,
- Yüksek sıcaklıklarda sertlikleri azalır ancak yanmazlar,
- Elektrik iletkenliği çok düşüktür,
- Şekillendirilmeye uygundurlar (Karacaer, 2009; Akkuzu, 2012; Kara, 2012).

Bu avantajlarının yanında,

- Aşınmaya karşı duyarlılıkları,
- Sertlik değerlerinin yüksek olması,

- Gerilme modülü değerlerinin düşük olması,
- Nemli ortamda kaldıklarında mukavemetlerinin azalması,
- Statik yorgunluğa karşı dayanımlarının düşük olması,
- Statik yüke uzun süre dayanamamaları,

gibi özellikleri de cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin dezavantajlarındandır (Karacaer, 2009; Akkuzu, 2012; Kara, 2012).

Cam elyaf, termoset ve termoplastik bazlı kompozitlerin takviyesinde kullanılan malzemelerin içerisinde en fazla kullanılan takviye elemanı olarak bilinmektedirler. Cam elyafı, yüksek çekme mukavemeti ve düşük uzama oranına sahip olması nedeniyle, kompozitlerde eğilme, çekme ve darbe dayanımını arttırır ve yüksek elastik modül özelliği sağlar. Ayrıca, düşük su emme (absorbsiyon) özelliği nedeniyle, iyi derecede boyutsal stabilite ve iklim koşullarına karşı yüksek dayanım kazandırmaktadırlar (Asi, 2008).

Cam elyaf malzemesinde, silis kumuna katılan çeşitli takviye elemanlarının etkisiyle malzeme farklı özelliklere sahip olabilir. 4 çeşit cam elyaf türü vardır (Demircioğlu, 2006; İçten, 2006; Kara, 2012).

A (alkali) camı: İçerisinde yüksek oranda alkali içeren, kimyasal direnci yüksek, elektriksel yalıtkanlık özelliği düşük olan camlardır. Kompozit malzemelerde çok fazla tercih edilmezler. Yalnızca pencere ve şişe camı olarak kullanılırlar.

C (korozyon) camı: Yüksek kimyasal dirence sahiptirler. Bu nedenle kimyasallarla doğrudan temasta bulunulan yerlerde ve depolama tankları gibi yerlerde kullanılırlar.

E (elektrik) camı: Elektrik yalıtkanlığı diğer camlara göre daha iyidir. Mukavemet değerleri yüksektir. Suya ve neme karşı dayanımlarının da oldukça yüksek olması böyle ortamlarda kullanılmalarına olanak vermektedir.

S (mukavemet) camı: Çekme dayanımı ve mukavemeti diğer camlara göre çok daha yüksektir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda dahi iyi bir yorulma direncine sahiptirler. Yüksek maliyetli ve yüksek performanslı bir takviye malzemesidir. Havacılık ve uzay sanayisinde çokça tercih edilirler.

4 tip cam elyaf malzemenin mekanik özellikleri ve bileşim oranları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri ve kimyasal içerikleri (Tanboğa, 2007)

Özellikler	**A**	**C**	**E**	**S**
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	2.5	2.49	2.54	2.48
Elastik Modül (GPa)	-	69.0	72.4	85.5
Çekme Mukavemeti (MPa)	3033.0	3033.0	3448.0	4585.0
Isıl Genleşme Katsayısı	8.6	7.2	5.0	5.6
Yumuşama Sıcaklığı (^{0}C)	727.0	749.0	841.0	970.0
Katkı Malzemeleri				
SiO_2	72.0	64.4	52.4	64.4
Al_2O_3, Fe_2O_3	0.6	4.1	14.4	25.0
CaO	10.0	13.4	17.2	-
MgO	2.5	3.3	4.6	10.3
Na_2O, K_2O	14.2	9.6	0.8	0.3
B_2O_3	-	4.7	10.6	-
BaO	-	0.9	-	-

Cam elyaflar sürekli elyaf formunda üretilir. Elyaf, camın çok ince gözenekli eleklerden belirli bir sıcaklık ve hızda geçmesiyle elde edilir. Camların ergime sıcaklıkları 1200^{0}C - 1500^{0}C arasındadır. Bu geçme hızı ve sıcaklığı cam elyafın kalınlığını belirler. İnce gözeneklerden tek tek geçen cam elyafları birleştirilerek cam elyaf demeti oluşturulur. Gözeneklerden süzülen cam elyafları bağlayıcı bir reçine malzeme püskürtülmesiyle kaplanarak bobin üzerine sarılır. Cam elyafların yapışmasını önlemek için bobinler kurutma fırınlarında hızlı bir şekilde kurutulur. Kurutma işleminin sonrasında bobinlere sarılı halde cam elyaf malzemesi hazır bulunur.

Cam elyafının kullanım amacına bağlı olarak sarma biçimleri farklı olabilir. Elyaf çapı ve demetteki lif sayısı farklılaşabilir. Cam elyafın biçimlendirildikten sonra yıpranmaya dayanımın artması için kimyasallarla bir kaplama işlemi yapılır. Kaplama malzemesi olarak genellikle elyafın kompozit malzemeye uygulanmasından önce kolaylıkla kaldırılabilen ve suyla çözülebilen polimerler kullanılmaktadır (Karacaer, 2009).

Cam elyaf takviyeli kompozit malzemeler, taşımacılık sektöründen mobilya sektörüne, askeri uygulamalardan spor ve eğlence uygulamalarına ve hatta tarımdan inşaat sektörlerine kadar geniş bir uygulama alanlarına sahiptirler. Elbette üretim yöntemleri ve kimyasal içeriğine göre de cam elyaflar farklı kullanım alanlarına sahip olabilirler (Akkuzu, 2012).

3.2. Basma Test Metodu ve Hasar Modları

3.2.1. Eksenel statik basma testi

Statik basma deneyi, malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynayan bir deney yöntemidir. Bu deney, metot olarak çekme deneyinin tam zıttı bir işlemdir ve deneyin yapımında aynı cihaz kullanılır. Basma deneyi her formdaki malzemelere uygulanabilir ancak homojen bir gerilim dağılımı sağlamak amacıyla çoğunlukla yuvarlak kesitli numuneler kullanılır. Basma deneyi numunelerinde, numune yüksekliği (h_0) ile çapı (d_0) arasındaki h_0/d_0 oranı oldukça önemlidir. Numunenin h_0/d_0 oranının çok büyük olması, deney sırasında numunenin bükülmesine ve homojen olmayan gerilim dağılımına sebep olur. Bu oran küçüldükçe numune ile basma plakaları arasında meydana gelen sürtünme deney sonuçlarını çok fazla etkilemektedir (Kayalı ve ark., 1996).

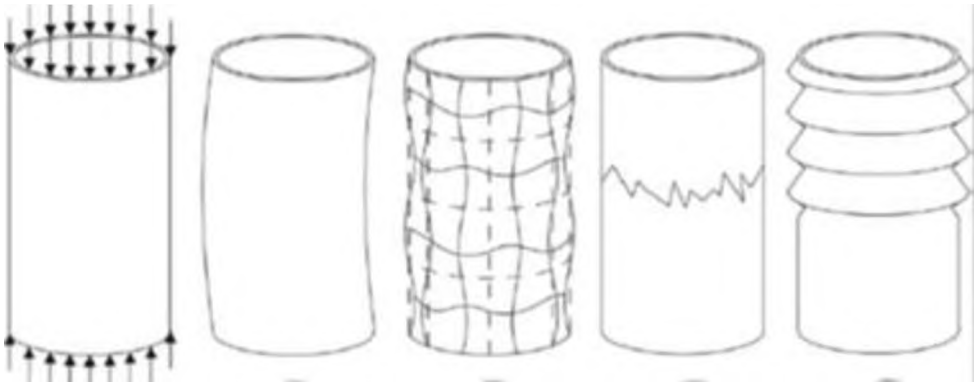
Deney, hazırlanan numunenin belirli sabit sıcaklıkta ve hızda sürekli olarak basma yüküne maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Elde edilen kuvvet-uzama eğrilerinden malzeme ile alakalı mekanik özellikleri tespit edilmektedir. Deney cihazının görünümü Resim 3.1'deki gibidir.



Resim 3.1. Statik basma deneyi cihazı

3.2.2. Eksenel kuvvet sonucu oluşan hasar modları

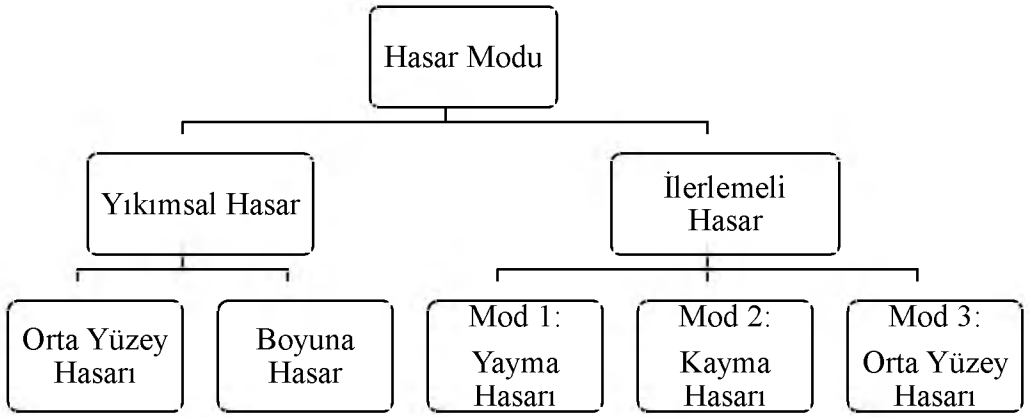
Kompozit malzemelerde eksenel basma sonucu 4 farklı kırılma mekanizması oluşmaktadır. Bunlar genel burkulma, bölgesel burkulma, kırılma (çatlama) ve ilerleyen kırılmadır (Lau ve ark., 2012). Kompozit malzemelerde oluşan kırılma mekanizmaları Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerdeki kırılma mekanizmaları (Lau ve ark., 2012)

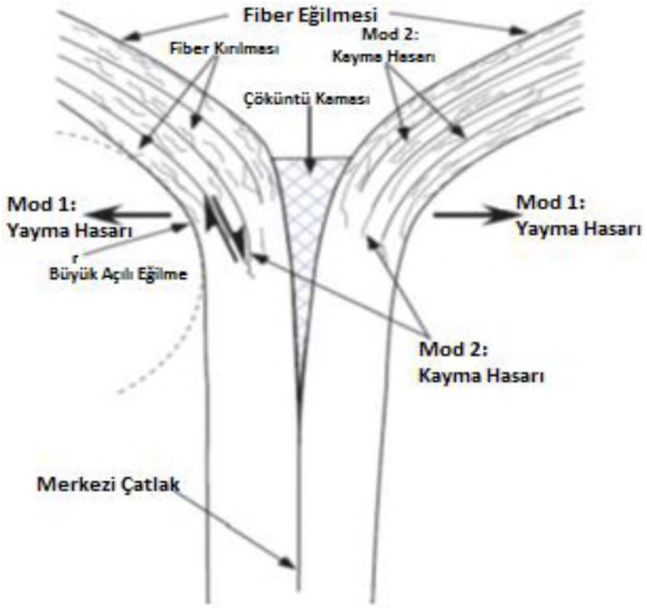
Bu kırılma türleri cam elyaf kompozit malzemede temel olarak iki farklı hasar modu oluşturmaktadır. Bunlar; yıkımsal (catastrophic) hasar ve ilerlemeli (progressive) hasardır. Yıkımsal hasar modu kendi içerisinde 2 farklı moda ayrılmaktadır. Bunlar; orta yüzey çatlakları ve boyuna çatlamadır. İlerlemeli hasar modu ise 3 farklı moda ayrılmaktadır. Bunlar ise yayma, kayma ve orta yüzey çatlağıdır. Yıkımsal hasarlar matris ve takviye elemanı boyunca oluşmaktadır. İlerlemeli hasar ise matristeki kırılmalardan ve tabakalar arasındaki ayrılmalar sonucu oluşmaktadır. Hasar modlarını Çizelge 3.2'deki gibi sınıflandırılabilir.

Çizelge 3.2. Kompozit malzemelerde oluşan hasar modları (Cerit, 2011; Lau ve ark., 2012; Gemi, 2014)



Hasar modlarının oluşumunda kompozit malzemenin, matris malzemesinin, takviye elemanının, elyaf örgü açılarının ve numune geometrisinin önemli rolü vardır. Yıkımsal hasar ve ilerlemeli hasar birbirine zıt durumlardır. Yıkımsal hasar genel burkulma sonucu oluşmaktadır. Yıkımsal hasarda oluşan orta yüzey çatlamaları ve boyuna çatlamada kuvvet en yüksek seviyedeyken hasar oluşmaktadır. Ancak bu ani kırılma sonucu malzeme daha fazla kuvveti taşıyamaya bilmektedir. Bu yüzden absorbe edebileceği enerji miktarı da düşük olmaktadır (Cerit, 2011; Lau ve ark., 2012). İlerlemeli hasar ise bölgesel burkulmalar sonucu oluşmaktadır. Oluşan bu burkulmalar sonucu ortaya çıkan hasarlar 3 şekilde meydana gelmektedir. Bunlardan silindirik veya kare profil kompozitlerde oluşan hasar modları, Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarlarıdır. Mod3 (orta yüzey) hasarı ise eliptiklik oranı 2,0 olan eliptik geometrideki parçalarda oluşmaktadır (Mahdi ve ark., 2004). Mod1 hasarı,

kuvvet uygulanan kompozit profilin matris ve takviye fazının ana çatlaktan kırılarak iki yana doğru yayılmasını ifade etmektedir. Mod2 ise takviye malzemesinin tabakalarının arasındaki kaymadan dolayı meydana gelmektedir. Mod1 ve Mod2 hasarında oluşan enerji absorbsiyonu Mod3 hasarında oluşan enerji absorbsiyonundan daha fazla olmaktadır (Cerit, 2011; Lau ve ark., 2012). Bunun nedeni bölgesel burkulma sonucu oluşan yayma ve kayma hasarının matris ve takviye elemanında yavaş bir kırılma oluşturmasıdır. Böylece enerji absorbsiyonu parça boyunca devam edebilir. Silindirik veya kare profillerde oluşan ilerlemeli hasar modları Şekil 3.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Hasar modlarının şematik görünümü (Lau ve ark., 2012)

3.3. Basma Dayanımının Sayısal Analizleri

Enerji sönümleyici elemanların basma enerjisi karşısında nasıl bir performans gösterdiklerini belirleyebilmek amacıyla bazı hesaplamalar yapılabilmektedir. Ayrıca enerji sönümlemesinin yanı sıra çarpışma anında meydana gelen çarpışma kuvvetleri de çok büyük önem taşımaktadırlar. Enerji sönümleyici bir elemanın yüksek miktarlarda enerji sönümü yaparken bunun yanı sıra çarpışma kuvvetinin de çok yüksek olmaması gerekmektedir.

3.3.1. Toplam enerji sönümleme

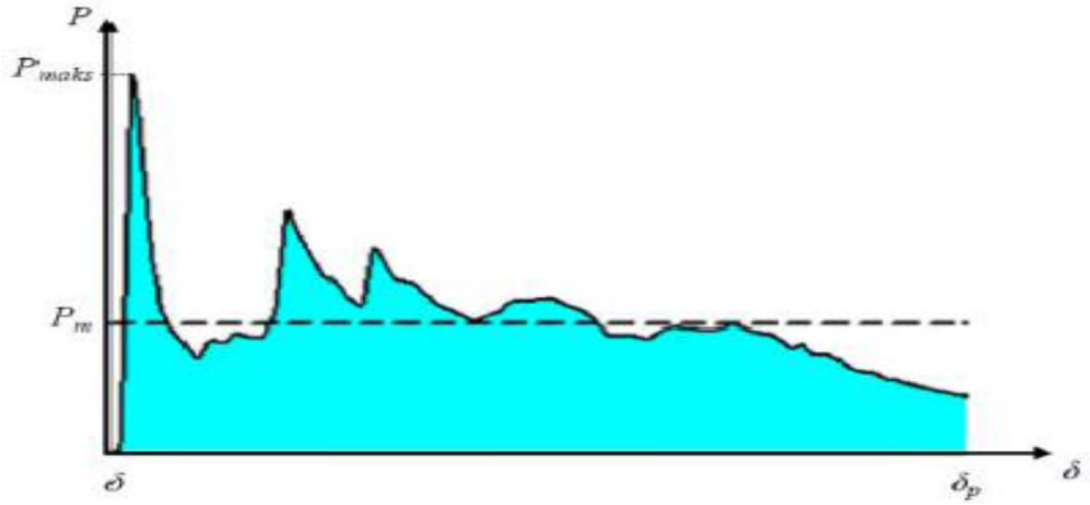
Bir enerji sönümleyici tarafından absorbe edilen toplam enerji tokluk diye adlandırılır ve deneysel olarak çarpışma kuvvetinin yaptığı iş olarak tanımlanabilmektedir. Malzemenin sönümleyebildiği toplam enerji birimi kJ cinsinden yazılmaktadır. Toplam enerji sönümlemesi aşağıdaki formülle ifade edilebilmektedir (Şahin, 2011).

$$E_{emilen} = \int P d\delta \tag{3.1}$$

Burada P eksenel doğrultudaki çarpışma kuvveti ve δ ise eksenel doğrultuda meydana gelen çarpışma mesafesini ifade etmektedir. Tokluk (toplam enerji sönümlemesi), enerji sönümleyiciler için elde edilen kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan ile temsil edilmektedir. Yukarıdaki denklemdeki enerji integrali, ortalama çarpışma kuvveti ve çarpışma miktarı kullanılarak aşağıdaki denklem yazılabilmektedir (Jin ve Altenhof, 2007).

$$E_{emilen} = \int_{\delta_P}^{\delta} P_m d\delta = P_m(\delta - \delta_P) \tag{3.2}$$

Burada P_m ortalama çarpışma kuvvetini δ ve δ_P ise yapılan işin hesaplanacağı çarpışma aralığını ifade etmektedir. Yukarıdaki denklemdeki integral ifadesi, sönümlenen enerjinin kuvvet-yer değiştirme grafiğinin altında kalan alan ile bulunabileceğini göstermektedir. Örnek bir kuvvet-yer değiştirme grafiği Şekil 3.3'teki gibi görülebilir.



Şekil 3.3. Basma etkisinde kuvvet-yer değiştirme grafiği (Cerit, 2011)

3.3.2. Maksimum çarpışma kuvveti

Maksimum çarpışma kuvveti (P_{max}) Şekil 3.3'te gösterildiği gibi, çarpışma esnasında enerji sönümleyici üzerinde eksenel doğrultuda meydana gelecek maksimum kuvvet değeridir. Maksimum çarpışma kuvveti olabildiğince düşük tutulmalı ve ortalama çarpışma kuvvetine yakın olmalıdır.

3.3.3. Ortalama çarpışma kuvveti

Ortalama çarpışma kuvveti (P_m), toplam sönümlenen enerjinin (E_{emilen}) toplam yer değiştirmeye (δ_t) bölünmesi ile elde edilebilmektedir. Ortalama çarpışma kuvveti aşağıdaki gibi formülize edilebilmektedir (Cerit, 2011).

$$P_m = E_{emilen}/\delta_t \tag{3.3}$$

3.3.4. Çarpışma kuvveti verimi

Çarpışma kuvveti verimini, ortalama çarpışma kuvvetinin maksimum çarpışma kuvvetine oranı olarak tanımlanabilmektedir. Bu verimin yüksek olması, yüksek enerji sönümü ve düşük maksimum kuvvete bağlı olarak enerji sönümlemesinin

verimli bir şekilde gerçekleştiği anlamına gelmektedir. Çarpışma kuvveti verimini aşağıdaki denklemde gösterebilmektedir (Jin ve Altenhof, 2007).

$$Verim = P_m/P_{max} \tag{3.4}$$

3.3.5. Özgül enerji sönümlemesi

Enerji sönümleyen malzemenin birim kütlesinin sönümlediği enerji miktarı olarak tanımlanmaktadır. Özgül enerji sönümlemesi, toplam sönümlenen enerjinin enerji sönümleyicinin kütlesine bölünmesiyle elde edilir ve aşağıdaki denklemdeki gibi gösterilebilmektedir (Jin ve Altenhof, 2007).

$$E_{\text{özgül}} = E_{emilen}/m \tag{3.5}$$

m harfi ile gösterilen terim enerji sönümleyicinin kütlesini ifade etmektedir. Her ne kadar bir enerji sönümleyici eleman için önemli olan enerji sönümleme değeri toplam enerji sönümlemesine eşit olsa da toplam malzeme ağırlığının önemli ve kritik olduğu uygulamalarda özgül enerji sönümleme değeri de göz önünde bulundurulmalıdır.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Deney Numunelerinin Üretimi

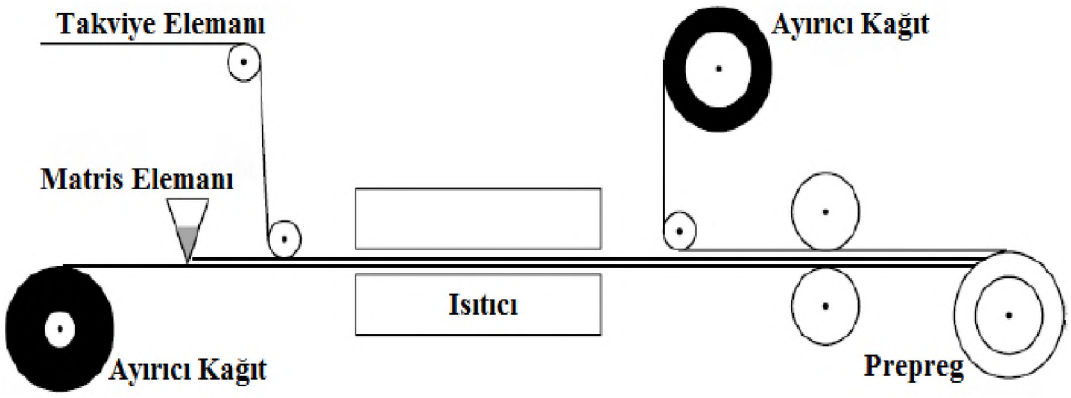
Kompozit boruların üretiminde prepreg haldeki cam elyaf malzeme kullanılmıştır. "Prepreg" kelimesi "pre-impregnated" yani ön emdirilmiş sözcüğünün kısaltılmış halini ifade eder. Yani prepreg haldeki malzemeler önceden reçine emdirilmiş liflerden oluşmaktadır. Reçinelendirilmiş lifler reçinenin türüne ve özelliğine göre jelleşme süresine kadar kürleştirilmektedirler. Bu proseste reçine tam olarak kürleştirilmez, yanlızca lifleri bir arada tutacak kadar kürleştirme yapılmaktadır (Ercan, 2006; Demirel, 2007; Işık, 2008). Hazırlanan matris malzemesi üzerine takviye lifleri farklı doğrultularda ve örgü tiplerinde serilebilmektedir. Kompozit malzemelerde yapılabilecek örgü tipleri Resim 4.1'deki gibi gösterilebilir.



a b c d

Resim 4.1. Kompozit malzemelerdeki örgü tipleri a. Elyaf tek eksenli 0^0, b. Elyaf iki eksenli 0^0 / 90^0, c. Elyaf üç eksenli 0^0 / 90^0 / -45^0, d. Elyaf dört eksenli 0^0 / 90^0 / -45^0 / 45^0 (Anonim, 2014)

Hazırlanan prepreg malzemenin altı ve üstü ayırıcı (koruyucu) kağıtla gergin bir şekilde kaplanmaktadır. Bu kağıt prepreg malzemeye yapışmaz ancak malzemenin havayla temasını engellemektedir. Ayırıcı kağıtla kaplanan prepreg malzeme rulo halinde sarılarak daha sonra kullanıma hazır hale getirilmektedir (Ercan, 2006; Acar, 2013). Prepreg hazırlama prosesi Şekil 4.1'deki gibi görülebilmektedir.



Şekil 4.1. Prepreg hazırlama cihazının şematik görünümü (Acar, 2013)

Hazırlanıp rulo halinde sarılan prepreg oda sıcaklığında kullanıma hazırdır. Ancak prepreg malzeme düşük sıcaklıklarda daha fazla sertleşebilir ve kullanıma uygun olmayabilir. Düşük sıcaklıklarda sert bir haldeyken şekillendirilen prepreg malzeme tamamen kürlenip sertleştikten sonra çatlak oluşumuna sebep olabilmektedir (Ercan, 2006; Demirel, 2007).

Tez çalışmasında kullanılan kompozit borular Fibermak Mühendislik Makine Kalıp Kompozit Sanayi ve Ticaret Ltd. Şti. firmasında üretilmiştir. Üretim sürecinin her bölümü bizzat izlenip kontrol edilmiştir.

Çalışmada kullanılmak üzere üretilen kompozit boruların geometrik özellikleri Çizelge 4.1'de gösterilmektedir. Üretilen tüm boruların (tüplerin) üretim prosesleri aynı şekilde olmaktadır. Yanlızca kullanılmış olan kalıplar, boruların geometrisine ve iç çap veya kenar uzunluğu değerlerine göre değiştirilmektedir.

Çizelge 4.1. Kompozit boruların boyutları

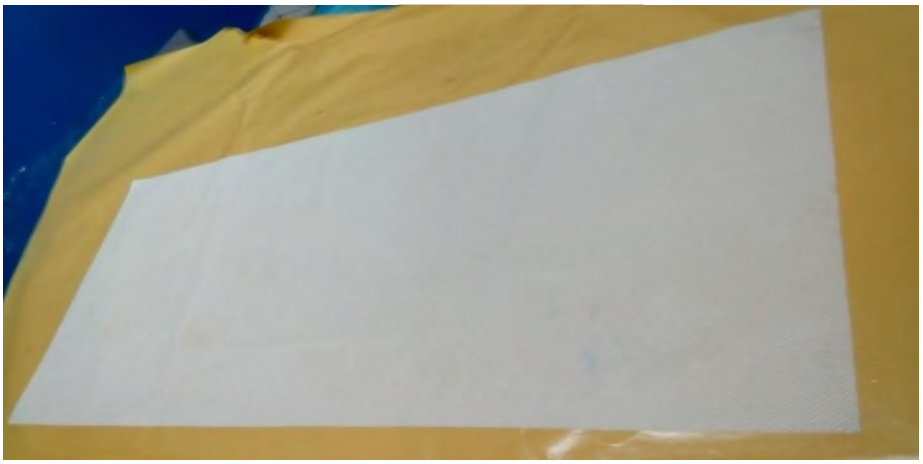
Ürün Adı	İç Çap	Dış Çap	Kalınlık	Uzunluk	Adet
Cam Elyaf Silindir Boru	20 mm.	24 mm.	2 mm.	100 mm.	20
Cam Elyaf Silindir Boru	40 mm.	44 mm.	2 mm.	100 mm.	20
Cam Elyaf Silindir Boru	60 mm.	64 mm.	2 mm.	100 mm.	20
Cam Elyaf Silindir Boru	20 mm.	24 mm.	2 mm.	150 mm.	20
Cam Elyaf Silindir Boru	40 mm.	44 mm.	2 mm.	150 mm.	20
Cam Elyaf Silindir Boru	60 mm.	64 mm.	2 mm.	150 mm.	20
	Kenar Uzunluğu				
Cam Elyaf Kare Boru	20 mm.		2 mm.	100 mm.	20
Cam Elyaf Kare Boru	40 mm.		2 mm.	100 mm.	20
Cam Elyaf Kare Boru	60 mm.		2 mm.	100 mm.	20
Cam Elyaf Kare Boru	20 mm.		2 mm.	150 mm.	20
Cam Elyaf Kare Boru	40 mm.		2 mm.	150 mm.	20
Cam Elyaf Kare Boru	60 mm.		2 mm.	150 mm.	20

Bu çalışmada cam elyaf kompozit malzemelerde matris malzemesi olarak F-1564 Epoksi malzemesi ve takviye elemanı olarak WR6 600 Teks 0^0 - 90^0 dokuma E-camı 300 gr/m^2 cam elyaf malzemesi kullanılmıştır. Kullanılan takviye elemanı, E-camı filament elyaflardan dokunmuş özellikle ileri kompozit imalatlarında kullanılan, epoksi uyumlu, çok kolay emme kabiliyeti olan, yüksek nitelikli dokuma kumaştır. Özellikle havacılık, modelcilik, IHA, drone, otomotiv için ideal bir üründür. Kullanılmış olan prepreg cam elyafın kalınlığı yaklaşık olarak 0,25 – 0,3 mm'dir (Anonim, 2015). Kullanılan matris ve takviye elemana ait mekanik özellikleri Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Malzemelerin mekanik özellikleri(Anonim, 2015)

	Elastisite Modülü (E)	Çekme Mukavemeti ($\sigma_{çekme}$)	Yüzde Uzama (ε)	Yoğunluk (ρ)
Matris Malzemesi	3,3 GPa	80 MPa	% 4	1,1 g/cm^3
Takviye Malzemesi	81,5 GPa	2300 MPa	% 2,97	2,6 – 2,7 g/cm^3

Üretimde kullanılan prepreg cam elyafı Resim 4.2'de görülmektedir. Şekillenebilmesi için gerekli sıcaklığa ve esnekliğe ulaşan prepreg malzeme, ayırıcı kağıtlarından arındırılır ve yapışmaz silikonlu kağıt zemin üzerine düzgün bir şekilde serilerek hazır hale getirilmektedir.



Resim 4.2. Cam elyaf prepreg malzeme

Çalışmada kullanılan kompozit borular (tüpler) Wrap sarım (elle sarma) yöntemiyle üretilmiştir. Bunun için öncelikli olarak boruların iç çapına göre silindirik ve kare profil kalıplar (modüller) hazırlanmıştır. Üretimde kullanılan bu kalıpların dış yüzeyine her kullanımdan önce ayırıcı malzeme uygulanmıştır. Bu çalışmada 770 NC kalıp ayırıcı malzemesi kullanılmıştır. Seçilen kalıp ayırıcı malzemesi kullanılacak olan Epoksi reçinenin kürlenme derecesine göre seçilmelidir. Böylelikle üretilen malzemenin kalıp yüzeyine yapışmayıp zarar görmeden kolayca ayrılması hedeflenmiştir. Prepreg haldeki cam elyaf kompozit malzeme, boru iç geometrisine bağlı olarak hazırlanan kalıba sarılmıştır. Prepreg malzemenin Wrap yöntemiyle kalıba kaplanmış haldeki görüntüsü Resim 4.3'te görülmektedir.



Resim 4.3. Prepreg malzemenin kalıba sarılmış hali

Kalıba sarılan prepreg uzunluğu borunun dış çapının ve kalınlığının belirlenmesini sağlamaktadır. İstenilen dış çapın ve kalınlığın sağlanması için sarılması gereken prepreg uzunluğu aşağıdaki gibi hesaplanabilmektedir. Gerekli prepreg uzunluğunu hesaplarken kullanılacak temel terimler aşağıdaki gibi açıklanabilmektedir.

- d: Numune çapı,
- A: Kalıbın çevresine bir turda sarılan prepreg uzunluğu,
- n: Kalıp etrafında dönmesi gereken prepreg turu,
- z: Kalınlık,
- L: Sarılması gereken toplam prepreg uzunluğu.

$$d_{ort} = (d_{iç} + d_{dış})/2 \tag{4.1}$$

$$A_{ort} = \pi \, x \, d_{ort} \tag{4.2}$$

$$n = z_{istenen}/z_{prepreg} \tag{4.3}$$

$$L = A_{ort} \, x \, n \tag{4.4}$$

İstenilen çap ve kalınlıkta bir kompozit boru üretimi için gerekli prepreg uzunluğu hesabının bir örneği Ek-1'de verilmiştir.

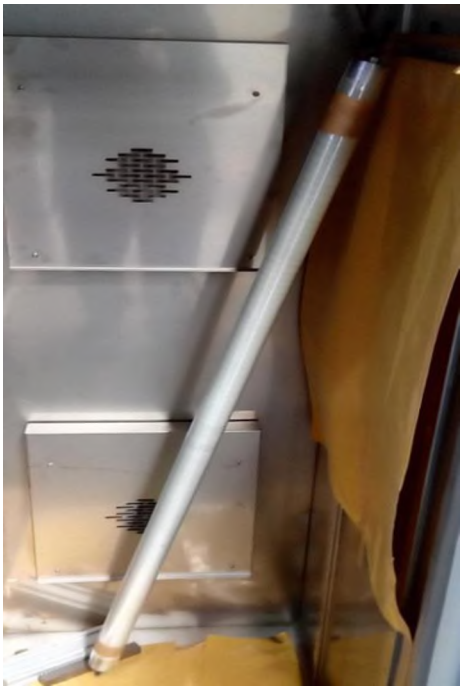
Kalıba sarılan cam elyaf prepreg malzemenin dışı kürleme işleminden önce Shrink Tape ile kaplanmıştır. Bu kaplama işlemi kürleme sırasında kompozit malzemenin rijit bir şekilde kalmasını sağlamaktadır. Bunun yanı sıra kürlemeden çıkan malzemenin yüzey pürüzlülüğünün en aza indirilmesi konusunda da etkili bir sonuç vermektedir. Sarılan Shrink Tape malzemesi şeffaf görünümlü ve yapışkan olmayan bir malzemedir. Bu malzeme kalıba sarılmış prepreg malzemenin üzerine her yerinde eşit gerilmede ve sıklıkta sarılmıştır. Kullanılmış olan Shrink Tape malzemesi ve kalıbın üzerindeki görüntüsü Resim 4.4'te görülmektedir.



a b

Resim 4.4. Shrink Tape malzemesi ve kalıbın üzerindeki görüntüsü a. Shrink Tape, b. Shrink Tape'in kompozit boru üzerine uygulanmış görüntüsü

Kalıp üzerine sarıldıktan sonra Shrink Tape ile kaplanan kompozit malzeme kürlenmesi için fırına yerleştirilmiştir. Bu işlem epoksi (matris) malzemesinin kürlenme sıcaklığı özelliğine göre belirlenmektedir. Çalışmada kullanılan epoksi 125^0C'deki fırında 75-80 dakika bekletilmiş ve fırının tekrar oda sıcaklığına dönmesiyle kürlenmiştir. Malzemenin yapışma kabiliyetinin ve elastik özelliklerinin sağlanmasında kürleme işlemi önemli bir yer tutmaktadır. Fırına yerleştirilen kompozit borunun görüntüsü Resim 4.5'te görülmektedir.



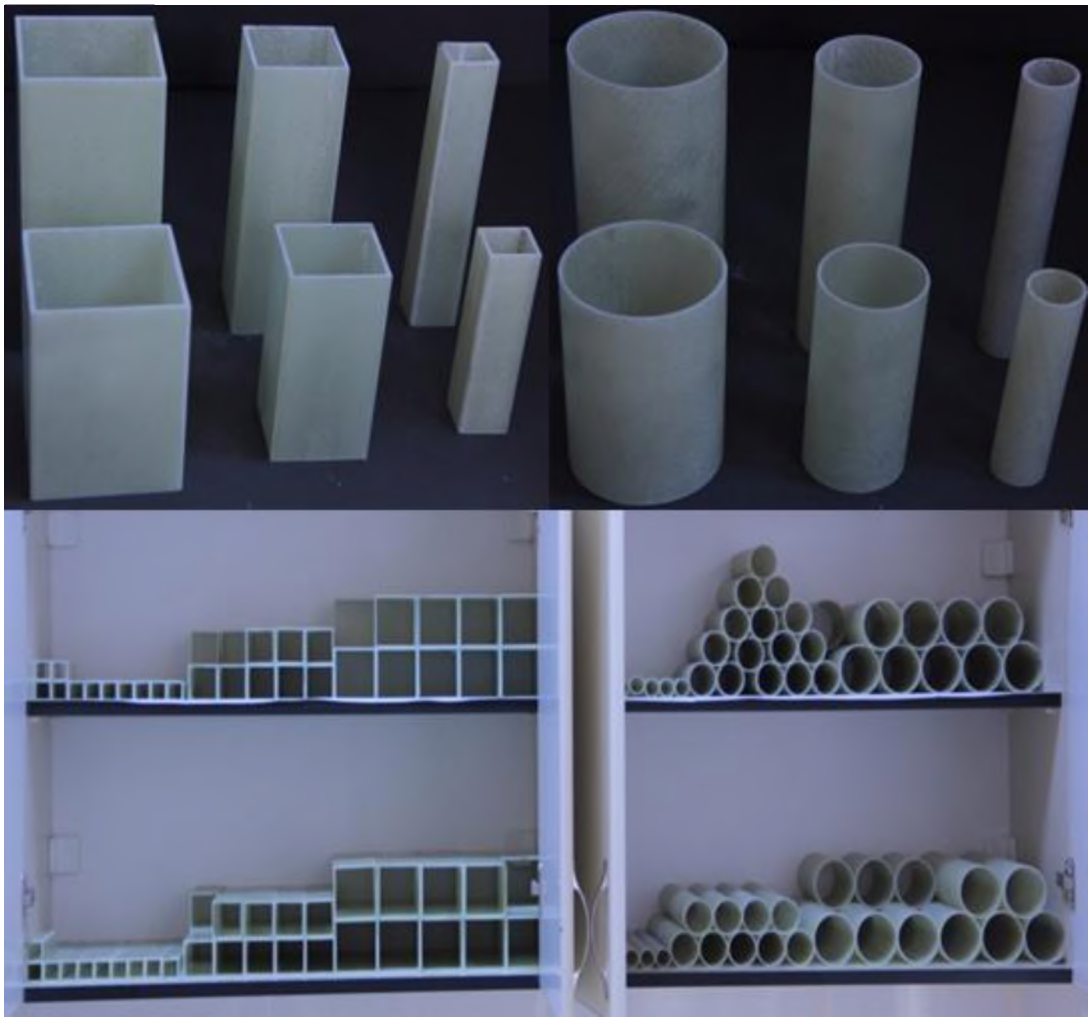
Resim 4.5. Kompozit borunun fırınlanma görüntüsü

Gerekli şartlarda kürlenmesi tamamlanan kompozit boru fırından çıkarılmış ve dışarıda soğuması beklenmiştir. Oda sıcaklığına gelen malzemenin üzerinden Shrink Tape kesilerek ayrılmış ve üzeri yumuşak bir bezle temizlenmiştir. Kompozit borunun istenilen boyutlarda kesilmesinden önce borunun dış boyutlarının istenilen değere geldiği kontrol edilmelidir. Eğer bu değer istenilen dış boyut özelliklerinden az ise borunun üzerine tekrar prepreg malzeme kaplanması ve aynı üretim proseslerinin uygulanması gereklidir. Ancak, bu değer istenilen dış boyut özelliklerinden fazla ise ince bir taşlama işlemi uygulanarak malzemenin kalınlığı ve dış boyut özelliği istenilen değerlere getirilebilir. Tüm boyutlar istenilen değerlere ulaştığında kalıp kompozit borunun içerisinden çekerek çıkarılmıştır. Bu işlemden sonra boru istenilen ölçülerde kesilerek kullanılabilecek hale getirilmiştir. Kompozit borunun içerisinden kalıp çıkarıldıktan sonraki görüntüsü Resim 4.6'da görülmektedir.



Resim 4.6. Kalıptan çıkarılan cam elyaf kompozit boru

Çalışmada kullanılmak üzere üretilen farklı geometri ve boyutlardaki tüm cam elyaf kompozit boruların görüntüsü Resim 4.7'de görülmektedir.



Resim 4.7. Çalışmada kullanılan tüm numune resimleri

4.2. Deney Metodolojisi

Hazırlanan E-camı cam elyaf numunelere eksenel statik basma deneyi uygulanmıştır. Deneylerde kompozit borular deney cihazına eksenel olarak yerleştirilmiş ve kuvvetin eksenel yönde uygulanması sağlanmıştır. Statik basma deneyinde, deney sıcaklığı sabit oda sıcaklığıdır (25^0C) ve deney hızı 5 mm/dakika olarak ayarlanmıştır. Numunelerde yıkımsal hata olduğunda deney hemen durdurulmuştur. Ancak ilerlemeli hata oluştuğu sürece deney 75 mm. uzunluk boyunca devam ettirilmiş ve bu değerler hesaplanmıştır. Uygulanan tüm deneylerle alakalı deney planı Çizelge 4.3'te verilmiştir.

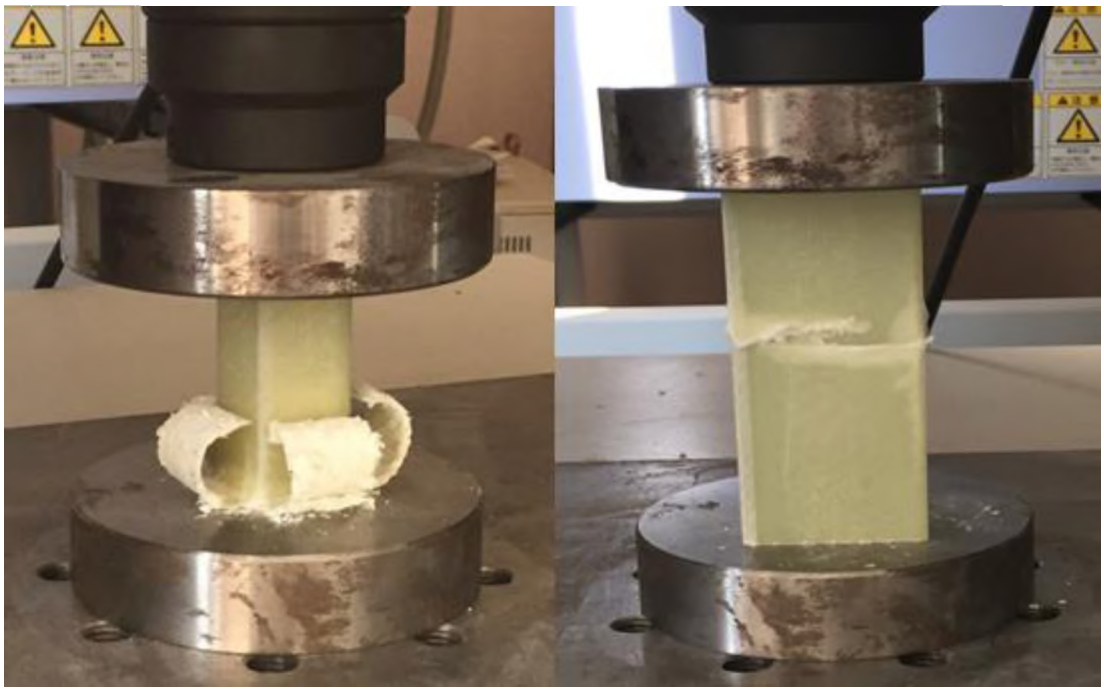
Çizelge 4.3. Deney planı

Deney No	Numune Geometrisi	Numune Uzunluğu (mm)	Numune İç Çapı (mm)	Numune Dış Çapı (mm)	Numune Kalınlığı (mm)	Statik Basma Deneyi Hızı (mm/dk)
1	Silindir	100	20	24	2	5
2	Silindir	100	40	44	2	5
3	Silindir	100	60	64	2	5
4	Silindir	150	20	24	2	5
5	Silindir	150	40	44	2	5
6	Silindir	150	60	64	2	5
7	Kare Profil	100	20	24	2	5
8	Kare Profil	100	40	44	2	5
9	Kare Profil	100	60	64	2	5
10	Kare Profil	150	20	24	2	5
11	Kare Profil	150	40	44	2	5
12	Kare Profil	150	60	64	2	5

5. DENEYSEL SONUÇLAR

5.1. Statik Basma Dayanımı

Statik basma deneyleri, Hitit Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesindeki SHIMADZU AUTOGRAPH AG-IS 100 kN statik basma-çekme cihazında uygulanmıştır. Uygulanan deneylerin sonucunda tüm geometrilerin statik basma dayanımlarıyla alakalı sonuçlar, deney öncesi ve sonrasındaki hallerinin resimleri ve kuvvet-uzama eğrileri şeklinde verilmiştir. Deney sonucunda oluşan temel hasar modları Resim 5.1'de görülmektedir.



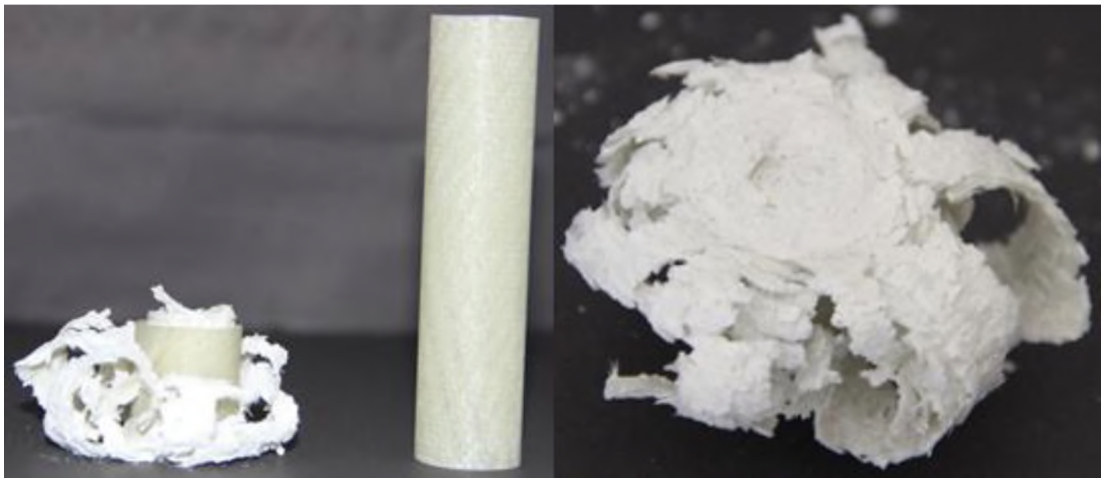
a b

Resim 5.1. Hasar modlarının görünümü a. İlerlemeli hasar, b. Yıkımsal hasar

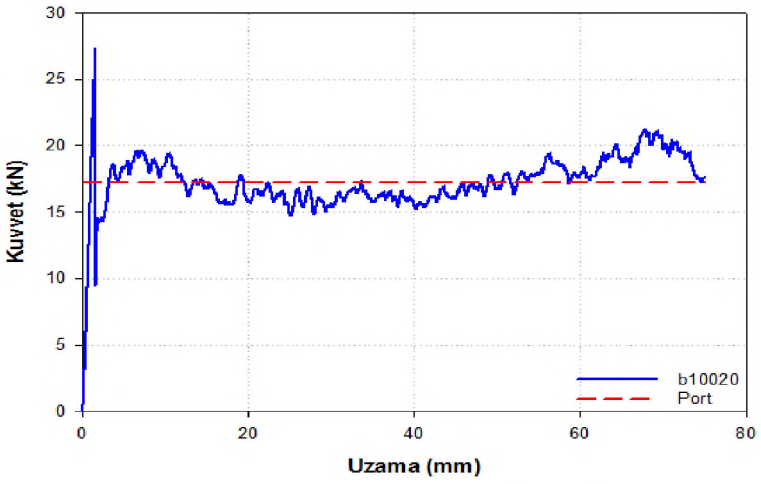
Deneyleri uygulanan numunelerin sonuçları, en küçük geometriden başlanarak sıralanmıştır. Benzer geometrilerin sonuçları aynı grafikte karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Ayrıca deneylerin sonucunda elde edilen maksimum enerji absorbsiyonları, toplam enerji absorbsiyonları ve özgül enerji absorbsiyonları değerleri de her bir numunede ayrı ayrı ve tüm numuneler için aynı grafikte olmak üzere karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

5.1.1. Silindirik profillerin statik basma dayanımı

Boyu 100 mm. çapı 20 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.2'de ve Şekil 5.1'de görülmektedir.



Resim 5.2. Boyu 100 mm. çapı 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri

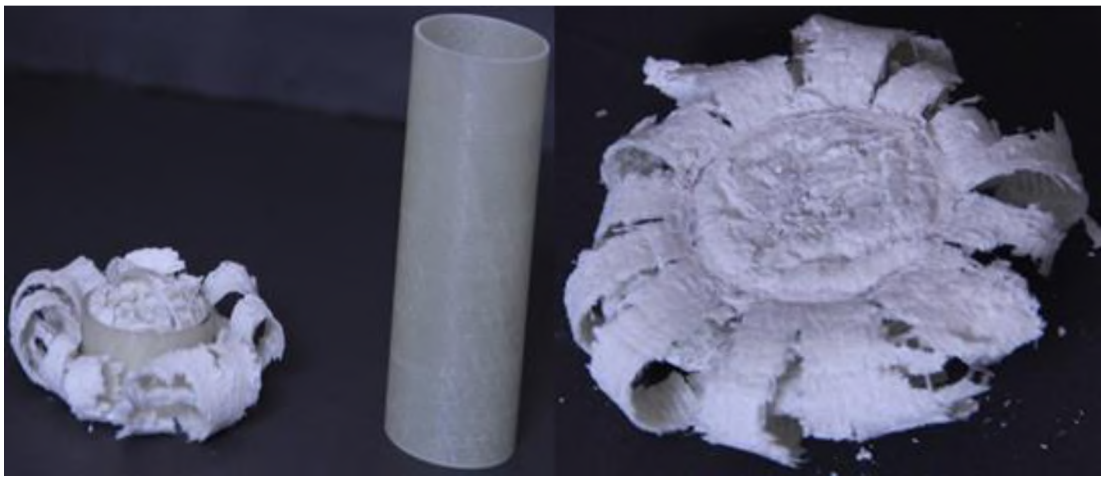


Şekil 5.1. Boyu 100mm. çapı 20mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

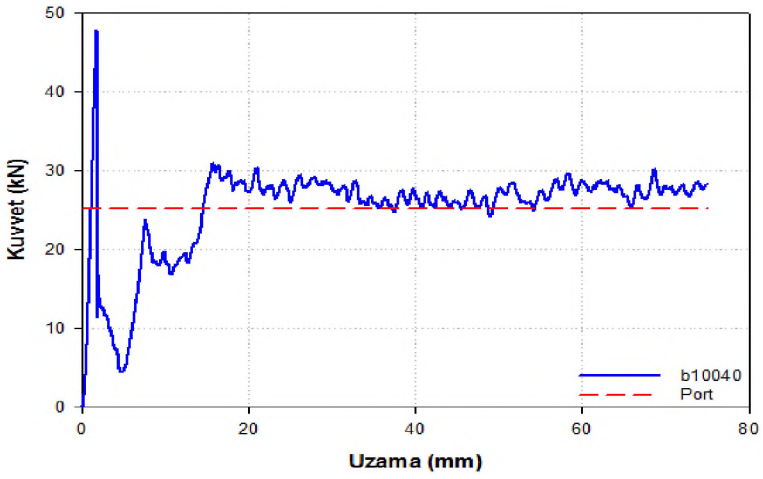
Boyu 100 mm. çapı 20 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 27,33 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı

ortalama kuvvet ise 17,27 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 1295,1 J olmuştur.

Boyu 100 mm. çapı 40 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.3'te ve Şekil 5.2'de görülmektedir.



Resim 5.3. Boyu 100 mm. çapı 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri

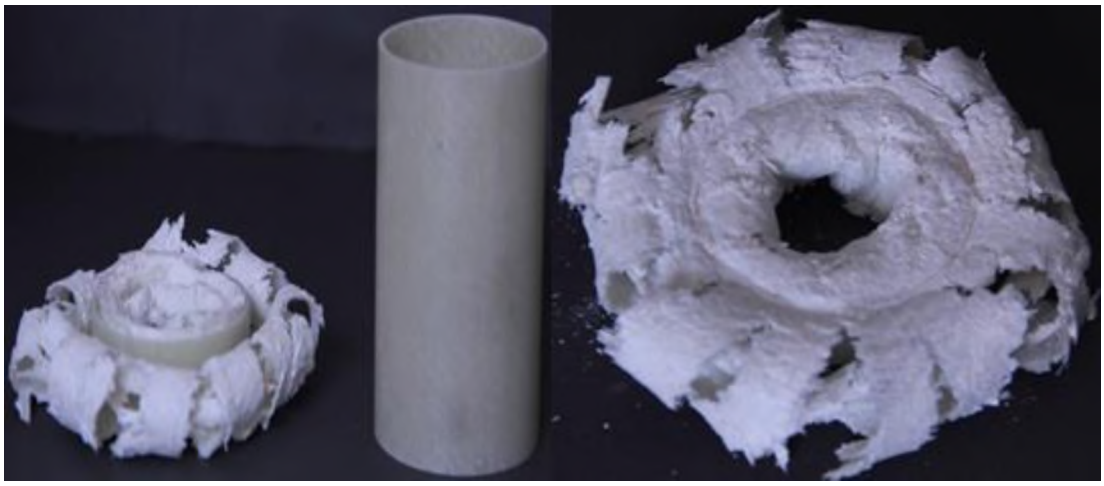


Şekil 5.2. Boyu 100mm. çapı 40mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

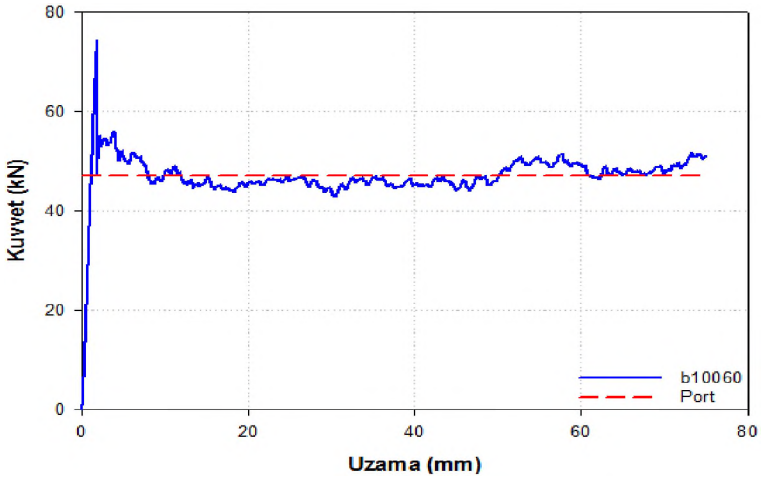
Boyu 100 mm. çapı 40 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda,

numune maksimum 47,89 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 25,17kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 1887,8 J olmuştur.

Boyu 100 mm. çapı 60 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.4'te ve Şekil 5.3'te görülmektedir.



Resim 5.4. Boyu 100 mm. çapı 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri

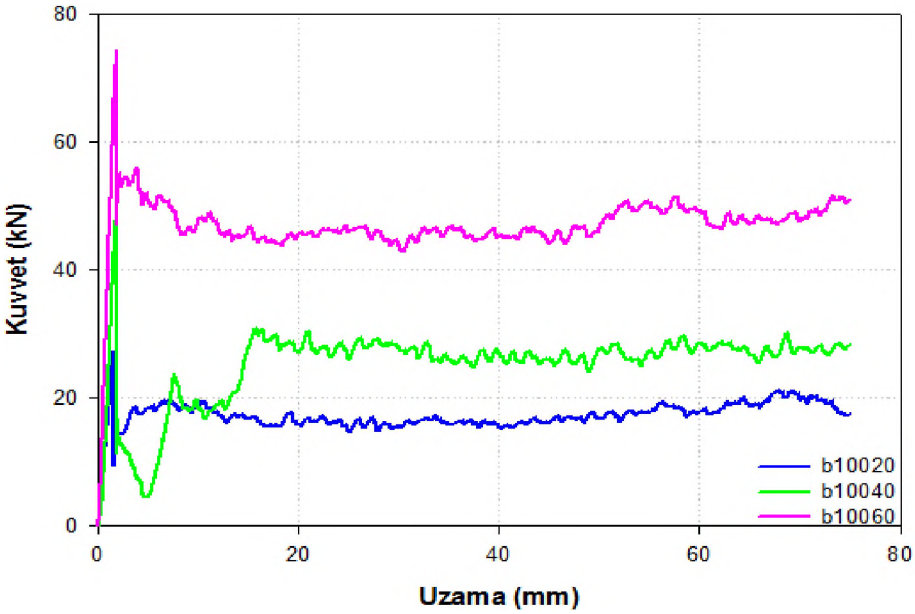


Şekil 5.3. Boyu 100 mm. çapı 60 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 100 mm. çapı 60 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından

olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 74,09 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 47,07 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 3530,1 J olmuştur.

Boyu 100 mm. uzunluğunda olan silindirik geometrideki tüm numuneler için karşılaştırılmalı statik basma deneyi sonucu grafiğini Şekil 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.4. Boyu 100 mm. olan silindirik numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği

Şekil 5.4'teki karşılaştırılmalı grafikten göründüğü üzere boyu 100 mm. olan silindirik numunelerde çapın artması sonucu maksimum kuvvet, ortalama kuvvet, ve toplam enerji absorbsiyonu değerleri de artmıştır.

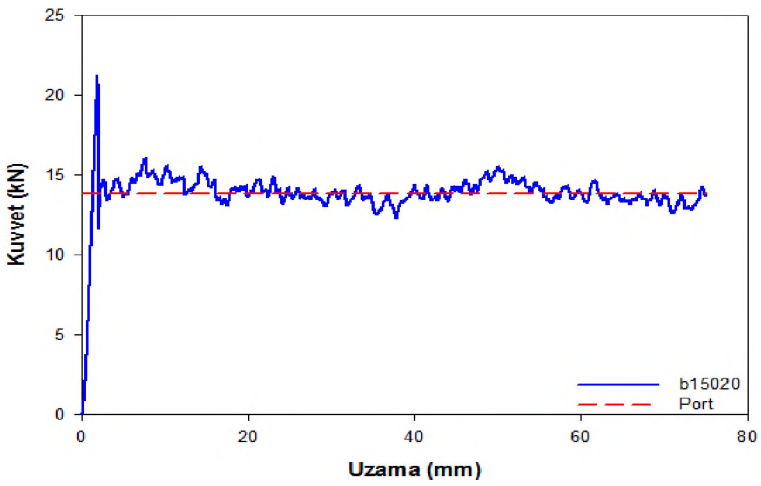
20 mm. çapındaki numune referans alındığında, çap %100 artıp 40 mm. olduğunda maksimum kuvvet %75, ortalama kuvvet %45 ve toplam enerji absorbsiyonu %46 oranında artmıştır. Çap %200 artıp 60 mm. olduğunda ise maksimum kuvvet %171, ortalama kuvvet %172 ve toplam enerji absorbsiyonu %173 oranında artmıştır.

40 mm. çapındaki numune referans alındığında, çap %50 artıp 60 mm. olduğunda maksimum kuvvet %55, ortalama kuvvet %87 ve toplam enerji absorbsiyonu %87 oranında artmıştır.

Boyu 150 mm. çapı 20 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.5 ve Şekil 5.5'te görülmektedir.



Resim 5.5. Boyu 150 mm. çapı 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri

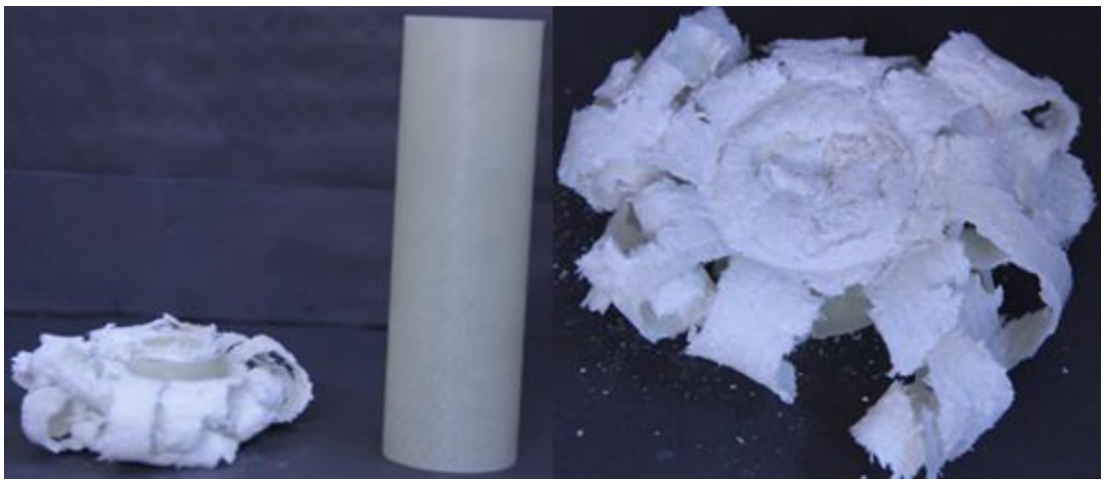


Şekil 5.5. Boyu 150 mm. çapı 20 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

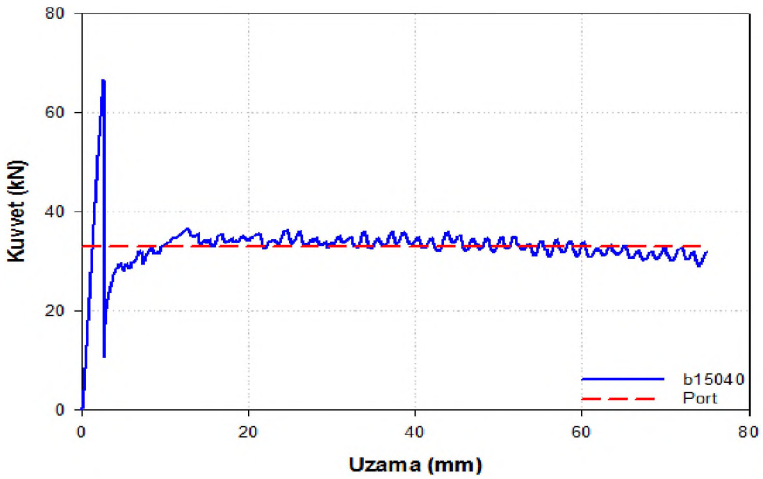
Boyu 150 mm. çapı 20 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından

olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 21,29 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 13,86 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 1039,4 J olmuştur.

Boyu 150 mm. çapı 40 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.6 ve Şekil 5.6'da görülmektedir.



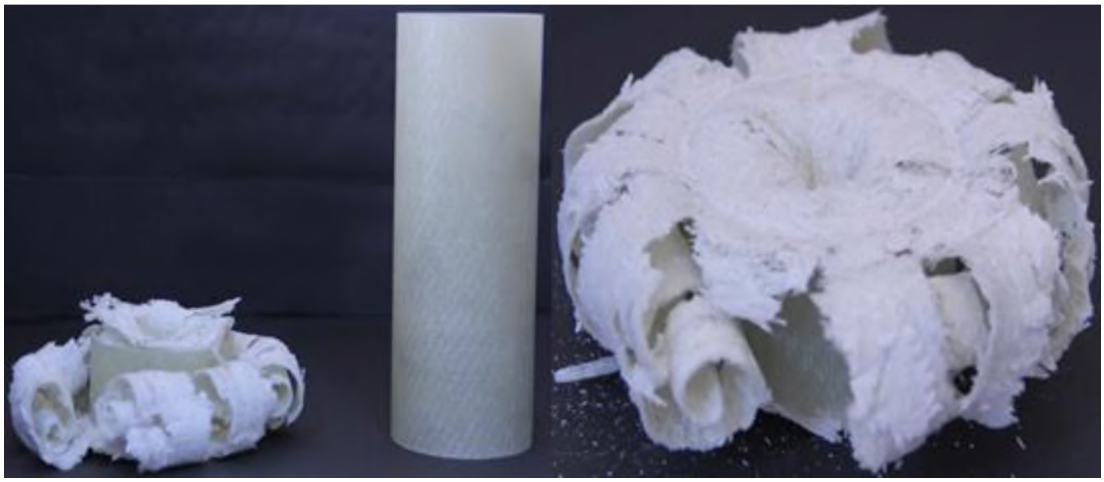
Resim 5.6. Boyu 150 mm. çapı 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



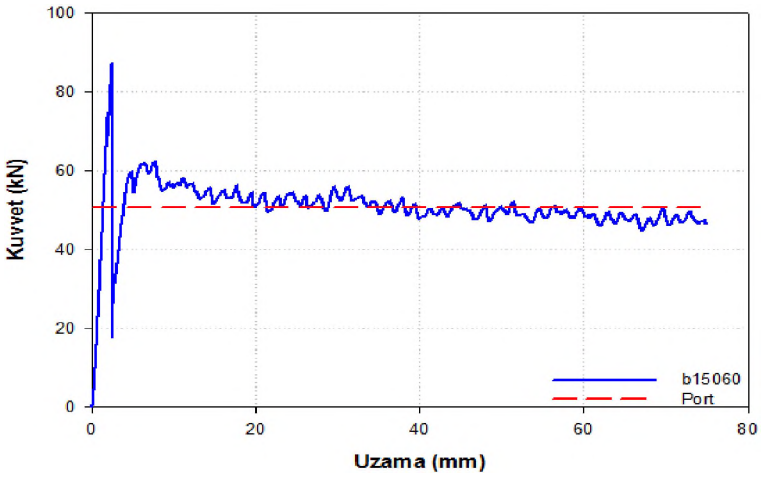
Şekil 5.6. Boyu 150 mm. çapı 40 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 150 mm. çapı 40 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 66,54 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 32,93 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 2470 J olmuştur.

Boyu 150 mm. çapı 60 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.7 ve Şekil 5.7'de görülmektedir.



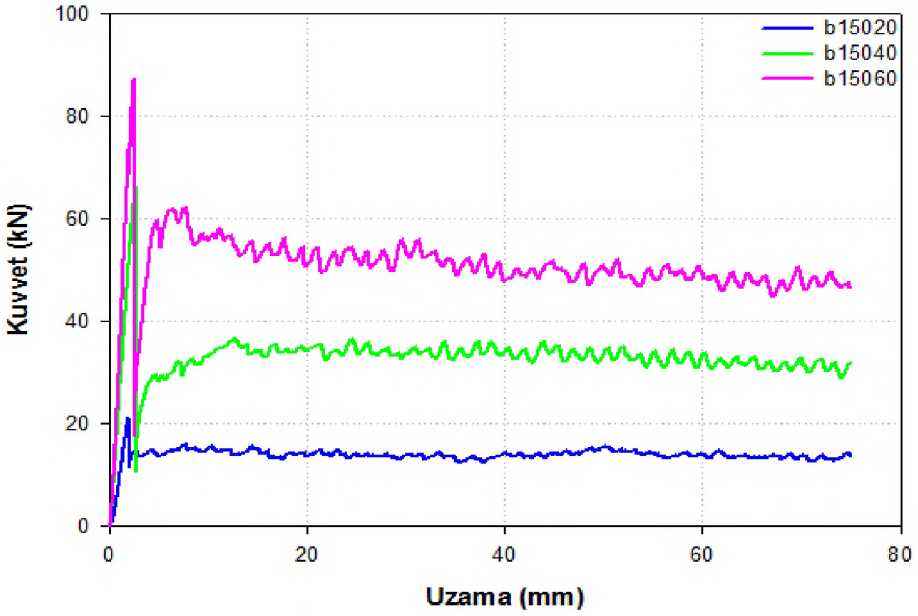
Resim 5.7. Boyu 150 mm. çapı 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



Şekil 5.7. Boyu 150 mm. çapı 60 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 150 mm. çapı 60 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 87,29 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 50,7 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 3802,9 J olmuştur.

Boyu 150 mm. uzunluğunda olan silindirik geometrideki tüm numuneler için karşılaştırılmalı statik basma deneyi sonucu grafiği Şekil 5.8'de görülmektedir.



Şekil 5.8. Boyu 150 mm. olan silindirik numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği

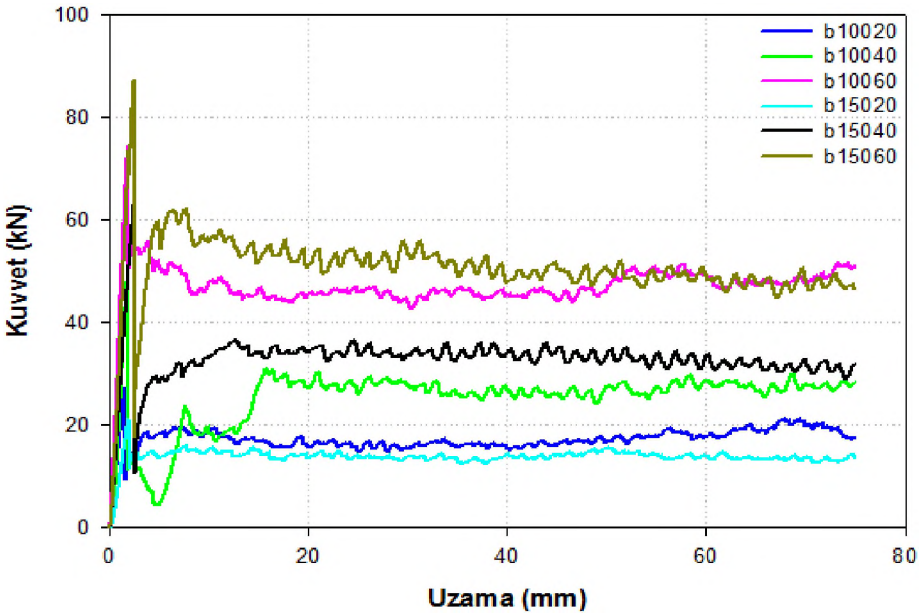
Şekil 5.8'deki karşılaştırılmalı grafikten göründüğü üzere boyu 150 mm. olan silindirik numunelerde çapın artması sonucu maksimum enerji absorbsiyonu ve toplam enerji absorbsiyonu değerleri de artmıştır.

20 mm. çapındaki numune referans alındığında, çap %100 artıp 40 mm. olduğunda maksimum kuvvet %212, ortalama kuvvet %137 ve toplam enerji absorbsiyonu %138 oranında artmıştır. Çap %200 artıp 60 mm. olduğunda ise maksimum kuvvet

%310, ortalama kuvvet %266 ve toplam enerji absorbsiyonu %266 oranında artmıştır.

40 mm. çapındaki numune referans alındığında, çap %50 artıp 60 mm. olduğunda maksimum kuvvet %32, ortalama kuvvet %54 ve toplam enerji absorbsiyonu %54 oranında artmıştır.

Tüm silindirik numunelerin statik basma deneyi sonuçlarını Şekil 5.9'daki grafikteki gibi karşılaştırabilmektedir.



Şekil 5.9.Tüm silindirik numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği

Şekil 5.9'daki grafikten göründüğü üzere boyu 100 mm. ve 150 mm. olan silindirik numunelerde çapın artması sonucu maksimum kuvvet, ortalama kuvvet ve toplam enerji absorbsiyonu değerleri de artmıştır. Bunun yanı sıra genelde numune boyunun uzaması sonucu da değerler artmıştır. Çapları aynı, uzunlukları farklı olan numuneler arasında da çeşitli karşılaştırmalar yapılabilir.

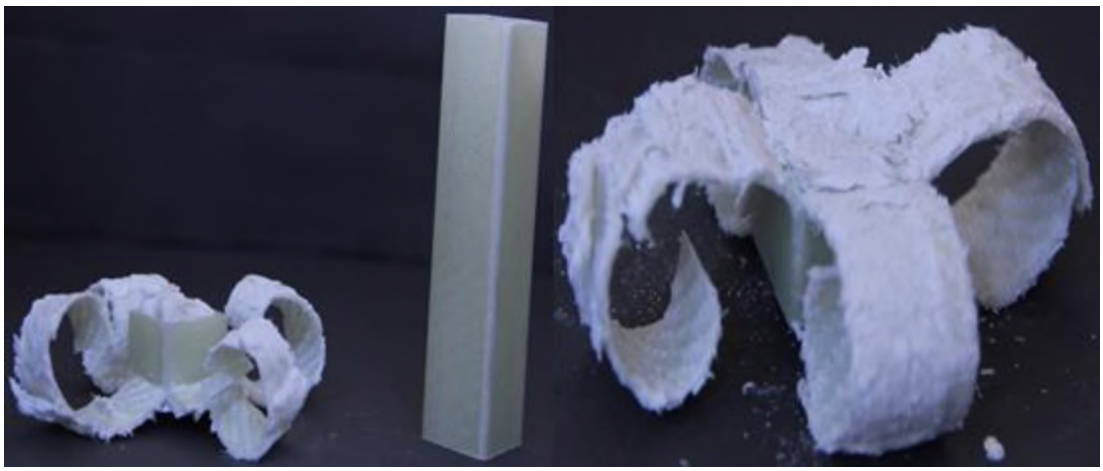
Çapı 20 mm. olan numunede boy %50 arttığında maksimum kuvvet %22, ortalama kuvvet %20 ve toplam enerji absorbsiyonu %20 oranında azalmıştır.

Çapı 40 mm. olan numunede boy %50 arttığında maksimum kuvvet %39, ortalama kuvvet %31 ve toplam enerji absorbsiyonu %31 oranında artmıştır.

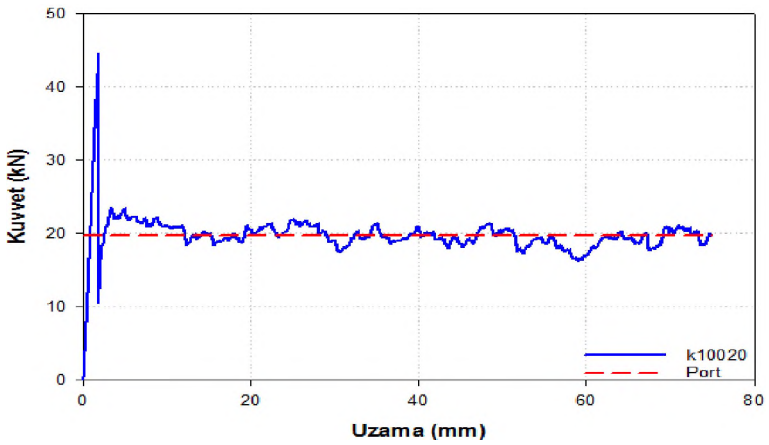
Çapı 60 mm. olan numunede boy %50 arttığında maksimum kuvvet %18, ortalama kuvvet %8 ve toplam enerji absorbsiyonu %8 oranında artmıştır.

5.1.2. Kare profillerin statik basma dayanımı

Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.8 ve Şekil 5.10'da görülmektedir.



Resim 5.8. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



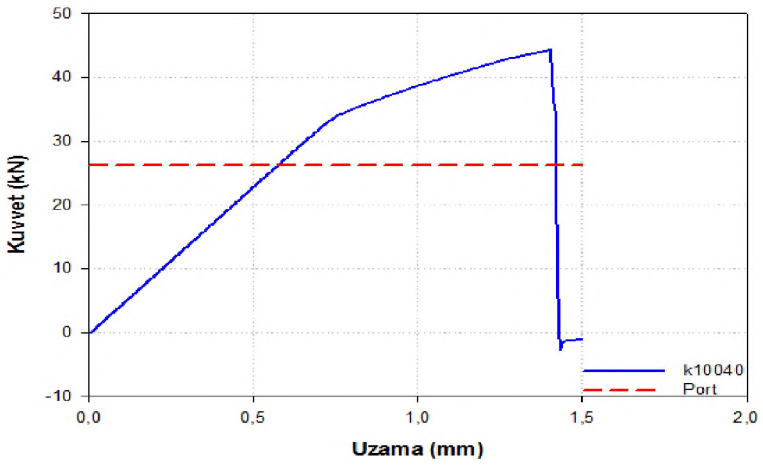
Şekil 5.10. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Ayrıca numunenin köşelerinde boyuna çatlamalar oluşmaktadır. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 44,64 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 19,79 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 1484,7 J olmuştur.

Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.9 ve Şekil 5.11'de görülmektedir.



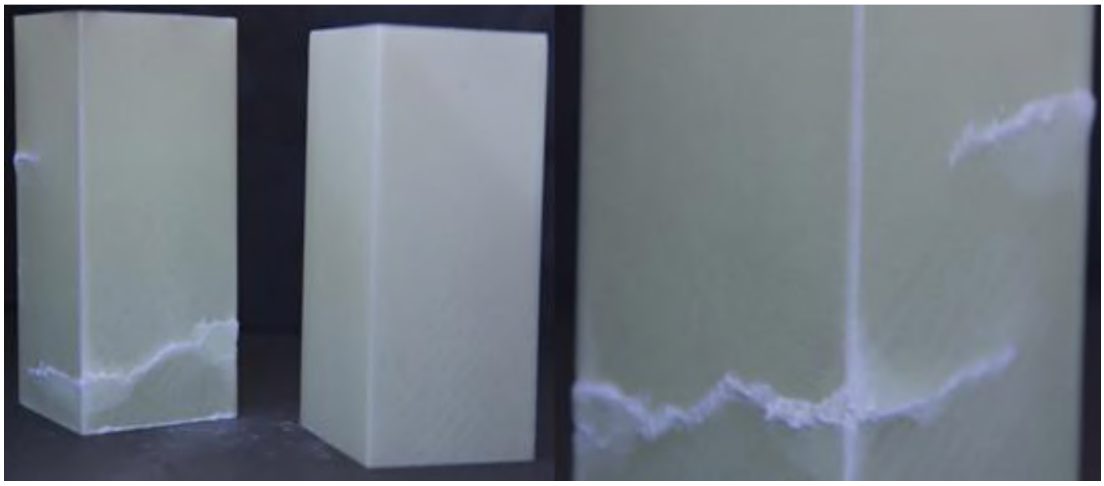
Resim 5.9. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



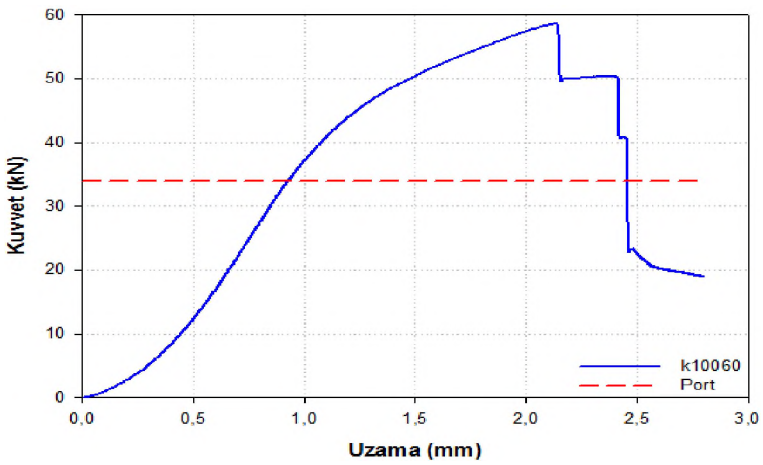
Şekil 5.11. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunede genel burkulmalar ve kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda yıkımsal hasar modlarından olan orta yüzey hasarı oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 44,26 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 26,21 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 38,85 J olmuştur.

Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.10 ve Şekil 5.12'de görülmektedir.



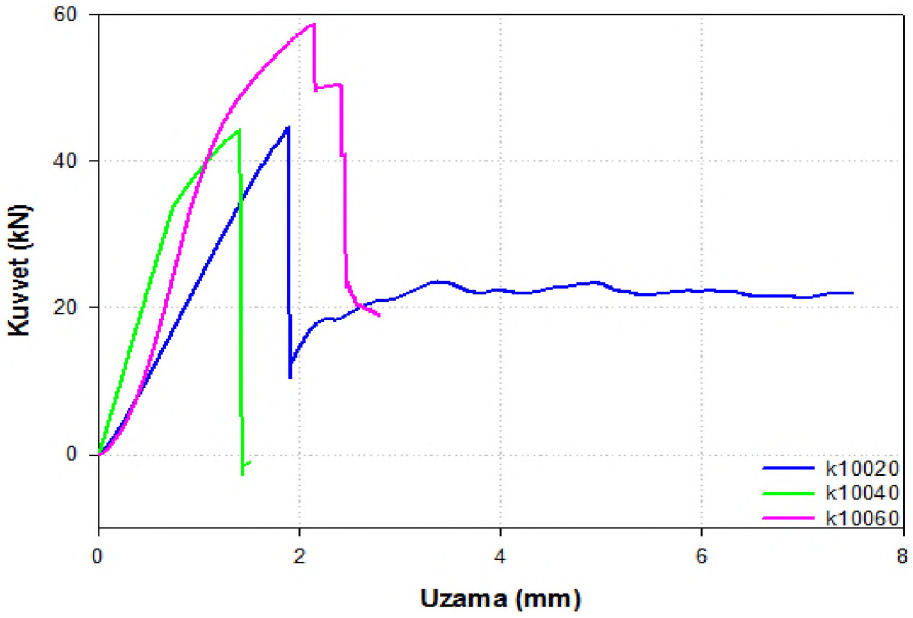
Resim 5.10. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



Şekil 5.12. Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 100 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunede genel burkulmalar ve kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda yıkımsal hasar modlarından olan orta yüzey hasarı oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 58,69 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 33,91 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 107,04 J olmuştur.

Boyu 100 mm. uzunluğunda olan kare profil geometrideki tüm numuneler için karşılaştırılmalı statik basma deneyi sonucu grafiği Şekil 5.13'de görülmektedir.



Şekil 5.13. Boyu 100 mm. olan kare profil numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği

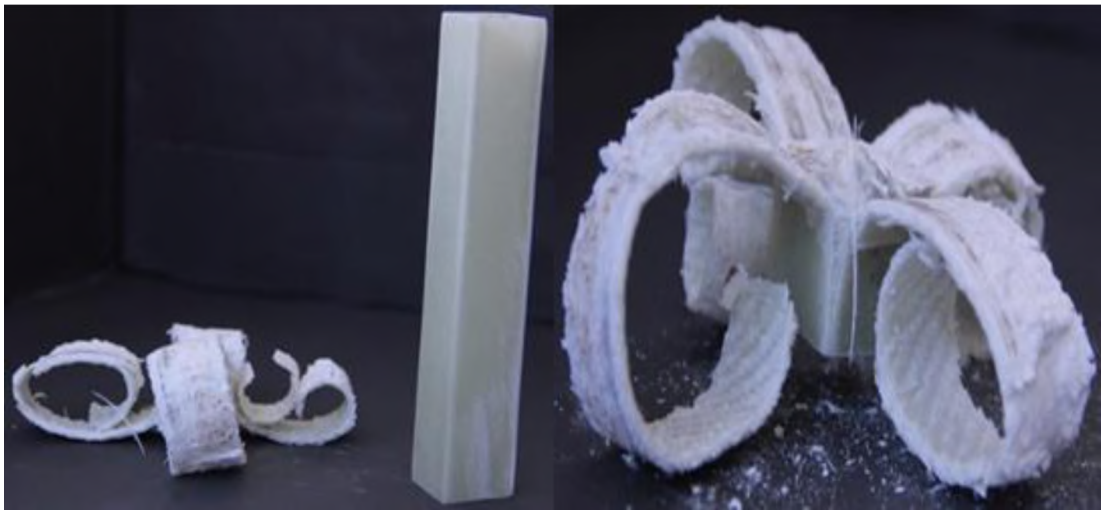
Şekil 5.13'deki karşılaştırılmalı grafikten göründüğü üzere boyu 100 mm. olan kare numunelerde yalnızca 20 mm.'lik en küçük kenar uzunluğundaki geometride ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Kenar uzunluğu 40 mm. ve 60 mm. olan numunelerde ise yıkımsal hasar modlarından olan orta yüzey hasarı oluşmuştur.

20 mm. kenar uzunluğundaki numune referans alındığında, kenar uzunluğu %100 artıp 40 mm. olduğunda ortalama kuvvet %32 artmış, maksimum kuvvet %1 ve toplam enerji absorbsiyonu %97 oranında azalmıştır. Çap %200 artıp 60 mm.

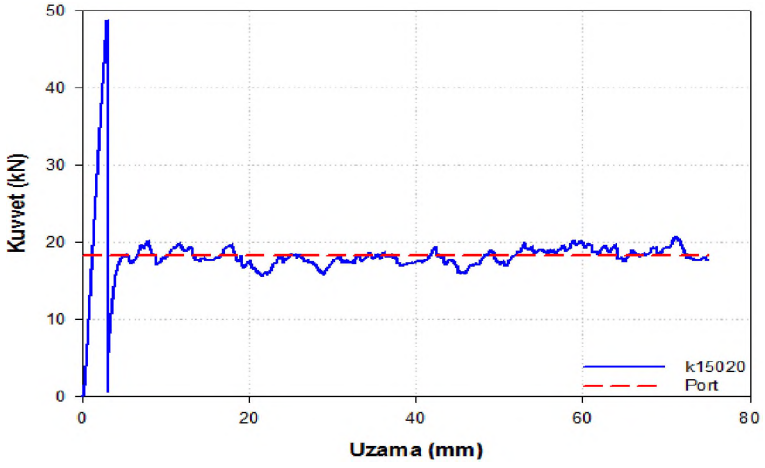
olduğunda ise ortalama kuvvet %71, maksimum kuvvet %31 artmış ve toplam enerji absorbsiyonu %93 oranında azalmıştır.

40 mm. kenar uzunluğundaki numune referans alındığında, kenar uzunluğu %50 artıp 60 mm. olduğunda maksimum kuvvet %33, ortalama kuvvet %30 ve toplam enerji absorbsiyonu %176 oranında artmıştır.

Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.11 ve Şekil 5.14'de görülmektedir.



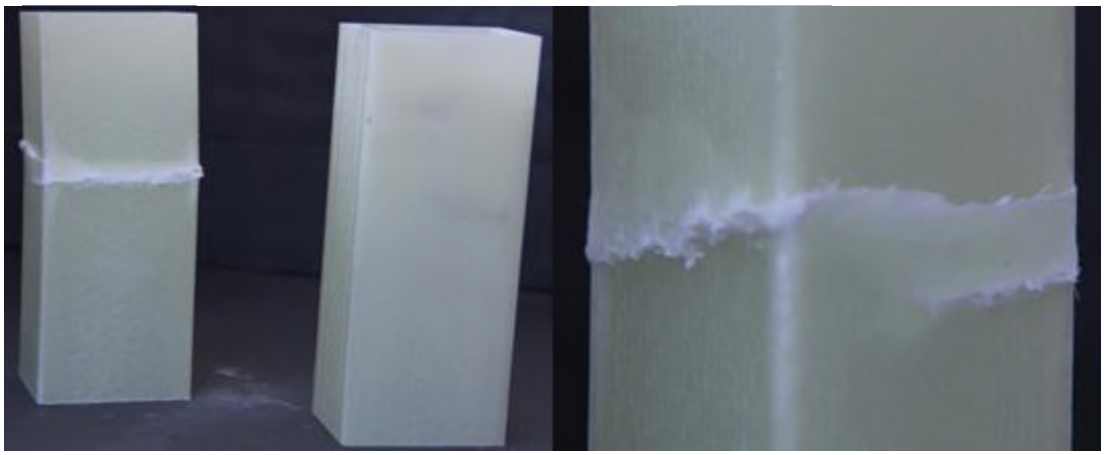
Resim 5.11. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



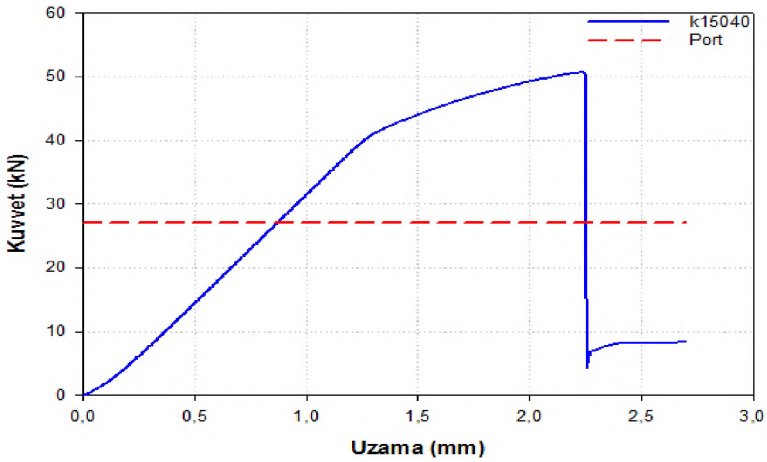
Şekil 5.14. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 20 mm. olan numunede bölgesel burkulmalar ve ilerleyen kırılmalar oluşmuştur. Ayrıca numunenin köşelerinde boyuna çatlamalar oluşmaktadır. Oluşan bu kırılmalar sonucunda ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 48,73 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 18,25 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 1368,9 J olmuştur.

Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.12 ve Şekil 5.15'de görülmektedir.



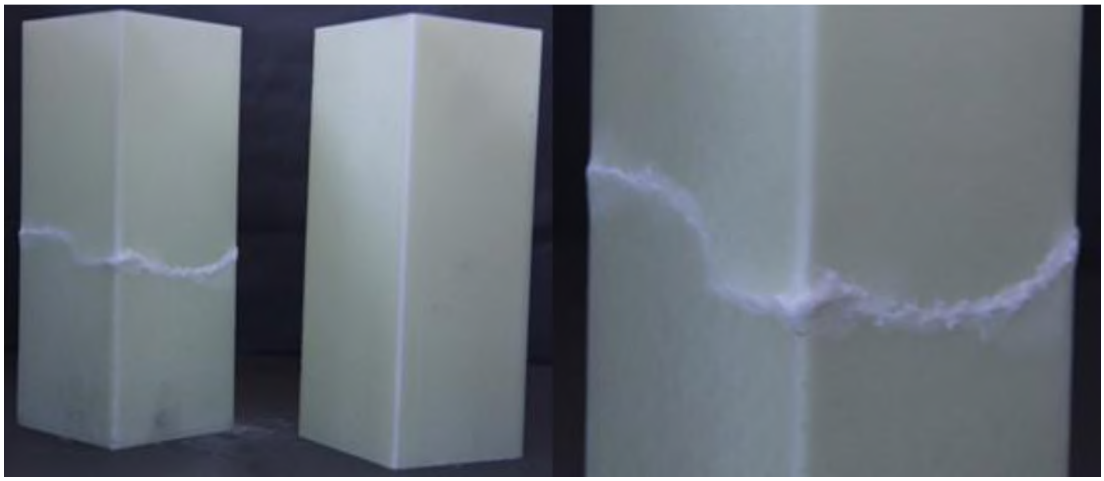
Resim 5.12. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



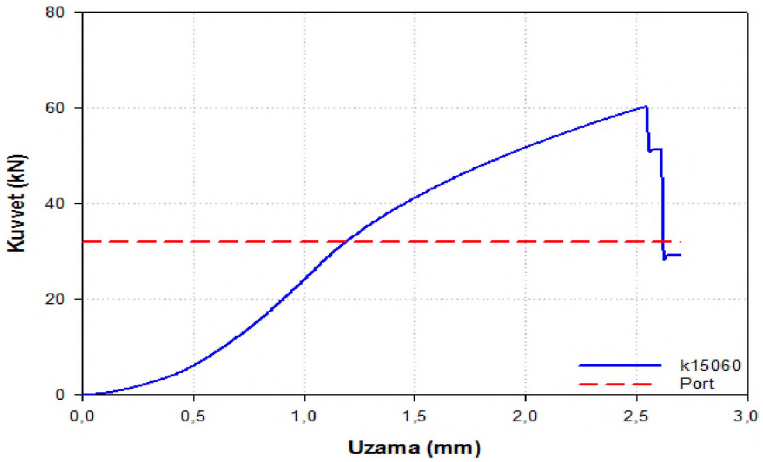
Şekil 5.15. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 40 mm. olan numunede genel burkulmalar ve kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda yıkımsal hasar modlarından olan orta yüzey hasarı oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 50,77 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 26,98 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 77,03 J olmuştur.

Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numune ile ilgili sonuçlar Resim 5.13 ve Şekil 5.16'da görülmektedir.



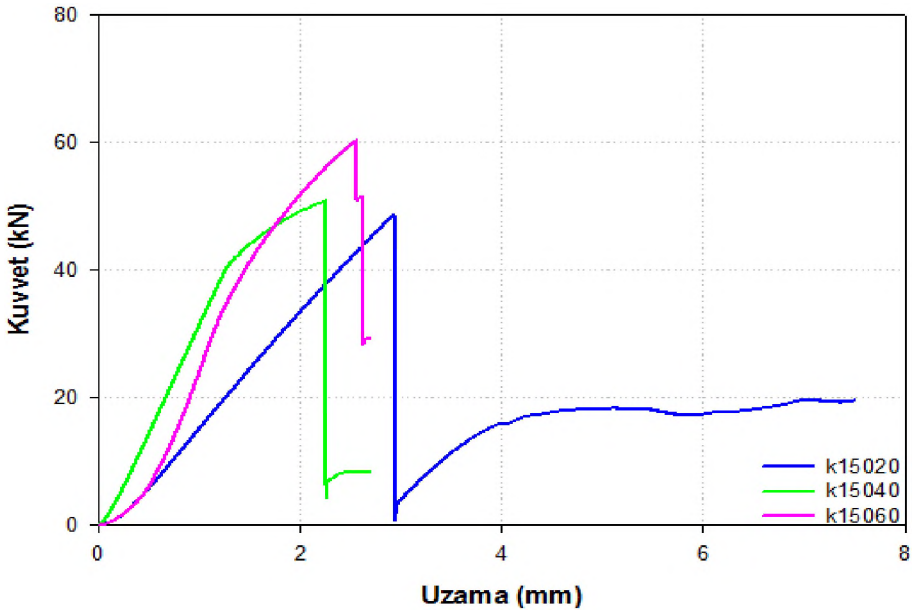
Resim 5.13. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin hasarsız ve hasarlı görüntüleri



Şekil 5.16. Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunenin statik basma deneyi sonucu grafiği

Boyu 150 mm. kenar uzunluğu 60 mm. olan numunede genel burkulmalar ve kırılmalar oluşmuştur. Oluşan bu kırılmalar sonucunda yıkımsal hasar modlarından olan orta yüzey hasarı oluşmuştur. Deney sonucunda, numune maksimum 60,31 kN kuvvet taşımıştır. Deney boyunca numunenin taşıdığı ortalama kuvvet ise 32,05 kN'dur. Numunenin deney süresi boyunca toplam enerji sönümlemesi 92,67 J olmuştur.

Boyu 150 mm. uzunluğunda olan kare profil geometrideki tüm numuneler için karşılaştırılmalı statik basma deneyi sonucu grafiği Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Boyu 150 mm. olan kare profil numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği

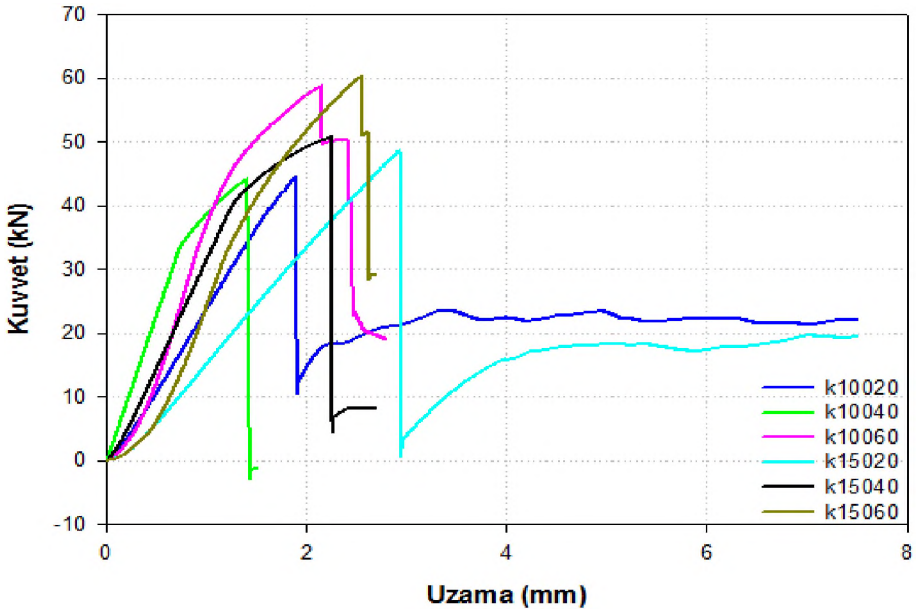
Şekil 5.17'deki karşılaştırılmalı grafikten göründüğü üzere boyu 150 mm. olan kare numunelerde yanlızca 20 mm.'lik en küçük kenar uzunluğundaki geometride ilerlemeli hasar modlarından olan Mod1 (yayma) ve Mod2 (kayma) hasarı birlikte oluşmuştur. Kenar uzunluğu 40 mm. ve 60 mm. olan numunelerde ise yıkımsal hasar modlarından olan orta yüzey hasarı oluşmuştur.

20 mm. kenar uzunluğundaki numune referans alındığında, kenar uzunluğu %100 artıp 40 mm. olduğunda ortalama kuvvet %48, maksimum kuvvet %4 artmış ve

toplam enerji absorbsiyonu %94 oranında azalmıştır. Çap %200 artıp 60 mm. olduğunda ise ortalama kuvvet %76, maksimum kuvvet %24 artmış ve toplam enerji absorbsiyonu %93 oranında azalmıştır.

40 mm. kenar uzunluğundaki numune referans alındığında, kenar uzunluğu %50 artıp 60 mm. olduğunda maksimum kuvvet %19, ortalama kuvvet %19 ve toplam enerji absorbsiyonu %20 oranında artmıştır.

Tüm kare profil numunelerin statik basma deneyi sonuçlarını Şekil 5.18'deki grafikteki gibi karşılaştırabilmektedir.



Şekil 5.18. Tüm kare profil numunelerin statik basma deneyi sonucu grafiği

Şekil 5.18'deki karşılaştırılmalı grafikten göründüğü üzere boyu 100 mm. ve 150 mm. olan kare numunelerde yanlızca kenar uzunluğu 20 mm. olan numunelerde yüksek enerji absorbsiyonu sağlanmıştır. Numune boyunun artması sonucu maksimum enerji absorbsiyonu değeri de artmıştır. Yıkımsal hasara uğrayan geometrilerde ise düzgün bir hasar gerçekleşmediğinden aralarında genel bir değerlendirme yapılamamıştır. Ancak kenar uzunlukları aynı, boyları farklı olan numuneler arasında çeşitli karşılaştırmalar yapılabilir.

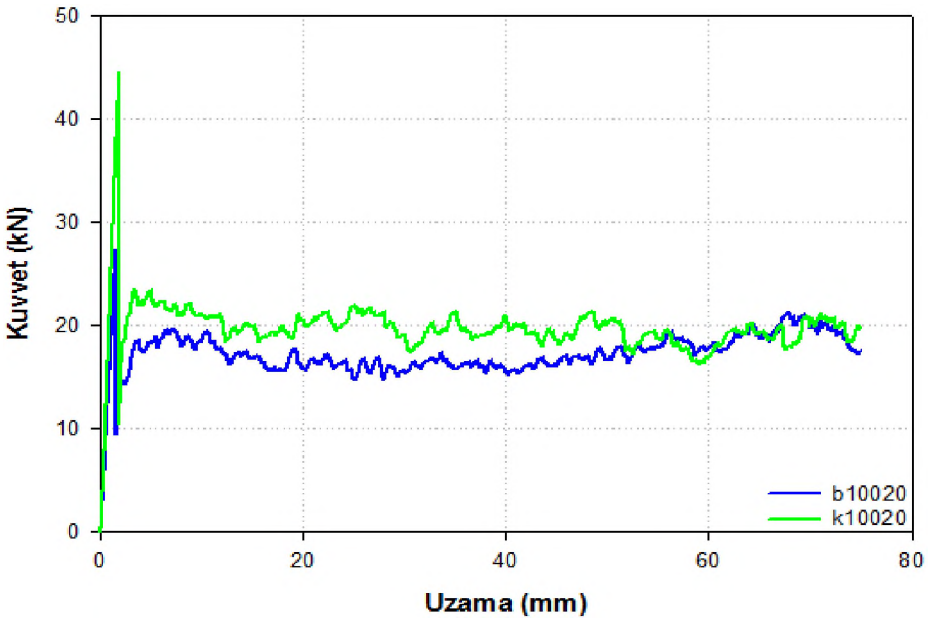
Kenar uzunluğu 20 mm. olan numunede boy %50 arttığında maksimum kuvvet %9 artmış, ortalama kuvvet %8 ve toplam enerji absorbsiyonu %8 oranında azalmıştır.

Kenar uzunluğu 40 mm. olan numunede boy %50 arttığında ortalama kuvvet %3 azalmış, maksimum kuvvet %15 ve toplam enerji absorbsiyonu %98 oranında artmıştır.

Kenar uzunluğu 60 mm. olan numunede boy %50 arttığında maksimum kuvvet %3 artmış, ortalama kuvvet %5 ve toplam enerji absorbsiyonu %13 oranında azalmıştır.

Boyları ve çapları veya kenar uzunlukları aynı olan silindirik ve kare profillere ait statik basma sonuçlarının grafiği aşağıda verilmiştir.

Boyu 100 mm. olan 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerin statik basma deneyi sonuçları Şekil 5.19'daki grafikteki gibi karşılaştırılabilmektedir.

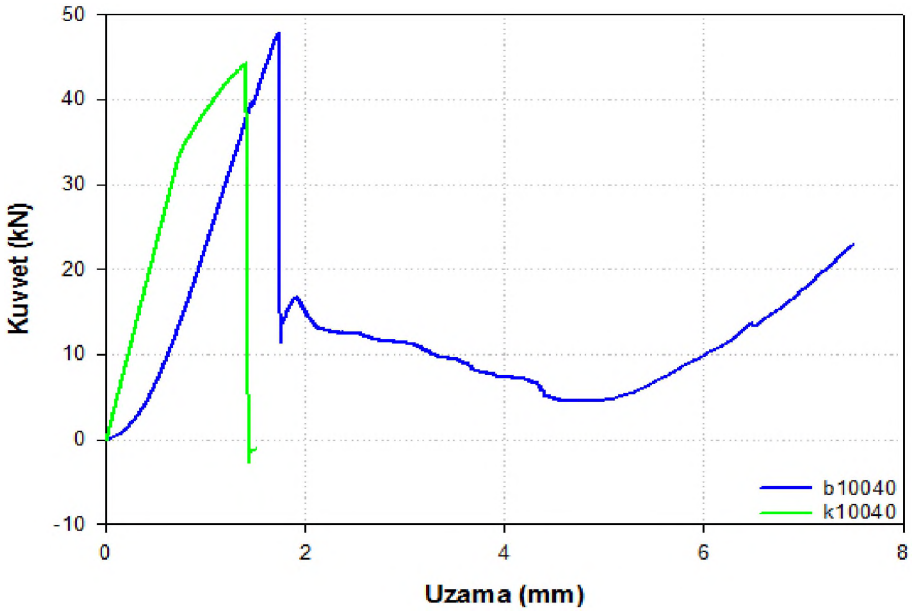


Şekil 5.19. Boyu 100 mm. 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği

Boyu 100 mm. olan 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerde yapılan sayısal analizlerin değerlendirilmesi aşağıda yapılmıştır.

Silindirik numuneye göre kare profil numunenin maksimum kuvvet %63, ortalama kuvvet %15 ve toplam enerji absorbsiyonu %15 oranında daha fazladır.

Boyu 100 mm. olan 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerin statik basma deneyi sonuçları Şekil 5.20'deki grafikte gösterilmiştir.

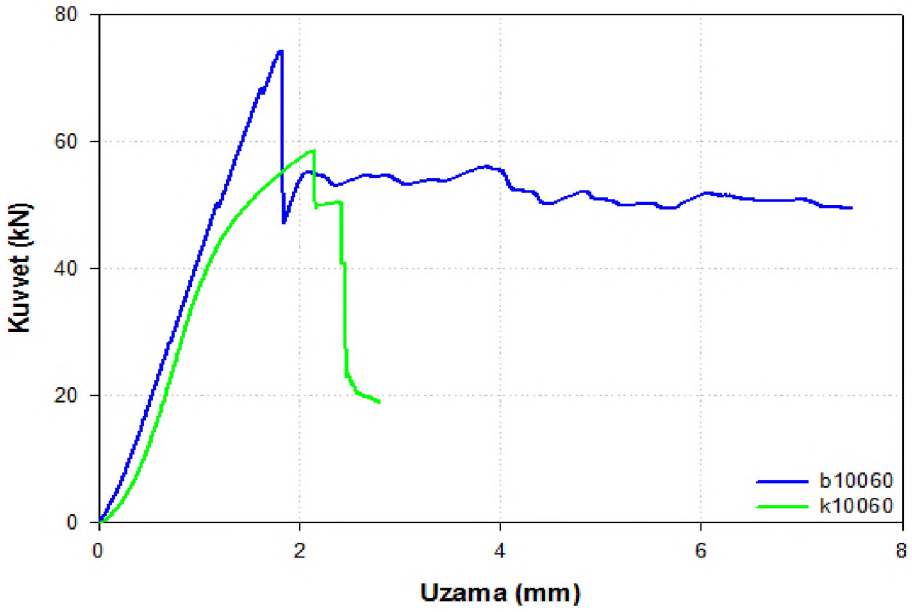


Şekil 5.20. Boyu 100 mm. 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği

Boyu 100 mm. olan 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerde yapılan sayısal analizlerin değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

Silindirik numuneye göre kare profil numunenin ortalama kuvveti %4 artmış, maksimum kuvvet %8 ve toplam enerji absorbsiyonu %98 oranında azalmıştır.

Boyu 100 mm. olan 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerin statik basma deneyi sonuçları Şekil 5.21'deki grafikteki gibi karşılaştırılabilmektedir.

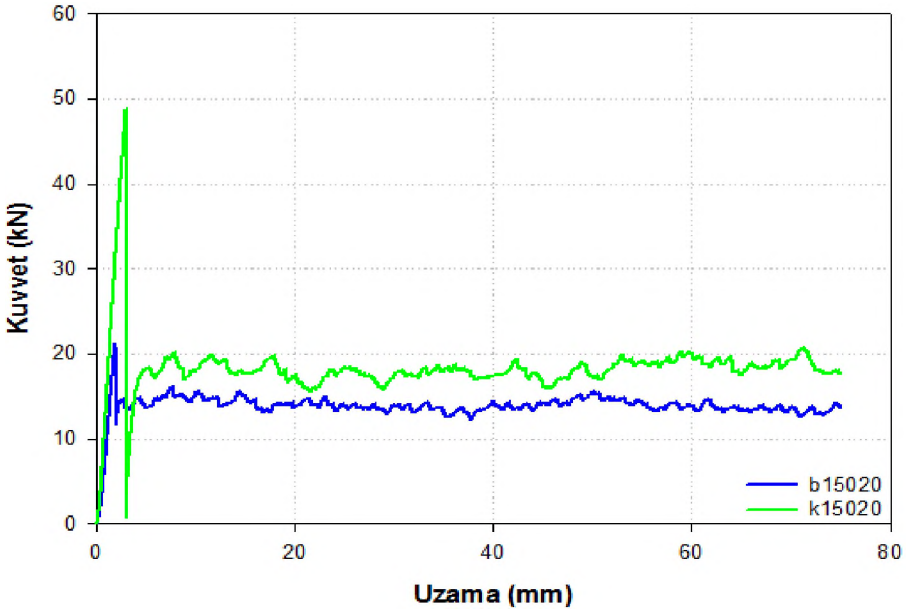


Şekil 5.21. Boyu 100 mm. 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği

Boyu 100 mm. olan 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerde yapılan sayısal analizlerin değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

Silindirik numuneye göre kare profil numunenin maksimum kuvvet %21, ortalama kuvvet %28 ve toplam enerji absorbsiyonu %97 oranında daha azdır.

Boyu 150 mm. olan 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerin statik basma deneyi sonuçları Şekil 5.22'deki grafikteki gibi karşılaştırılabilmektedir.

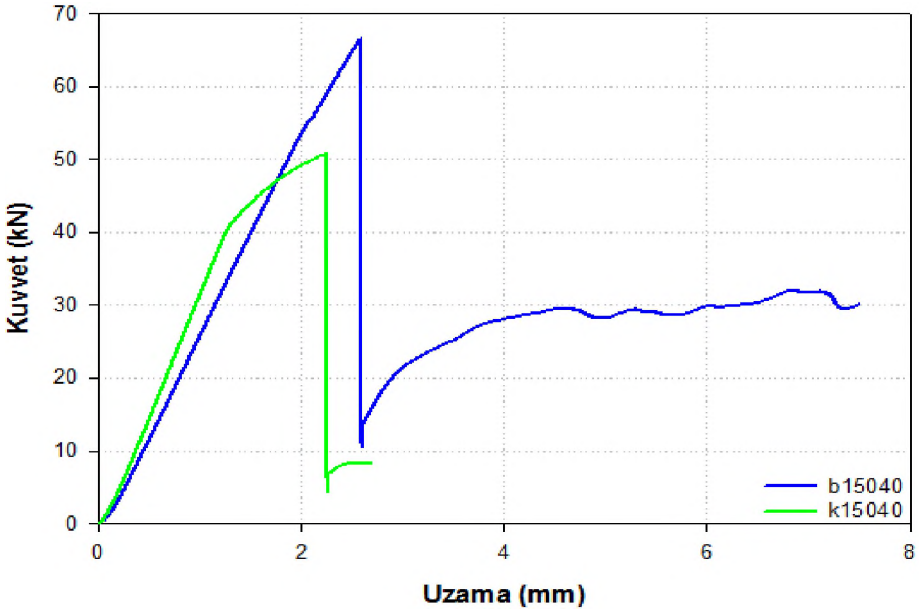


Şekil 5.22. Boyu 150 mm. 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği

Boyu 150 mm. olan 20 mm. çapında ve 20 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerde yapılan sayısal analizlerin değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

Silindirik numuneye göre kare profil numunenin maksimum kuvvet %129, ortalama kuvvet %32 ve toplam enerji absorbsiyonu %32 oranında daha fazladır.

Boyu 150 mm. olan 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerin statik basma deneyi sonuçları Şekil 5.23'deki grafikteki gibi karşılaştırılabilmektedir.

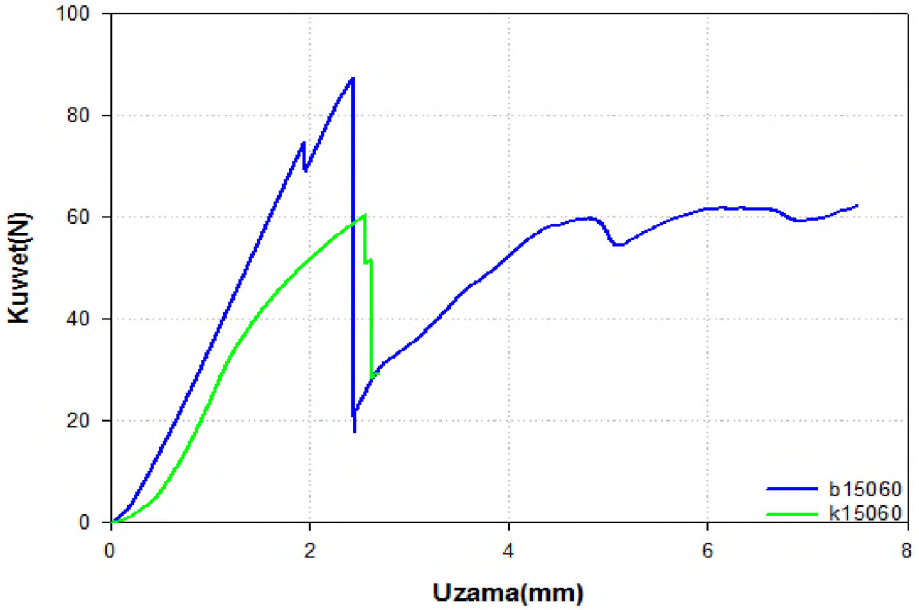


Şekil 5.23. Boyu 150 mm. 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği

Boyu 150 mm. olan 40 mm. çapında ve 40 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerde yapılan sayısal analizlerin değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

Silindirik numuneye göre kare profil numunenin maksimum kuvvet %24, ortalama kuvvet %18 ve toplam enerji absorbsiyonu %97 oranında daha azdır.

Boyu 150 mm. olan 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerin statik basma deneyi sonuçları Şekil 5.24'deki grafikteki gibi karşılaştırılabilmektedir.

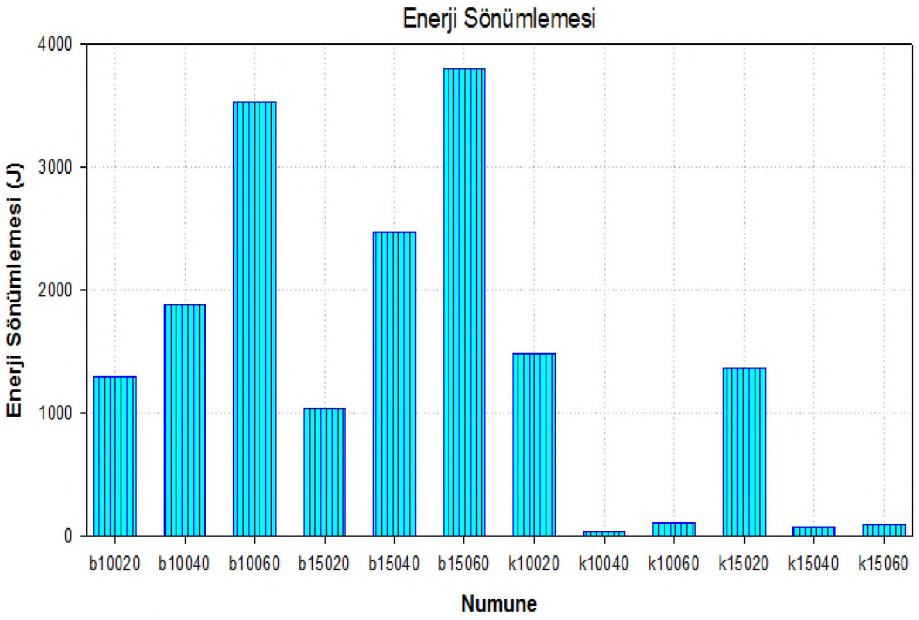


Şekil 5.24. Boyu 150 mm. 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki numunelerin statik basma grafiği

Boyu 150 mm. olan 60 mm. çapında ve 60 mm. kenar uzunluğundaki silindirik ve kare profil numunelerde yapılan sayısal analizlerin değerlendirilmesi aşağıda verilmiştir.

Silindirik numuneye göre kare profil numunenin maksimum kuvvet %31, ortalama kuvvet %37 ve toplam enerji absorbsiyonu %97 oranında daha azdır.

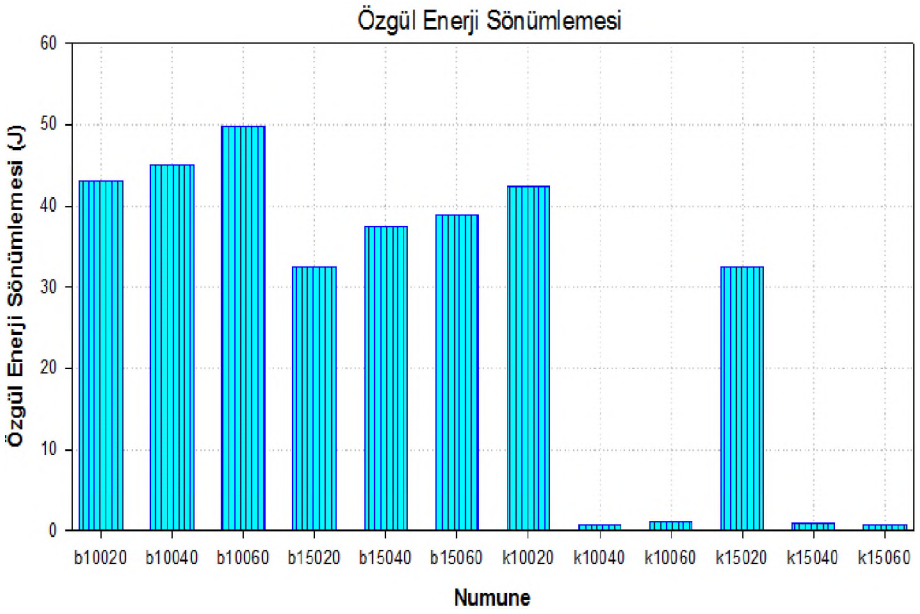
Hasarlı resimleri ve grafikleri yukarıda verilen numunelerin maksimum 75 mm. uzama altındaki enerji sönümleme değerleri Şekil 5.25'deki grafikte gösterilmiştir. Grafikte "b" harfi ile gösterilen sütunlar silindirik (boru) tipi numuneleri, "k" harfi ile gösterilen sütunlar ise kare profil numuneleri ifade etmektedir. Bu harflerin bitişiğindeki sayılar ise sırasıyla numunelerin boy uzunlukları ve silindirik numuneler için çaplarını veya kare profil numuneler için kenar uzunluklarını ifade etmektedir.



Şekil 5.25. Tüm numunelerin enerji sönümleme değerleri

Şekil 5.25'deki grafikten görüldüğü üzere silindirik numunelerde genellikle boyun ve çapın artması numunenin absorbe edebildiği enerji miktarının da artması anlamına gelmektedir. Bunun yanı sıra kare profil numunelerde yanlızca 20 mm. kenar uzunluğuna sahip olan numuneler yüksek enerji absorbe edebilmiş diğerleri fazla enerji absorbe edememiştir. Bunun nedeni statik basma kuvveti sonucu numunelerde oluşan farklı kırılma mekanizmalarıdır.

Numunelerin enerji sönümleme değerlerini numune ağırlıklarına bölerek özgül enerji sönümleme değerleri elde edilmiş ve Şekil 5.26'daki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5.26. Tüm numunelerin özgül enerji sönümlemeleri

Şekil 5.26'daki grafikten görüldüğü üzere tüm numunelerde boyun uzaması özgül enerji absorbsiyonu değerini düşürmüştür. Silindirik numunelerde çapın artması özgül enerji sönümlemesi değerini de arttırmıştır. Bunun yanı sıra ilerlemeli hasar oluşan numunelerde aynı uzunluğa ve çapa veya kenar uzunluğuna sahip olan farklı geometrilerdeki numunelerin özgül enerji absorbsiyonu değerleri birbirlerine çok yakındır.

Bütün numunelere yapılan deneyler sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Tüm numunelerin sayısal analizi

Numune	Uzama (mm)	Maksimum Kuvvet (kN)	Ortalama Kuvvet (kN)	Kuvvet Verimi	Enerji Sönümlemesi (J)	Numune Ağırlığı (g)	Özgül Enerji Sönümlemesi (J/g)	Hasar Modu
b10020	75	27,33	17,27	0,63	1295,1	30	43,17	İlerlemeli
b10040	75	47,89	25,17	0,53	1887,8	42	44,95	İlerlemeli
b10060	75	74,09	47,07	0,64	3530,1	71	49,72	İlerlemeli
b15020	75	21,29	13,86	0,70	1039,4	32	32,48	İlerlemeli
b15040	75	66,54	32,93	0,49	2470	66	37,42	İlerlemeli
b15060	75	87,29	50,70	0,58	3802,9	98	38,8	İlerlemeli
k10020	75	44,64	19,79	0,44	1484,7	35	42,42	İlerlemeli
k10040	1,5	44,26	26,21	0,59	38,85	53	0,74	Yıkımsal
k10060	2,8	58,69	33,91	0,58	107,04	90	1,05	Yıkımsal
k15020	75	48,73	18,25	0,37	1368,9	42	32,59	İlerlemeli
k15040	2,7	50,77	26,98	0,53	77,03	81	0,91	Yıkımsal
k15060	2,7	60,31	32,05	0,53	92,67	118	0,72	Yıkımsal

5.2. Farklı Malzemelere Uygulanan Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Statik basma deneyi çeşitli malzemelere uygulanabilen ve malzeme hakkında bilgiler edinilmesini sağlayan mekanik bir deneydir. Bu nedenle sanayi alanında ve akademik çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde farklı malzemelere uygulanan statik basma deneylerinin sonuçlarına erişilmiştir. Bulunan bu sonuçlar, tez çalışmasında yapılan deney ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Yapılan karşılaştırmalarda, 3 farklı malzeme tez çalışmasında kullanılan malzeme ile 3 farklı şekilde karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmalarda numune şeklinin veya boyut farklılığının toplam enerji absorbsiyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Karşılaştırmalar enerji absorbsiyonunun en fazla olduğu durumlarda yapılmıştır.

Karşılaştırma yapılan malzemelere ait mekanik özellikler Çizelge 5.2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Karşılaştırma yapılan malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme Türü	Elastisite Modülü (E)	Çekme Mukavemeti ($\sigma_{çekme}$)	Yüzde Uzama (ε)	Yoğunluk (ρ)
Cam Elyaf Kompozit	20 GPa	525 MPa	%3,8	1,45 g/cm^3
Keten Elyaf Kompozit	50 GPa	350 MPa	%2,7	1,5 g/cm^3
Alüminyum	70 GPa	450 MPa	%4,4	2,7 g/cm^3

Yan ve Chouw (2013) çalışmalarında keten elyaf kompozit malzeme üzerine statik basma deneyi yapmışlardır. Bu çalışmadan ve tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, silindirik numunelerin boyunun uzaması ve kesit alanının artması durumunda toplam enerji absorbe edebilme yeteneklerine olan etkileri açısından karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasında, numune boyu %50 arttığında toplam enerji absorbsiyonunun %31 artmıştır. Yan ve Chouw (2013)'un çalışmasında ise numune boyunun %50 artması sonucu toplam enerji absorbsiyonu en fazla %59 artmıştır. Ayrıca aynı makale ile yapılan karşılaştırmada, tez çalışmasında kullanılan malzemenin kesit alanının %100 artması durumunda absorbe edebildiği toplam enerji miktarı en fazla %185 artmıştır.

Makalede kullanılan numunenin kesit alanının %100 artması durumunda ise absorbe edebildiği toplam enerji miktarı en fazla %540 artmıştır.

Marzbanrad ve ark. (2009) çalışmalarda alüminyum malzeme üzerine statik basma deneyi yapmışlardır. Yapılan makale çalışmasındaki deney ile tez çalışmasında yapılan deneyde, benzer boyutlardaki kare profil numuneler ile silindirik numunelerin toplam enerji absorbe edebilme yetenekleri karşılaştırılmıştır.

Tez çalışmasında, aynı geometrik boyutlara sahip olan silindirik ve kare profil numunelerin absorbe edebildiği toplam enerji değerleri karşılaştırıldığında, kare profil numuneler silindirik numunelere göre %32 daha çok enerji absorbe edebilmiştir. Marzbanrad ve ark. (2009)'nın çalışmalarında uygulanan statik basma deneyi sonucunda ise kare profil numune, silindirik numuneden %33 daha fazla toplam enerji absorbe edebilmiştir. Bu sonuca göre tez çalışmasının makale ile uyumlu sonuç verdiği görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Kompozit malzemeler kullanım sıklığı olarak gelişen malzeme türlerindendir. Bu gelişmenin nedeni çoğunlukla geleneksel malzemelerin (metal, seramik, polimer) gelişen teknolojiye ve ihtiyaçlara karşılık verememesidir. Bunun yanı sıra kompozit malzemelerin birden çok malzemeden oluşuyor olması her ihtiyaca yönelik malzeme üretimini de kolaylaştırmaktadır. Bu nedenlerden ötürü kompozit malzeme üzerindeki çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin diğer kompozit malzemelere göre en belirgin farkı ucuz olmasıdır. Ancak doğru geometride kullanıldığında cam elyaf takviyeli kompozitlerden yüksek enerji absorbsiyonu değerleri de sağlanabilmektedir. Epoksi (polimer) matrisli bir yapıya sahip olan kompozitler ise diğer matris malzemelerine göre daha sünek bir yapıya sahiptirler. Bu nedenler düşünüldüğünde polimer matrisli cam elyaf takviyeli kompozit malzemelere çok fazla kullanım alanı bulunabilinecektir.

Kompozit malzeme üretim yöntemlerinden olan prepreg malzemenin wrap sarım metoduyla üretilmesi ise üretimde çok büyük kolaylık ve ucuzluk sağlamaktadır. Çünkü bu üretim yönteminde çok fazla zamana ve üretim makinesine ihtiyaç duyulmamaktadır.

Yapılan tez çalışması sonucunda polimer matrisli cam elyaf takviyeli farklı geometrilerdeki kompozit tüplerin statik basma kuvveti dayanımlarının sonuçları araştırılmıştır. Araştırmalar sonucunda, kompozit malzemenin şeklindeki, boyundaki ve çapındaki değişimlerin statik basma kuvvetine karşı dayanımlarındaki ve deney sonucunda oluşan hasar modlarındaki farklılıklar incelenmiştir. Ayrıca tez çalışmasında uygulanan deneyin sonucu ile farklı malzemelere uygulanan benzer deneylerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Silindirik profilli tüm numunelerde ilerlemeli hasarlar oluşmuş ve bu nedenle yüksek miktarda toplam enerji absorbe edebilmişlerdir.
- Kare profilli numunelerde, numune boyu fark etmemekle birlikte yanlızca en küçük kenar uzunluğuna sahip (20 mm.) olan numunelerde ilerlemeli hasarlar oluşmuş ve yüksek miktarda toplam enerji absorbe edilebilmiştir.
- Kare profilli numunelerde, 40 mm. ve 60 mm. çaplarındaki numunelerde deney sırasında oluşan yıkımsal hasar nedeniyle numuneler kuvvet taşıyamamıştır.
- Tüm numunelerde numune çapının veya kenar uzunluğunun artması maksimum enerji absorbsiyonu değerini artırmıştır.
- Tüm numunelerde numune çapının veya kenar uzunluğunun artması ortalama enerji absorbsiyonu değerini artırmıştır.
- Ayrıca tüm numunelerde numune çapının veya kenar uzunluğunun artması özgül enerji absorbsiyonu değerini de artırmıştır.
- Yapılan karşılaştırmada, silindirik keten elyaf kompozit malzemeden üretilen numunelerde, numune boyunun ve kesit alanının artması toplam enerji absorbsiyonunu tezde kullanılan silindirik numunelere göre daha fazla arttırmıştır.
- Alüminyum silindirik ve kare profil numunelere yapılan deney ile tez çalışmasında yapılan deneyler karşılaştırıldığında ise, alüminyum malzemeden yapılmış numunelerde silindirik formdaki numunenin kare profil numuneden daha fazla enerji absorbe ettiği görülmüştür. Ancak, tez çalışmasında yapılan deneylerde ise kare profil numunenin silindirik numuneye göre daha fazla enerji absorbe ettiği görülmüştür.

Tüm bu elde edilen sonuçlar ışığında, eksenel statik basma kuvveti benzeri bir kuvvet altında çalışması gereken kompozitlerde silindirik geometrili kompozit malzeme kullanılması daha uygundur. Ayrıca parçanın kullanılacağı yerin müsait olduğu sürece parçanın olabildiğince yüksek çapa sahip olması absorbe edebileceği enerji miktarını da arttıracağından, olabildiğince büyük çaplı boru kullanılmalıdır.

Yapılan karşılaştırmalar sonucunda ise, keten elyaf malzemeden yapılmış olan numunelerde numune geometrisindeki artış cam elyaf kompozit malzemedeki artışa

göre daha fazla toplam enerji absorbsiyonuna neden olmuştur. Ancak diğer numunelerin taşıdığı maksimum yük ve toplam enerji absorbsiyonu değerleri cam elyaf kompozit numunelere göre çok daha düşüktür. Malzemelerin kullanılacağı yere göre numunelerden elde edilen sonuçlar incelenip tercih yapılabilir.

KAYNAKLAR

Abrate, S., 1998. Impact on Composite Structures. Cambridge University Press, New York, 1-6.

Acar, V., 2013. Karbon İplik Dolgulu Termoset Film Kompozitlerde Arayüzey Çalışmaları. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Akkuzu, E., 2012. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Anonim, 2014. Kompozit malzemelerdeki örgü tipleri. http://www.kompozitsan.com/tr/105-fiber-elyaf-kumaşlar (13.08.2016).

Anonim, 2015. Matris ve takviye malzemesi ve mekanik özellikleri. http://www.fibermakcomposites.com/shop/index.php (13.08.2016).

Asi, D., 2008. Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Aşınma Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.

Ataollahi, S., Taher, S., Eshkoor, R., Ariffin, A., Azhari, C., 2012. Energy absorbtion and failure response of silk/epoxy composite square tubes: experimental. Composites Part B, 43, 542-548.

Bambach, M., Elchalakani, M., Zhao, X., 2009. Composite steel-CFRP SHS tubes under axial impact. Composite Structures, 87, 282-292.

Bayraktar, M., 2014. Cam Elyaf Takviyeli (Fiber Glass Reinforced) Kompozit Boruların Dayanım Test Makinesi Tasarımı ve FEA Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Beylikçi, N., 1994. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Elyaf Yönü, Boyu ve Çapının Değişimine Göre Mekanik Özelliklerinin Değişiminin Bilgisayar Yardımı ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Cerit, M., 2011. Şehirler Arası Otobüslerde Önden Çarpışma Enerjisini Yutucu Pasif Güvenlik Sisteminin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Demircioğlu, G., 2006. Kısa Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerde Elyaf Boyutunun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Demirel, A., 2007. Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozit Malzemelerin Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Deniz, M., 2005. Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri ve Isıl İşlemle Presleme Tekniğini Kullanarak Kompozit Malzeme Üretecek Bir Düzeneğin Tasarım ve İmalatı. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa.

Ekici, E., 2009. Cam Elyaf Takviyeli Polimer Kompozit Malzemenin Delinmesi Esnasında Oluşan Yüzey Hasarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Ercan, H., 2006. Uçak Sanayiinde Kullanılan Balpeteği Kompozitlerinin Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Erden, S., 2009. Karbon Fiberlerden İmal Edilen Kompozit Yapılarda, Fiber Yüzey İşlemlerinin Fiber, Ara Bölge ve Kompozit Yapı Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Gemi, L., 2014. Düşük Hızlı Darbe Hasarlı Filaman Sarım Hibrit Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışı. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Ghazijahani, T., Jiao, H., Holloway, D., 2015. Timber filled CFRP jacketed circular steel tubes under axial compression. Construction and Building Materials, 94, 791-799.

Guades, E., Aravinthan, T., Manalo, A., Islam, M., 2013. Experimental investigation on the behaviour of square FRP composite tubes under repeated axial impact. Composite Structures, 97, 211-221.

Güvensoy, S., 2010. Filaman Sarım Kompozit Boruların Düşük Hızlı Darbe Davranışının Simülasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Işık, A., 2008. Kompozit Malzemeden İmal Edilmiş Bir Takviye Elemanının Eğilme ve Burulma Yükü Altında Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İçten, B., 2006. Damage in Laminated Composite Plates Subjected to Low-Velocity Impact. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.

Jin, S., Altenhof, W., 2007. Comparison of the load/displacement and energy absorbtion performance of round and square extrusions under a cutting deformation mode. International Journal of Crashworthiness, 12, 265-278.

Kakogiannis, D., Yuen, S., Palanivelu, S., Hemelrijck, D., Paepegem, W., Wastiels, J., Vantomme, J., Nurick, G., 2013. Response of pultruded composite tubes subjected to dynamic and impulsive axial loading. Composites Part B, 55, 537-547.

Kalhor, R., Case, S., 2015. The effect of FRP thickness on energy absorbtion of metal-FRP square tubes subjected to axial compressive loading. Composite Structures, 130, 44-50.

Kara, M., 2012. Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım CTP Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Karacaer, Y., 2009. Cam Kumaş Takviyeli Delikli SMC Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Karadayı, S., 2012. Düşük Hızlı Darbe Yükü Altında Tabakalı Kompozit Malzemelerin Mekanik Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.

Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., 1996. Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri. İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, İstanbul, 66-76.

Lau, S., Said, M., Yaakob, M., 2012. On the effect of geometrical designs and failure modes in composite axial crushing. Composite Structures, 94, 803-812.

Liu, Q.,Ou, Z., Mo, Z., Li, Q., Qu, D., 2015. Experimental investigation into dynamic axial impact responses of double hat shaped CFRP tubes. Composites Part B, 79, 494-504.

Mahdi, E., Hamouda, A., Mokhtar, A., Majid, D., 2004. Many aspects to improve damage tolerance of collapsible composite energy absorber devices. Composite Structures, 67, 175-187.

Mamalis, A., Manolakos, D., Demosthenous, G., Ioannidis, M., 1996. Analysis of failure mechanisms observed in axial collapse of thin-walled circular fibreglass composite tubes. Thin-Walled Structures, 24, 335-352.

Marzbanrad, J., Mehdikhanlo, M., Saeedi Pour, A., 2009. An energy absorption comparison of square, circular and elliptic steel and aluminum tubes under impact loading. Turkish Journal Engineering Environmental Sciences, 33, 159-166.

Oshkovr, S., Eshkoor, R., Taher, S., Ariffin, A., Azhari, C., 2012. Crashworthiness characteristics investigation of silk/epoxy composite square tubes. Composites Structures, 94, 2337-2342.

Sayer, M., 2009. Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi. Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

Şahin, A., 2011. Düşük Hızlı Darbe Görmüş Filaman Sarım E-Camı/Epoksi Boruların İç Basınç Altında Yorulma Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Şahin, E., 2011. $AlMg_3$/SiCp Kompozit Malzemelerinin Darbe Davranışının Takviye Oranı ile Değişiminin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Tanboğa, B., 2007. Darbe Altındaki Elyaf Takviyeli Kompozit Tüpün Sonlu Elemanlar Modellemesi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yan, L., Chouw, N., 2013. Crashworthiness characteristics of flax fibre reinforced epoxy tubes for energy absorption application. Materials and Design, 51, 629-640.

Yavuzyılmaz, Ö., 2007. Eksenel Yük Altındaki Ortasında Delik Bulunan Kompozit Levhada Değişik Sıcaklıklarda Oluşan Gerilmelerin Deneysel ve Sonlu Elemanlar Analizi ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Wu, H., Dwight, D., Huff, N., 1997. Effect of silane coupling agents on the interphase and performance of glass-fiber-reinforced polymer composites. Composites Science and Technology, 57, 975-983.

EKLER

EK-1. Gerekli prepreg uzunluğu hesaplaması örneği

20 mm. iç çapında ve 2 mm. kalınlığında silindirik borunun üretilmesi için gerekli prepreg uzunluğunun hesabını aşağıdaki gibi yapılabilmektedir.

$$d_{ort} = \frac{(d_{iç} + d_{dış})}{2} = \frac{(20 + 24)}{2} = 22mm.$$

$$A_{ort} = \pi \; x \; d_{ort} = 3{,}14x22 = 69{,}115mm.$$

$$n = \frac{2}{0{,}3} = 6{,}67$$

$$L = A_{ort} \; x \; n = 69{,}115x6{,}67 = 461mm.$$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ZORLU, Muhammed Fatih

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 13.08.1991 – Yenimahalle

Medeni Hali : Evli

Telefon : 0 555 766 21 16

e-mail : muhammedfatihzorlu@gmail.com

Eğitim

Derece	**Eğitim Birimi**	**Mezuniyet Tarihi**
Lisans	Bartın Üni. Metalurji ve Malz. Mühendisliği	2013
Lise	Kızılcahamam Anadolu Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**
2013-2015	Tübitak	Proje Asistanı
2016-2016	Ece Seramik	Üretim Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce