

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON/CAM FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME
BAĞLANTILARININ HASAR ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Murat AŞAN

151143106

Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği Teknolojileri Programı

Programı: Konstrüksiyon ve İmalat

Danışman: Doç. Dr. Cebeli ÖZEK

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 28.05.2018

HAZİRAN-2018

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARBON/CAM FİBER TAKVİYELİ KOMPOZİT MALZEME
BAĞLANTILARININ HASAR ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Murat AŞAN

151143106

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 28.05.2018
Tezin Savunulduğu Tarih : 25.06.2018**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. Cebeli ÖZEK (F.Ü)
Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Ulaş CAYDAŞ (F.Ü)
Dr. Öğr. Üyesi Zülküf DEMİR (Batman. Ü)**

HAZİRAN-2018

ÖNSÖZ

Tezi hazırlama sürecinde bana, tüm iyi niyetiyle, her türlü yardımı sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Cebeli Özek' e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım boyunca her yönüyle yanımda olan, beni destekleyen aileme teşekkürü bir borç bilirim. Yüksek lisans çalışmamın TEKF.17.17 no'lu proje ile mali desteğini sağlayan, Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi'ne (FÜBAB) ve fedakâr çalışanlarına ayrıca teşekkür ederim.

AHMET MURAT AŞAN
ELAĞIĞ-2018



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	XV
SEMBOLLER LİSTESİ	XVII
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. KOMPOZİT MALZEMELER	11
3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	12
3.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	12
3.1.1.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitler	12
3.1.1.2. Kısa Elyaf Takviyeli Kompozitler	13
3.1.1.3. Rastgele Düzlemsel Yönlendirilmiş Kompozitler	14
3.1.2. Parçacıklarla Takviyeli Kompozit Malzemeler	14
3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	15
3.2. Sandviç Malzemeler	15
3.2.1. Sandviç Malzemelerin Çeşitleri	16
3.2.1.1. Yüzey Çeşitleri	16
3.2.1.2. Reçine Çeşitleri	17
3.2.1.3. Çekirdek Çeşitleri	17
3.3. Petekli Yapılar	18
3.3.1. Petekli Yapı Üretim Yöntemleri	19
3.3.1.1. Uzatarak Şekil Verme Yöntemi	19
3.3.1.2. Kıvrırma Yöntemi	20
3.4. Kompozit Tabakaların Makromekanik Analizi	21
3.4.1. İzotropik Tabaka	21
3.4.2. Ortotropik Tabaka	23
3.4.2.1. Gerilme Bağlılıkları	25
3.4.2.2. Şekil Değiştirme Bağlılıkları	26
3.4.2.3. Gerilme- Şekil Değiştirme Bağlılıkları	28
3.4.2.4. Mühendislik Sabitleri	31
3.5. Mekanik Bağlılıkların Avantaj ve Dezavantajları	31
3.6. Yapıştırılabilir Bağlılıkların Üstünlükleri	33
3.7. Bağlılıkların Tasarımı	33
3.7.1. Bağlılık Tipleri	34
3.7.1.1. Mekanik Birleştirmeli Bağlılık Tasarımı	35
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	38
4.1. Deneyisel Çalışmalarda Kullanılan Yöntem ve Deney Numunelerinin Hazırlanması ..	38
4.2. Karbon Fiber ve Cam Fiber Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	42
4.3. Karbon Fiber Kompozit Malzeme Bağlılıklarının Çekme Testi Sonuçları	43
4.3.1. M8 Cıvata Bağlılıklı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri	44

4.3.2. M10 Cıvata Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	47
4.3.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	49
4.3.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	51
4.3.5. Karbon Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Delik Çapına Göre Karşılaştırılması.....	53
4.3.6. Karbon Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Bağlantı Tipine Göre Karşılaştırılması.....	59
4.4. Cam Fiber Kompozit Malzeme Bağlantılarının Çekme Testi Sonuçları.....	60
4.4.1. M8 Cıvata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	60
4.4.2. M10 Cıvata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	63
4.4.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	65
4.4.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	67
4.4.5. Cam Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Delik Çapına Göre Karşılaştırılması.....	69
4.4.6. Cam Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Bağlantı Tipine Göre Karşılaştırılması.....	75
5. SAYISAL ÇALIŞMALAR	77
5.1 Sayısal Çalışmalarda Kullanılan Yöntem ve Deney Numunelerinin Hazırlanması	78
5.2. Kompozit Malzemelerin Sonlu Elemanlar Modelleri	80
5.2.1. Kare Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri.....	80
5.2.2. Dairesel Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri	81
5.2.3. Altıgen Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri.....	81
5.2.4. 45° Döndürülmüş Kare Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri.....	82
5.2.5. 90° Döndürülmüş Altıgen Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri ..	82
5.3. Karbon Fiber Kompozit Malzeme Bağlantılarının Sayısal Çalışma Sonuçları.....	85
5.3.1. M8 Cıvata Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	85
5.3.2. M10 Cıvata Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri	88
5.3.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	91
5.3.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	94
5.4. Cam Fiber Kompozit Malzeme Bağlantılarının Sayısal Çalışma Sonuçları.....	98
5.4.1. M8 Cıvata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	98
5.4.2. M10 Cıvata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	101
5.4.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	104

5.4.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri.....	107
6. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI.....	112
7. SONUÇLAR.....	138
8. ÖNERİLER.....	139
9. KAYNAKLAR.....	140
ÖZGEÇMİŞ.....	143



ÖZET

Teknolojinin gelişmesi ile kullanım alanları yaygınlaşan kompozit malzemelerin bağlantı tasarımlarının önemi artmıştır. Kompozit malzemelerin bağlantı tasarımları yapılırken birleştirme elemanı olarak cıvata, pim, yapıştırıcı ve perçin gibi elemanlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Kullanılan birleştirme elemanının türüne bağlı olarak bağlantı tasarımı farklı mekanik özelliklere sahiptir.

Bu çalışmada, üzerinde dairesel, kare ve altıgen profillerde delikler bulunan 0° yönlenme açısına sahip karbon fiber ve cam fiber kompozit malzemeler, epoksi yapıştırıcı ve çözülebilir bağlantı yöntemleri kullanılarak, birleştirilmiştir. Karbon fiber kompozit ve cam fiber kompozit malzemelerde oluşan gerilme yığılmalarında ve yüklenme kapasitelerinde hangi profil yapısının ve bağlantı yönteminin uygun olduğunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, farklı profillerdeki numunelerin bağlantıları yapıldıktan sonra çekme testi cihazında testlere tabi tutulmuşlardır. Sayısal çalışmalarda ise farklı profillerdeki numunelerin tasarımlarının yapılmasında ve çekme testlerinin uygulanmasında ANSYS 14 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları mukayese edilerek en uygun profil yapısının dairesel profil olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapıştırma bağlantısı, Cıvata bağlantısı, Karbon fiber kompozit, Cam fiber kompozit, Sonlu elemanlar metodu, Çekme testi.

SUMMARY

Damage Analysis of Carbon/ Glass Fiber Reinforced Composite Material Connections

By the development of technology, the importance of composite material connection designs which usage areas become widespread have increased. The connection design of the composite materials are implemented by using connecting elements such as bolts, pins, adhesives and rivets widely using as joining elements. Depending on the type of using the coupling elements used, the connection designs have different mechanical properties.

In this study, carbon fiber and glass fiber composite materials with 0° inclination angle on which holes in circular, square and hexagonal profiles were combined using epoxy adhesive and soluble joint methods. The purpose of this study was to determine which profile structure and connection method was suitable for stress accumulation and load capacities in carbon and glass fiber composite materials. Numerical and experimental studies were carried out for this purpose. In experimental studies, samples of different profiles were subjected to tensile testing on the tensile tester after the connections were made. Numerical studies were used the ANSYS14 finite element package program for the design of specimens in different profiles and for the application of tensile tests. By comparing the results of experimental and numerical studies it was determined that the most appropriate profile structure was circular profile.

Key Words: Adhesive connection, Bolt connection, Carbon fiber composite, Glass fiber composite, Finite element method, Tensile test.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1 Pim kullanılarak oluşturulmuş bağlantılarda meydana gelen hasarlar.....	1
Şekil 1.2 Birleştirme yapılarında gerilme yığılmaları.....	3
Şekil 3.1 Kompozit bir yapının meydana gelmesini sağlayan temel elemanlar.....	11
Şekil 3.2 Kompozit malzemenin oluşumu ve tanımlanması.....	12
Şekil 3.3 Elyaf takviyeli kompozitler.....	13
Şekil 3.4 Parçacık takviyeli kompozit.....	14
Şekil 3.5 Tabakalı kompozitler.....	15
Şekil 3.6 Altıgen hücreli petekli yapı.....	18
Şekil 3.7 Sandviç panelin yapıştırılarak elde edilmesi.....	19
Şekil 3.8 Uzatarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi.....	20
Şekil 3.9 Kıvrırma yöntemi ile petekli yapı hücre üretimi.....	21
Şekil 3.10 Üç boyutlu gerilme sistemi	22
Şekil 3.11 Referans eksenleri hakkında ortotropik tabaka doğrultusu.....	25
Şekil 3.12 Normal ve kayma uzamaları altında deformasyona uğrayan bir elema	27
Şekil 3.13 Temel bağlantı konfigürasyonları	35
Şekil 3.14 Pim ile yüklenen delik etrafında oluşan gerilme dağılımları.....	35
Şekil 3.15 Pimli bağlantılarda tipik hasar mekanizmaları.....	36
Şekil 4.1 Temsili numune resmi.....	38
Şekil 4.2 Birleştirilecek karbon fiber kompozit malzemeler.....	39
Şekil 4.3 Birleştirilecek cam fiber kompozit malzemeler.....	39
Şekil 4.4 Karbon fiber kompozit malzemelerin ve cam fiber kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan malzemeler	40
Şekil 4.5 Karbon fiber kompozit malzemelerin çözülebilir şekilde oluşturulmuş bağlantıları.....	40
Şekil 4.6 Cam fiber kompozit malzemelerin çözülebilir şekilde oluşturulmuş bağlantıları.....	41
Şekil 4.7 Karbon fiber kompozit malzemelerin çözilemeyen şekilde oluşturulmuş bağlantıları.....	41
Şekil 4.8 Cam fiber kompozit malzemelerin çözilemeyen şekilde oluşturulmuş bağlantıları.....	42
Şekil 4.9 Tek parçadan oluşan 116 mmx20 mmx1 mm boyutlarında numuneler.....	42
Şekil 4.10 Deney düzeneği.....	43
Şekil 4.11 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları.....	44

Şekil 4.12	M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği.....	46
Şekil 4.13	M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları.....	47
Şekil 4.14	M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği.....	48
Şekil 4.15	8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları.....	49
Şekil 4.16	8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği.....	50
Şekil 4.17	10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları.....	51
Şekil 4.18	10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği.....	52
Şekil 4.19	M8 ve M10 cıvata bağlantılı dairesel profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	53
Şekil 4.20	M8 ve M10 cıvata bağlantılı kare profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	54
Şekil 4.21	M8 ve M10 cıvata bağlantılı altıgen profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	54
Şekil 4.22	M8 ve M10 cıvata bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	55
Şekil 4.23	M8 ve M10 cıvata bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	56
Şekil 4.24	8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı dairesel profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	56
Şekil 4.25	8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı kare profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	57
Şekil 4.26	8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı altıgen profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	58
Şekil 4.27	8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	58
Şekil 4.28	8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	59
Şekil 4.29	M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları.....	61
Şekil 4.30	M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği.....	62

Şekil 4.31 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları.....	63
Şekil 4.32 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	64
Şekil 4.33 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	65
Şekil 4.34 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	66
Şekil 4.35 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	67
Şekil 4.36 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği.....	68
Şekil 4.37 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı dairesel profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği	69
Şekil 4.38 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı kare profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği	70
Şekil 4.39 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı altıgen profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	70
Şekil 4.40 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	71
Şekil 4.41 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı 90° altıgen profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği	72
Şekil 4.42 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı dairesel profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği.....	72
Şekil 4.43 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı kare profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği	73
Şekil 4.44 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı altıgen profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği	74
Şekil 4.45 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği	74
Şekil 4.46 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği	75
Şekil 5.1 Yapısal bir analizde sonlu elemanlar yönteminin uygulanışı	77
Şekil 5.2 Bağlantı tasarımlarda kullanılan teknik resim	78
Şekil 5.3 Deney numuneleri	79
Şekil 5.4 Bağlantılarda kullanılan sınır şartları	80
Şekil 5.5 Kare profil yapılı bağlantıların sonlu eleman modelleri	80
Şekil 5.6 Dairesel profil yapılı bağlantıların sonlu eleman modelleri	81
Şekil 5.7 Altıgen profil yapılı bağlantıların sonlu eleman modelleri	81

Şekil 5.8 45° döndürülmüş kare profil yapılı bağlantıların sonlu eleman modelleri	82
Şekil 5.9 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantıların sonlu eleman modelleri	83
Şekil 5.10 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	86
Şekil 5.11 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	88
Şekil 5.12 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	89
Şekil 5.13 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	91
Şekil 5.14 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	92
Şekil 5.15 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	94
Şekil 5.16 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	95
Şekil 5.17 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	97
Şekil 5.18 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	99
Şekil 5.19 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	101
Şekil 5.20 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	102
Şekil 5.21 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	104
Şekil 5.22 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	105
Şekil 5.23 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	107
Şekil 5.24 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları	108
Şekil 5.25 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği	110
Şekil 6.1 8 mm çaplı dairesel profil yapılı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	112
Şekil 6.2 10 mm çaplı dairesel profil yapılı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	112
Şekil 6.3 8 mm çaplı dairesel profil yapılı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	113

Şekil 6.4 10 mm çaplı dairesel profil yapıli cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	113
Şekil 6.5 M8 dairesel profil yapıli karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	114
Şekil 6.6 M10 dairesel profil yapıli karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	114
Şekil 6.7 M8 dairesel profil yapıli cam fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	115
Şekil 6.8 10 mm çaplı dairesel profil yapıli cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	115
Şekil 6.9 8 mm çaplı kare profil yapıli karbon fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	116
Şekil 6.10 10 mm çaplı kare profil yapıli karbon fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	116
Şekil 6.11 8 mm çaplı kare profil yapıli cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	117
Şekil 6.12 10 mm çaplı kare profil yapıli cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	117
Şekil 6.13 M8 kare profil yapıli karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	118
Şekil 6.14 M10 kare profil yapıli karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	118
Şekil 6.15 M8 kare profil yapıli cam fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	119
Şekil 6.16 M10 kare profil yapıli cam fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	119
Şekil 6.17 8 mm çaplı 90° döndürölmüş altıgen profil yapıli karbon fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	120
Şekil 6.18 10 mm çaplı 90° döndürölmüş altıgen profil yapıli karbon fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	120
Şekil 6.19 8 mm çaplı 90° döndürölmüş altıgen profil yapıli cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	121

Şekil 6.20 10 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	121
Şekil 6.21 M8 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	122
Şekil 6.22 M10 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	122
Şekil 6.23 M8 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	123
Şekil 6.24 M10 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	123
Şekil 6.25 8 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapılı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	124
Şekil 6.26 10 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapılı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	124
Şekil 6.27 8 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapılı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	125
Şekil 6.28 10 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapılı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	125
Şekil 6.29 M8 45° döndürülmüş kare profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	126
Şekil 6.30 M10 45° döndürülmüş kare profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları	126
Şekil 6.31 M8 45° döndürülmüş kare profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	127
Şekil 6.32 M10 45° döndürülmüş kare profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	127
Şekil 6.33 8 mm çaplı altıgen profil yapılı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	128
Şekil 6.34 10 mm çaplı altıgen profil yapılı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	128
Şekil 6.35 8 mm çaplı altıgen profil yapılı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	129

Şekil 6.36 10 mm çaplı altıgen profil yapıli cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	129
Şekil 6.37 M8 altıgen profil yapıli karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	130
Şekil 6.38 M10 altıgen profil yapıli karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	130
Şekil 6.39 M8 altıgen profil yapıli cam fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	131
Şekil 6.40 M10 altıgen profil yapıli cam fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları.....	131
Şekil 6.41 8 mm çaplı karbon fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları.....	132
Şekil 6.42 10 mm çaplı karbon fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları.....	133
Şekil 6.43 8 mm çaplı cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları.....	133
Şekil 6.44 10 mm çaplı cam fiber yapıştırma baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları.....	134
Şekil 6.45 M8 karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları.....	135
Şekil 6.46 M10 karbon fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları.....	135
Şekil 6.47 M8 cam fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları.....	136
Şekil 6.48 M10 cam fiber civata baēlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama ve hata miktarları.....	137

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 Mekanik bağlantıların avantaj ve dezavantajları.....	33
Tablo 4.1 Numune ölçüleri.....	38
Tablo 4.2 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	45
Tablo 4.3 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	48
Tablo 4.4 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	50
Tablo 4.5 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	52
Tablo 4.6 Karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen kopma kuvvetleri.....	60
Tablo 4.7 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	62
Tablo 4.8 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	64
Tablo 4.9 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	66
Tablo 4.10 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları.....	68
Tablo 4.11 Cam fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen kopma kuvvetleri.....	76
Tablo 5.1 Bağlantı tasarımlarında kullanılan karbon fiber kompozit ve cam fiber kompozit malzemelerin mekanik özellikleri.....	78
Tablo 5.2 Bağlantı tasarımlarında kullanılan yapıştırıcı malzemenin mekanik özellikleri..	79
Tablo 5.3 Sonlu eleman tasarımlarında bulunan eleman sayısı, düğüm sayısı ve elemanlara ayırma boyutu	84

Tablo 5.4 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler	87
Tablo 5.5 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler	90
Tablo 5.6 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler.....	93
Tablo 5.7 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler.....	96
Tablo 5.8 Karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler.....	98
Tablo 5.9 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler.....	100
Tablo 5.10 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler.....	103
Tablo 5.11 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler.....	106
Tablo 5.12 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler.....	109
Tablo 5.13 Cam fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler.....	111

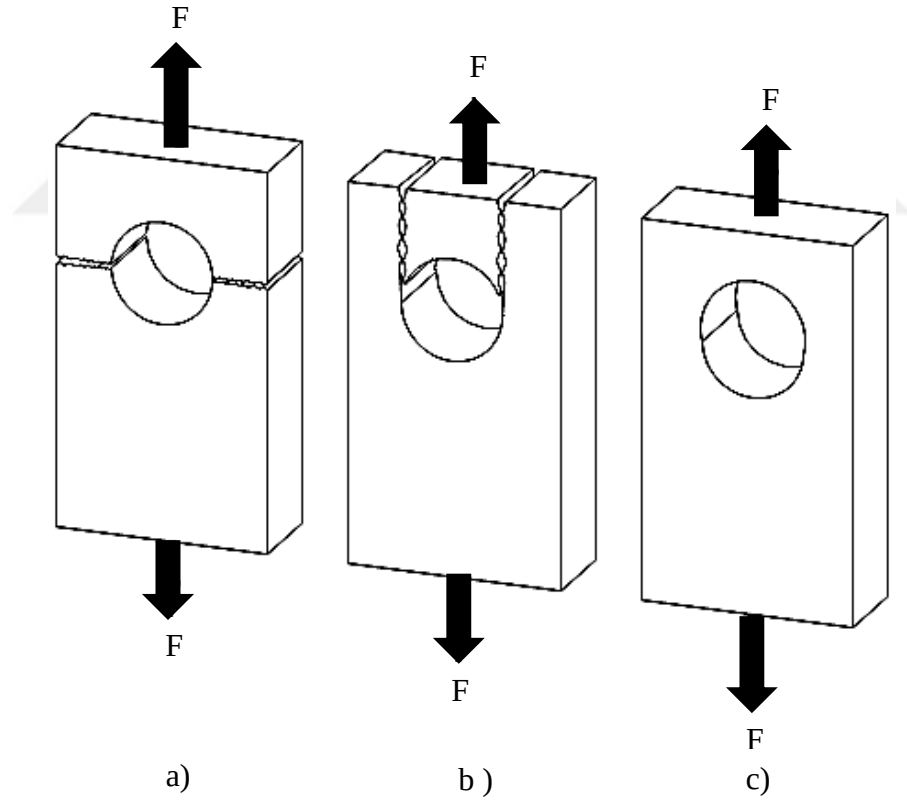
SEMBOLLER LİSTESİ

E:	Elastisite modülü (MPa)
G:	Kayma modülü (MPa)
F:	Uygulanan yük (N)
v:	Poisson oranı
b:	Numune genişliği (mm)
θ:	Yönlendirme açısı ($^{\circ}$)
σ_{11}:	1 yönündeki gerilme (MPa)
σ_{22}:	2 yönündeki gerilme (MPa)
σ_{33}:	3 yönündeki gerilme (MPa)
ϵ_{xx}:	X doğrultusundaki uzama
ϵ_{yy}:	Y doğrultusundaki uzama
ϵ_{xy}:	XY doğrultusundaki uzama
K:	Delik merkezinin numune kenarına olan uzaklığı (mm)
L:	Numune boyu (mm)
W:	Numune genişliği (mm)
t:	Numune kalınlığı (mm)
d:	Numune delik çapı (mm)

1. GİRİŞ

Son yıllarda kompozit malzemelerin üretilmesinde kullanılan yöntemlerde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu malzemelerin, özellikle, düşük ağırlık ve yüksek mukavemet özelliklerinin tercih edildiği hava ve deniz taşıtlarında kullanımı artmıştır. Kompozit malzemeler, yapı ve makine imalatında farklı birleştirme elemanlarıyla kullanılmaktadır. Kompozit malzeme bağlantıları, çözülemeyen ve çözülebilen bağlantı yöntemleriyle yapılır. Cıvata, pim gibi çözülebilen bağlantı elemanları basit ve ekonomik bir tasarımın yapılmasını sağlar.

Kara, deniz, demir, hava yolu ulaşım araçlarında ve uzaya erişimi sağlayan araçlarda birleştirme elemanları olarak pimler ve civatalar kullanılmaktadır. Şekil 1.1' de, birleştirme elemanı olarak pimin kullanıldığı bağlantılara uygulanan çekme deneylerinde meydana gelen yataklama, kopma ve yırtılma hasarları görülmektedir. Bu hasarlar bir bağlantıda ayrı ayrı olabildiği gibi, toplu olarak ta bulunabilirler [1].



Şekil 1.1 Pim kullanılarak oluşturulmuş bağlantılarda meydana gelen hasarlar; a) Çekme tipi hasar, b) Kayma tipi hasar, c) Yataklama tipi hasar

Cıvata ile yapılan bağlantıların yüksek mukavemetleri, düşük maliyetli yüzey hazırlama işlemleri, kullanıldığı ortam koşullarından az etkilenmeleri, genel olarak düşük maliyetlerde imalata elverişli olmaları gibi nedenlerle tercih edilen yapılar olmalarına rağmen, malzemelerin birleştirilmesi amacıyla kullanılacak cıvataların yerleştirileceği deliklerin açılmaları, deliklerin çevrelerinde gerilme yığılmalarına neden olmakla birlikte bağlantılarda hasarlara yol açmaktadır. Oluşan hasarlara zamanında müdahale edilmezse bağlantıların işlevlerini kaybetmelerine sebep olurlar [2-3].

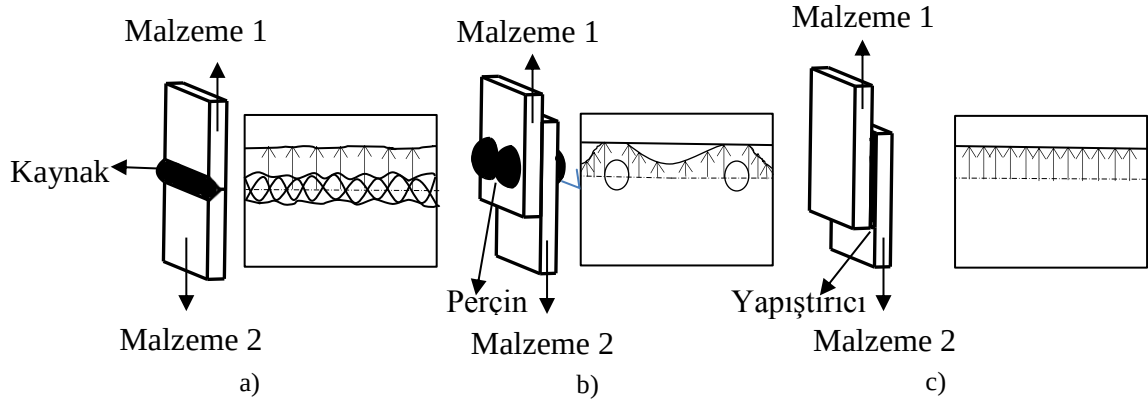
Bağlantılarda meydana gelen hasarların onarılması amacıyla yama yöntemi kullanılır. Bu yöntemde çatlak, çentik gibi hasarlar yapıştırıcı kullanılarak düşük maliyet ile giderilir [4]. Yama yönteminin, hava yolu ulaşımını sağlayan araçların iç ve gövde bölgelerinde meydana gelen hasarların onarımında kullanılması oldukça yaygındır [5]. Yama yönteminde, istenilen korozyon ve yorulma dayanımının elde edilmesi amacıyla onarım malzemeleri olarak kompozit malzemeler tercih edilirler. Kompozit malzemelerin onarım malzemeleri olarak kullanılmaları karmaşık yapıdaki malzemelerle uyumlu tasarımların elde edilmesini sağlar [6].

Kompozit yamalar ve yapıştırıcılar kullanılarak hava taşıtlarının iç ve gövde bölgelerinde meydana gelen çatlak hasarlarının onarımlarında başarılı sonuçlar elde edilmiştir [6].

Yapısal yapıştırıcıların malzemeleri birleştirmede kullanılması üretim mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Mühendisler ve tasarımcılar iki parçayı birleştirmek istediklerinde kullanacakları bağlantı yönteminin avantaj ve dezavantajlarını değerlendirmek zorundadırlar. Cıvata, çivi, perçin, lehimleme, kaynak gibi mekanik olarak birleştirmeyi sağlayan bağlantı yöntemleriyle kıyaslandığında, yapıştırıcı ile birleştirme yöntemi şekil 1.2’ de görüldüğü gibi daha üniform yük dağılımı sağlar. Yapıştırıcı ile birleştirilen bağlantılar, mekanik bağlantılarla kıyaslandığında imalat kolaylığı, yorulma özellikleri, gerilme yığılması, sızdırmazlık konularında daha avantajlıdırlar [7].

Yapıştırıcılar, malzemelerin birleştirilecek yüzeylerine sürülüp katılaşması halinde parçaları birbirine bağlarlar. Yapıştırıcılar beş farklı şekilde sınıflandırılırlar. Film yapıştırıcılar, tek bileşene sahip sıvı yapıştırıcılar ve iki bileşene sahip sıvı yapıştırıcılardır. Fiziksel hallerine göre: kağıt yapıştırıcılar, ahşap yapıştırıcılar, metal-metal yapıştırıcılar esas malzemeye göre sınıflandırılırlar. Kimyasal hallerine göre: siyanoakrilit yapıştırıcılar, epoksi yapıştırıcılar ve polikloropen yapıştırıcılar örnek verilebilir. Soğuk katılaşan yapıştırıcılar, çözücü ile katılaşan yapıştırıcılar ve erimiş halde yüzeye uygulanan ve

soğuyup katılaştığında yapışma işlemini sağlayan yapıştırıcılar, yapışma şartlarına göre sınıflandırılabilirler [7].



Şekil 1.2 Birleştirme yapılarında gerilme yığılmaları; a) Kaynak ile birleştirme, b) Perçin ile birleştirme, c)Yapıştırıcı ile birleştirme [7]

Yapıştırıcı ile birleştirilen malzemelerdeki bağlantı mukavemeti; birleştirilen parçaların kalınlığına, büyüklüğüne, mekanik özelliklerine, yapıştırıcının mekanik özelliklerine, yapışma uzunluğuna, yapıştırma işleminin uygulanmasına, bağlantının kullanılacağı ortamda maruz kalacağı koşullara sahiptirler [5].

Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde cıvata, pim, perçin, perno, çivi ve yapıştırıcı kullanılabilir. Bağlantının oluşturulmasında kullanılan birleştirme elemanının cinsine bağlı olarak, tasarımın yük altında gösterdiği performans farklıdır. Yapıştırıcı ile yapılan bağlantılar, mekanik bağlantılardan daha etkili bir yük aktarımı davranışı göstermektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Kompozit malzemeden imal edilmiş levhaların birleştirilmelerinde pimlerin kullanılması üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar incelendiğinde levha problemlerinin çözümünde deneysel ve sayısal yöntemler kullanılmıştır. Deneysel olarak çözümü zor olan problemler, son yıllarda oldukça gelişme gösteren sayısal çözüm teknikleriyle kolay ve doğru bir şekilde çözülebilmektedir. Hasarlı levha bağlantılarının onarım tasarımı, sayısal çalışma sonuçları deneysel çalışmalara kıyasla daha önemlidir [7-9].

Aktaş ve Orhan, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, levhaların birleştirilmesinde pimin kullanıldığı bağlantılardaki çatlağın ilerleme yönü ve gerilme şiddet faktörünü incelemişlerdir. Bağlantıya sonlu elemanlar yöntemini uygulayabilmek için Franc2DL programını kullanmışlardır. Levha bağlantısındaki pim deliğinin kenarlarında 2 mm uzunluğunda, 0°-180° açılarında çatlaklar oluşturmuşlardır. Çatlak ilerlemesini gösteren açılar ve gerilme şiddet faktörlerini her bir açı değeri için ayrı ayrı tespit etmişlerdir. Sayısal ve deneysel olarak bulunan, çatlak ilerlemesini gösteren açılar birbirine yakın değerler verdiklerini belirtmişlerdir [10].

Liqing ve Bingzheng, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, cıvatayla oluşturulan bağlantıdaki çeyrek elips şeklindeki köşe çatlak probleminin analizini gerçekleştirmişlerdir. Yer değiştirme korelasyon tekniğini kullanarak, gerilme şiddet faktörünü ön çatlak boyunca incelemişler ve cıvata ile delik arasındaki boşluğun gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sayısal çalışma sonucunda, gerilme şiddet faktörünün çekme kuvveti uygulanması durumunda cıvata ile delik arasındaki açıklıkla azaldığını tespit etmişlerdir [11].

Fawaz ve Anderson , sonlu elemanlar yöntemini kullanarak köşe çatlak hasarına sahip bir delikteki gerilme şiddet faktörünü araştırmışlardır ve %1' den daha düşük bir hata payıyla, maksimum gerilme şiddet faktörünün konumunu ve büyüklüğünü belirlemişlerdir [12].

Ju ve Horng, cıvatalarla oluşturulmuş bağlantıdaki bir çatlağın durumunu incelemişler ve malzeme özelliklerinin yük oranlarını etkilemediğini tespit etmişlerdir [13].

Pekbey, pim kullanarak birleştirilmiş kompozit plakalarda hasar yüklerini ve hasar durumlarını deneysel yöntemi kullanarak incelemiştir. Kompozit plaka bağlantısının bir kenarından pim deliğinin merkez noktasına olan mesafesinin pim deliği çapına oranı (E/D), ön gerilme momenti (M) ve kompozit plaka bağlantısı genişliğinin pim deliği çapına oranı

(W/D) parametrelerinin hasarın oluşmasına etkilerini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, numunede meydana gelen hasarlar ve kopma kuvvetleri tespit edilmiştir. Teste tabi tutulan numunelerde W/D ve E/D oranlarının etkilediği pim bağlantısı hasarları oluşmuştur. Son olarak ön gerilme momentindeki artışın yatak mukavemetinde artışa neden olduğunu tespit etmişlerdir [14].

Oudad ve diğerleri, üç boyutlu lineer olmayan sonlu elemanlar yöntemini kullanarak hava araçlarındaki metal kısımların kompozit yamayla onarılmasını incelemişlerdir. Çalışma sonucunda çatlak ucunda meydana gelen plastik bölgenin boyutunda kompozit yamanın küçültücü etkisi olduğunu belirlemişlerdir [15].

Albedah ve diğerleri, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, merkezi çatlağa sahip levhalarda tek ve çift yönlü kompozit malzeme yamalarının kullanımlarını incelemişlerdir. Sonuç olarak, çift yönlü yamanın kullanıldığı levhalarda gerilme şiddet faktörünün azaldığını ve dairesel yamanın uygulanmasıyla kütleli kazanımın sağlandığını tespit etmişlerdir [16].

Quinas ve diğerleri, grafit epoksi kompozit yama malzemesi kullanarak 180° açılı çentiğe ve çentiğin uç noktasında çatlağa sahip levhada gerilme şiddet faktörlerini hesaplamışlardır. Sayısal çalışma sonucunda, uygulanan yamanın yarıçapı arttıkça levha üzerindeki çatlakta meydana gelen gerilme şiddet faktörünün ve levha üzerindeki çentikte gerilme yoğunluğunun azaldığını belirlemişlerdir. Yamanın gösterdiği performansı arttırmak için kullanılan yapıştırıcının özelliklerinin değiştirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [17].

Gu ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak V şeklinde çentiğe sahip Al7075-T6 malzemesinin bir ve dört tabakalı kompozit malzeme yamalarıyla onarılmasını araştırmışlardır. Kontur integral yöntemini kullanarak, uygulanan yapıştırıcı kalınlığının, yama malzemesi kalınlığının, kompozit yamanın tabaka diziliminin gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçta, yamanın performansı üzerinde, yapıştırıcı kalınlığının ve kayma dayanımının önemli olduğunu tespit etmişlerdir [18].

Quinas ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak kompozit yama uygulamasıyla onarılmış alüminyum levhanın yük altındaki davranışlarını araştırmışlardır. Yama malzemesi kalitesinin ve geometrisinin gerilme analizi sonuçlarında etkili olduğunu tespit etmişlerdir [19].

Bezzerrouki ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak iki yapıştırıcıyı tek yönlü yamayla ve tek yapıştırıcıyı çift yönlü yamayla kullanarak, kenar kısmında çatlak

içeren alüminyum levhaların onarımını gerçekleştirmişlerdir. Uygulanan yapıştırıcı kalınlığı ve yama kalınlığı arttıkça tek yönlü yama bağlantısı performansında artış gözlemlenmişler, çift yönlü yama kullanılarak yapılan onarımın ise yapıştırıcının kayma modülünden doğru orantılı bir şekilde etkilendiğini tespit etmişlerdir [20].

Madani ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak 2024-T3 alüminyum levhadaki merkezi çatlak hasarını on iki ve on dört tabakalı grafit epoksi yamalar kullanarak onarmışlar. Onarılmış levhada meydana gelen gerilme şiddet faktörlerini araştırmışlardır [21].

Kaman ve diğerleri, üzerinde pim deliği bulunan alüminyum levhanın bir yüzünü kompozit malzeme yamasıyla onarıp, gerilme şiddet faktörünü sayısal yöntemi kullanarak hesaplamışlardır. Yama olarak kullanılan kompozit malzemedeki fiberlerin takviye açılarındaki değişimlerin gerilme şiddet faktörü üzerindeki etkisini, yapıştırıcı özelliklerindeki, levha boyutlarındaki, çatlak açılarındaki ve çatlak uzunluklarındaki değişimi incelemişlerdir [22].

Kinloch, yapıştırıcıların sertleşme yapıları ve yapıştırıcıların uygulanacağı yüzeylerin hazırlanması konularında bilgiler vermiştir. Kırılma mekaniği ve yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş bağlantıların mekanik davranışları, dinamik ve statik olarak yüklenme durumlarındaki servis ömürleri açıklanmıştır. Adhezyon olayının açıklanmasına ilişkin teorileri incelemiş sonuç olarak tek bir teorinin kullanılmasıyla adhezyon olayının ifade edilemeyeceği tespit edilmiştir. Bir başka çalışmada ise, kara ve hava taşıtları sanayisinde yapıştırıcıların ve kompozit malzemelerin kullanımlarını araştırmış, adhezyon, kohezyon, sertleşme olaylarını açıklamıştır. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların üzerindeki çevresel etmenleri incelemiş ve yapıştırma bağlantısına soyulma kuvveti uygulayarak, bağlantının dayanımı üzerindeki geometri etkisini tespit etmiştir [23-24].

Sawa ve diğerleri, iki boyutlu elastisite teorisini kullanarak, yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş malzemedeki gerilme dağılımını, elastisite modülü, uygulanan yapıştırıcı kalınlığı, birleştirilen malzemelerin kalınlığı faktörlerindeki değişim için tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, elastisite modülü ve birleştirilen malzemelerin kalınlığındaki değişimlerden, gerilme dağılımının etkilendiği belirtilmiştir [25].

Özel ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş bağlantıya dört noktadan eğme kuvveti uygulamışlar ve bağlantıda meydana gelen gerilmeleri incelemişlerdir. Sayısal çalışmadan elde edilen sonuçları deneysel çalışma sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Yapıştırıcıyla birleştirilen malzemelerin

kalınlıklarındaki değişimin bağlantı performansı üzerinde oldukça etkili olduğunu belirtmişlerdir [26].

Sawa ve diğerleri, üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, tek taraftan bindirmeli yapıştırma bağlantılarında gerilme dağılımlarını ve gerilme dalga ilerlemelerini, gerilme dağılımı ve gerilme dalga ilerlemesinin, bağlantıyı oluşturan malzemelerin elastisite modülleri, kalınlıkları, uygulanan yapıştırma uzunluklarıyla değişimlerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, kullanılan yapıştırıcının elastisite modülünün artmasıyla bağlantıdaki maksimum gerilme değerinin artış gösterdiği, malzemelerin kalınlıklarındaki ve yapıştırma uzunluklarındaki artışla gerilme dağılımındaki maksimum noktanın azaldığını tespit etmişlerdir [27].

Higuchi ve diğerleri, epoksi yapıştırıcı kullanılarak T şeklinde birleştirilmiş alüminyum malzemelere darbe eğilme momenti uygulamışlardır. Bağlantı üzerinde meydana gelen gerilme dağılımını ve gerilme dalga ilerlemesini sayısal ve deneysel olarak araştırmışlardır. Bağlantıdaki flanş uzunluğuyla uygulanan yapıştırma uzunluğu eşit olduğunda, alüminyum malzemenin elastisite modülüyle ara yüzeydeki maksimum gerilmenin ters orantılı olarak değiştiği, eşit olmadığında ise doğru orantılı bir değişim gösterdiğini belirtmişlerdir [28].

Higuchi ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, tek taraftan yapıştırılarak oluşturulmuş bağlantılara darbe eğilme momenti uygulamışlardır. Bağlantı üzerinde meydana gelen gerilmeleri sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Uygulanan yapıştırma uzunluğu, birleştirilen malzemelerin kalınlığı, yapıştırma kalınlığı ve malzemelerin elastisite modüllerindeki değişimlerle bağlantılarda meydana gelen gerilme dağılımlarını incelemişlerdir. Uygulanan yapıştırma uzunluğu ve birleştirilen malzemelerin elastisite modülleri artarken, bununla birlikte bağlantıda meydana gelen maksimum gerilmenin arttığını ancak bu gerilmenin statik eğilme momenti ile tutarlı olmadığını göstermişlerdir. Uygulanan yapıştırıcı kalınlığı azalırken ve birleştirilen malzemelerin kalınlığı artarken maksimum gerilmenin arttığını tespit etmişlerdir [29].

Mazumdar ve diğerleri, epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş kompozit malzemelerden oluşan plakaların statik ve dinamik olarak mukavemetlerini deneysel yöntemle araştırmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda, yüzeylere uygulanan yapıştırıcı kalınlığı ve bindirme uzunluğunun statik kopma mukavemeti üzerinde etkili olduklarını tespit etmişlerdir. Yapıştırıcı kalınlığının 0.33 olması durumunda maksimum kesme kuvvetinin elde edildiği ve yapıştırma bağlantısı 10^6 kez yük tekrarına maruz bırakıldığında

statik mukavemetin yaklaşık yarısı kadar bir değişimin yorulma mukavemetinde meydana geldiğini belirtmişlerdir [30].

Krenk ve diğerleri, epoksi yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş alüminyum alaşımlı plakaların statik ve yorulma mukavemetleri sayısal ve deneysel yöntemleri kullanarak incelemişlerdir. Bağlantının statik mukavemetinin 0.1 mm yapıştırıcı kalınlığında, 0.3 mm yapıştırıcı kalınlığına göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Yapıştırıcı kalınlığındaki değişimin bağlantının yorulma mukavemeti üzerinde çok etkili olmadığını belirtmişlerdir [31].

Aydın, SBT 9244 ve FM73 yapıştırıcıları kullanılarak birleştirilmiş alüminyum alaşımlı malzeme bağlantısının dört noktadan eğme ve çekme deneylerini farklı malzeme kalınlıkları ve bindirme uzunlukları için gerçekleştirmiştir. Deneylere tabi tutulan her iki yapıştırıcı bağlantısının hasar yükü ve kayma mukavemetinin yapıştırılan malzeme kalınlığından etkilendiği tespit edilmiştir. Bağlantının yük taşıma performansının malzeme kalınlığından doğru orantılı bir şekilde etkilendiği görülmüştür. Bindirme uzunluğu artırılmış her iki yapıştırıcı bağlantısında, hasar yükü ve kayma dayanımı artış göstermiştir. Dört noktadan eğme deneyine tabi tutulan FM73 yapıştırıcı bağlantısının mukavemeti bindirme uzunluğundaki artıştan fazla etkilenmezken, SBT 9244 yapıştırıcı bağlantısının mukavemeti bindirme uzunluğunun artmasıyla önemli bir artış gösterdiğini tespit etmiştir [32].

Pandey ve diğerleri, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak yapıştırma bağlantılarındaki yapıştırıcı tabakasının elastoviskoplastik davranışını sayısal olarak incelemişlerdir. Bağlantıların gerilme analizleri yapılırken, yapıştırıcı tabakasını özelleştirilmiş Von-Mises akma kriterlerini kullanarak incelemişler ve yapıştırılan malzemeleri elastik olarak kabul etmişlerdir. Bindirme uzunluğu arttıkça bağlantının kayma ve soyulma mukavemetlerinin arttığını ifade etmişlerdir [33].

Romanos, yaptığı çalışmada yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş bağlantılarda, uygulanan yapıştırıcı kalınlığına ve yapıştırma boşluğuna bağlı olarak malzemelerin bindirme bölgesinde meydana gelen gerilme değerlerinin farklı olduğunu ve bağlantıda anaerobik yapıştırıcı kullanılması halinde optimum gerilmelerin 0,05-0,15 mm aralığındaki yapıştırma boşluğu değerlerinde ortaya çıktığını tespit etmiştir [34].

Pfeiffer ve Shakal, yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş bağlantılarda, yapıştırma alanındaki değişimle bağlantı mukavemeti arasındaki ilişkiyi incelemiş, bağlantının kesme mukavemetinin yapıştırma alanıyla ters orantılı bir değişim gösterdiğini belirtmişlerdir.

Değişmenin nedeni olarak, deformasyon direncinin küçük alanlarda, büyük alanlara oranla daha yüksek olduğunu göstermişlerdir [35].

Ciba, sıcak yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş bağlantıların kesme mukavemetlerini, yapıştırma kalınlıkları ve yapıştırma boşluklarındaki değişimi araştırmış, deneysel çalışma sonucunda, yapıştırıcının birleştirilecek malzeme yüzeylerine çok ince uygulanması durumunda, yüzeylerle yapıştırıcı arasında boşluk kalabileceği ve optimum yapıştırma kalınlığının 0,05-0,15 mm aralığında olduğunu göstermiştir. Yapıştırma boşluğunun 0.1-0.5 mm aralığında olması durumunda ise kesme mukavemetinin azaldığını, sonuç olarak uygulanan yapıştırıcı kalınlığının artmasıyla kesme mukavemetinin azaldığını tespit etmiştir [36].

Liu ve Sawa, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak, yapıştırıcıyla oluşturulmuş bağlantılarda elasto-plastik gerilme analizi yapmışlar ve gerilme dağılımını tespit edebilmek için, elastisite teorisini kullanan bir formül geliştirmişlerdir. Sonuç olarak, bağlantıyı oluşturan malzemelerin elastisite modülleri arttıkça bağlantının mukavemetinin arttığını belirtmişlerdir [37].

Lee ve Lee, epoksi yapıştırıcı kullanılarak oluşturulmuş kompozit malzeme ve $R_a = 2 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü değerine sahip çelik malzemeden oluşan bağlantının 0.1-0.2 mm yapıştırma boşluğu değerlerinde maksimum mukavemet gösterdiğini tespit etmişlerdir [38].

George ve diğerleri, üç farklı malzeme anaerobik yapıştırıcı kullanılarak birleştirilmiş ve bağlantıların mekanik özellikleri, sertleşme süreçlerini incelemişlerdir. Bağlantıların oluşturulmasında kullanılan yapıştırıcının sertleşme süresi büyükten küçüğe doğru alüminyum malzeme, paslanmaz çelik, bakır malzeme olarak tespit edilmiştir. Bağlantılar kıyaslandığında, en yüksek mukavemet ve en reaktif malzemenin bakır olduğu belirtmişlerdir. Yapıştırıcının gevrek bir yapıya dönüşmemesi için, reaksiyon hızının ve sıcaklığın birlikte kontrol edilmesinin önemli olduğunu göstermişlerdir [39].

Bagheri ve Marouf, alüminyum tabakaların birleştirilmesi için kullanmış oldukları epoksi yapıştırıcıya farklı kimyasal maddeler ilave etmişlerdir. Oluşturdukları yapıştırma bağlantısında DCB (double cantilever beam) testini kullanarak yüzey kırılma enerjisini tespit etmişlerdir. DCB testinin uygulanması sonucunda, epoksinin ara yüzey kırılma enerjisinin SiC parçacıklarının eklenmesiyle azaldığı, plastik parçacıkların eklenmesiyle ise arttığını tespit etmişlerdir [40].

Yadong Zhou ve diğerkleri, mekanik birleştirmelerde kompozit malzemelerin ve yapıların en zayıf noktasının birleştirme amaçlı açılan delik olduğunu belirtmişler ve delik profilinin değişiminin gerilme dağılımı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla tek parçadan oluşan silikon karbür takviyeli karbon fiber kompozitlere sekiz farklı profile delikler açmışlar ve 6000 N yük altında profillerde meydana gelen gerilme dağılımlarını tespit etmek amacıyla ABAQUS v10 sonlu elemanlar paket programını kullanarak bilgisayar ortamında çekme testlerini gerçekteştirmişlerdir. Sonuç olarak dairesel ve yarış pisti şeklindeki profillere ait gerilme analizlerini karşılaştırmışlardır. Bu sonuçlara göre dairesel şekildeki delik tasarımı için maksimum gerilme 242.8 MPa, yarış pisti şeklinde olan delik tasarımı için ise maksimum gerilmenin 234.4 MPa olduğunu tespit etmişlerdir [41].

Bu araştırmalar ışığında, mevcut literatürden farklı olarak, kompozit malzemelerin birleştirilmesinde sıklıkla kullanılan dairesel şekilli delik profili yerine altıgen ve kare profillerin tercih edilmesi durumu incelenmiştir. Bu amaçla, üzerinde dairesel, kare ve altıgen profillerde delikler bulunan 0° yönlenme açısına sahip karbon fiber ve cam fiber kompozit malzemeler epoksi yapıştırıcı ve çözülebilir bağlantı yöntemleri kullanılarak birleştirilmiştir. Karbon fiber kompozit ve cam fiber kompozit malzemelerde oluşan gerilme yığılmalarında ve yüklenme kapasitelerinde hangi profil yapısının ve bağlantı yönteminin uygun olduğunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla sayısal ve deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda, farklı profillerdeki numunelerin bağlantıları yapıldıktan sonra çekme testi cihazında testlere tabi tutulmuşlardır. Sayısal çalışmalarda ise farklı profillerdeki numunelerin tasarımlarının yapılmasında ve çekme testlerinin uygulanmasında ANSYS 14 sonlu elemanlar paket programı kullanılmıştır. Deneysel ve sayısal çalışmaların sonuçları mukayese edilerek en uygun profil yapısı tespit edilmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzeme, metal, seramik, cam, elastomer ve polimer gibi malzemelerin en iyi özelliklerini tek bir malzemede toplamak amacıyla oluşturulmuş karma malzemedir. Genel bir tanım olarak ise; Kompozit malzeme, en az iki farklı malzemenin makro boyutlarda birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzeme olarak tanımlanabilir.

Kompozit malzemeler, her malzemede olduğu gibi çeşitli avantajlara ve dezavantajlara sahiptirler. Kompozit malzemelerin genel olarak sahip olduğu avantajlar;

- Rijitlikleri ve dayanımları yüksektir,
- Aşınma dirençleri mükemmeldir,
- Sıcaklık kapasiteleri ve korozyona dirençleri yüksektir,
- Hafif bir yapıya sahiptirler vb. sıralanabilir.

Kompozit malzemelerin genel olarak sahip olduğu dezavantajlar;

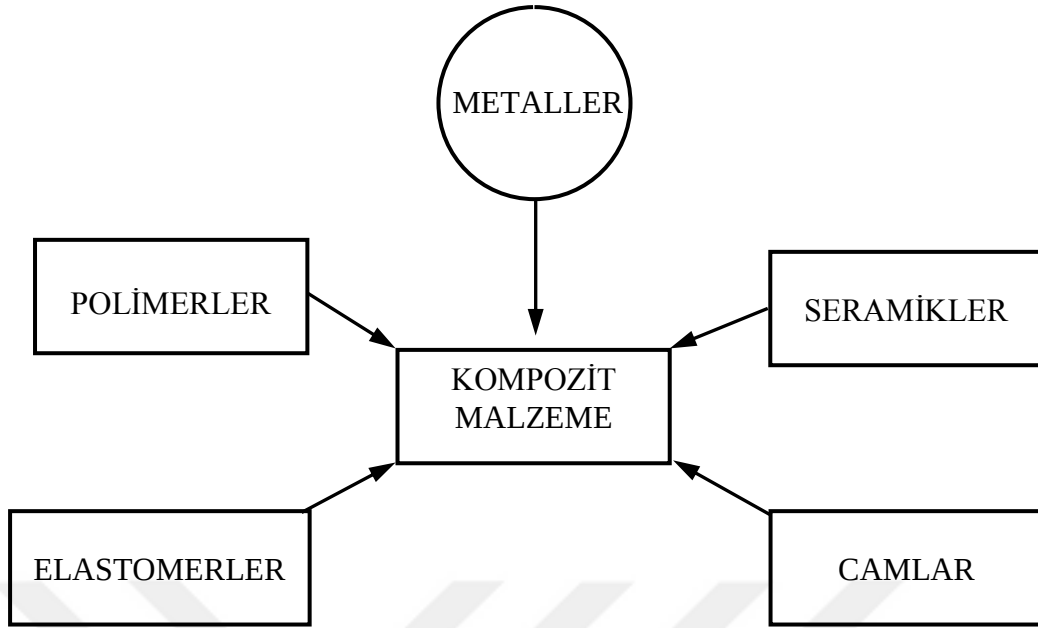
- Geri dönüşümlerinin yapıpıp tekrar kullanılmaları mümkün değildir,
- Üretim işlemleri zordur ve pahalıdır,
- Yüksek yüzey kalitelerinin elde edilmesi için gerekli olan işleme işlemleri maliyetlidir, zordur ve verimli değildir.

Planlanan özelliklere sahip bir malzeme elde etmek için, üretim yapılırken malzemenin yapısını oluşturan bileşenlerin mekanik özellikleri, kullanılan üretim tekniği, takviye elemanı ve matrisin uygunluğu değerlendirilmelidir [42].

Kompozit bir yapının meydana gelmesini sağlayan temel elemanlar şekil 3.1’ de görüldüğü gibidir. Kompozit malzemeler, şekil 3.2’ de verildiği gibi birden fazla malzemenin birleştirilmesiyle elde edilirler.



Şekil 3.1 Kompozit bir yapının meydana gelmesini sağlayan temel elemanlar [42].



Şekil 3.2 Kompozit malzemenin oluşumu ve tanımlanması [42].

3.1. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozitler matris malzemesinin ve takviye elemanının türüne göre sınıflandırılabilir. Matris malzemesinin cinsine göre; seramik esaslı kompozit malzemeler, metal esaslı kompozit malzemeler, polimer esaslı kompozit malzemeler olmak üzere üçe ayrılırken, takviye elemanının cinsine göre; parçacık takviyeli kompozit malzemeler, elyaf takviyeli kompozit malzemeler ve tabakalı kompozit malzemeler olmak üzere üçe ayrılır [43].

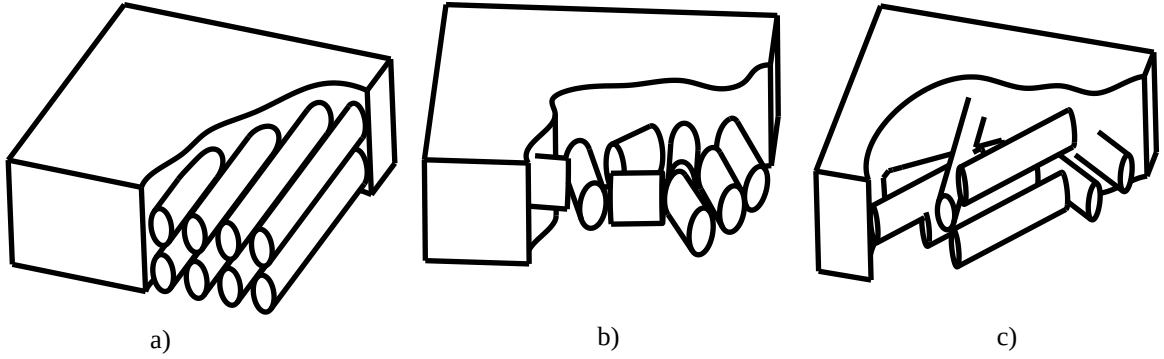
3.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Mukavemeti ve elastisite özelliği yüksek olan elyaf malzemeler, sünek ve yumuşak matris malzemeyle birleştirildiğinde uygun elyaf takviyeli kompozit malzemeler elde edilir. Uygulanan kuvvet, matris malzeme tarafından takviye elemanı olarak seçilen elyaf malzemelere iletilerek sünek ve yumuşak özellik sağlamasının yanı sıra kuvvetin büyük bir miktarını yüklenmektedir. Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, örme şekilli, şerit şekilli ve tabakalar halinde yönlü olarak kullanılır [43].

3.1.1.1. Sürekli Elyaf Takviyeli Kompozitler

Maksimum çapı 100-200 μm , minimum çapı 10-20 μm olan ve % 80 oranında hacme sahip olacak şekilde takviye elemanının fazları üretilir ve genelde tek filaman olarak kullanılırlar. Bu tür kompozitlerde matris malzeme uygulanan yükü takviye elemanı olan elyafa iletir, elyaf malzeme de yükü taşır. Elyaf malzeme açılı şekilde yerleştirildiği

için anizotropik yapılı mekanik özelliklere sahiptirler. Açılı şekilde yerleştirildiği için de farklı tür takviye elemanlarından daha iyi özelliklere sahiptirler. Şekil 3.3 a' da bu tür kompozit malzemenin yönlendirilme şekli verilmiştir [43].



Şekil 3.3 Elyaf takviyeli kompozitler; a) Sürekli elyaf takviyeli kompozit, b) Kısa elyaf takviyeli kompozit, c) Rastgele düzlemsel yönlendirilmiş kompozit [43].

Çekme kuvveti uygulanan malzemede, elyaf takviye elemanları uzun olduğundan elyaf malzemenin istikameti yönünde en iyi performansı sergilediği görülmüştür. Elyaf malzemenin istikametine dik yönde sıralandığında ise minimum performans gösterdiği tespit edilmiştir. Her iki yönde kuvvet tesiri altında kaldığında ve farklı açılar için destekleme işlemi yapıldığında ideal mekanik özelliklere sahip olur [43].

3.1.1.2. Kısa Elyaf Takviyeli Kompozitler

3-5 μm çapa ve 0.5-6 mm uzunluğa sahip olan elyaf takviye elemanları kısa elyaflar olarak değerlendirilirler. Takviye elemanı olarak bu tür elyaflar kullanıldığında ve sıvı halde bulunan malzeme ile basınçlı döküm metoduyla birleştirilmek istenildiğinde elyafın hacim oranının sıvı malzemenin akışkanlığının artmasıyla sabit kaldığı görülmüştür. Şekil 3.3 b' de bu türün yönlendirilme şekli verilmiştir [43].

Kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler, plazma püskürtme, basınçlı döküm ve toz metalürjisiyle üretilmektedir. Plazma püskürtme yönteminde, sınırlı ölçü ve şekil tesirlerinin olması dolayısıyla üretilen kompozit malzemeler, düşük mekanik özelliklere sahip olmakta, toz metalürjisi yöntemi uygulandığında ise mekanik kuvvetlerin tesiriyle elyaf takviye elemanları hasar görmektedir. Kısa elyaf takviyeli kompozit malzemeler, sürekli elyaf malzemelere göre daha düşük maliyete, yüksek şekil alma kabiliyetine ve hızlı üretim sürecine sahiptir [43].

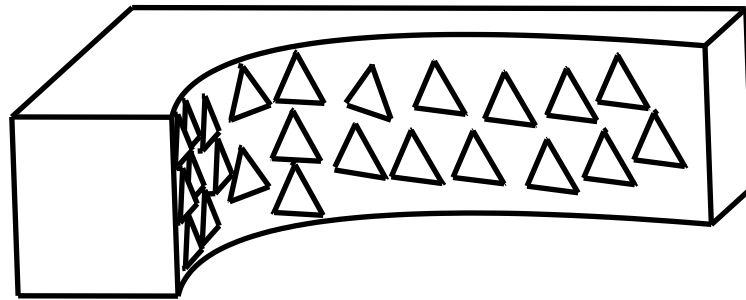
3.1.1.3. Rastgele Düzlemsel Yönlendirilmiş Kompozitler

Bu kompozit malzemeler, şekil 3.3 c 'de görüldüğü gibi matris içindeki kısa elyafların, belirli bir düzene uymadan iki boyutlu şekilde tespit edilmesiyle elde edilmektedir. Bağlayıcı olarak jöle kıvamına yakın sodyum silikat içeren karışımın kullanılmasıyla katı ön biçim almış malzeme daha sonra sırasıyla presleme ve santrifüjleme işlemleriyle sıkıştırma, kurutma en son olarak ise fırınlamaya tabi tutulur [43].

Hacim oranı, kalıplama şekli, akış alanı, elyaf boyu ve yer değiştirme, yönlendirme açısını etkilemektedir. Takviye elemanı olan elyafların kompozit malzemedeki rastgele yerleşiminin düzenine bağlı olarak elyaf hacim oranı artmaktadır. Kompozit malzemenin sahip olduğu mekanik özellikler elyaf malzemelerin istiflenme düzenine göre farklılaşır. İstifleme işleminin uygun bir şekilde yapılması halinde kompozit malzemenin her yönünde homojen özelliklerin elde edilmesi mümkün olur [43].

3.1.2. Parçacıklarla Takviyeli Kompozit Malzemeler

Boyutu olmayan mikroskobik parçacıkların, iki veya tek boyuta sahip makroskobik parçacıkların matrisle birleşiminden oluşan malzemelerdir. Bu kompozit malzemelerin oluşumunda kullanılan parçacıklar, en az % 25 elyaf hacim oranına ve 1 μm boyuta sahiptir. Alüminyum oksit ve silisyum karbür ihtiva eden parçacıklar en fazla tercih edilenlerdir. Uygulanan kuvvet, izotropik özelliklere sahip olan matris ve takviye elemanı olan elyaf tarafından taşınır. Parçacıklarla takviyeli kompozit malzemeler, parçacık içerdiği için yüksek dayanıma sahip olmamakla birlikte farklı türde bir malzeme elde etmek amacıyla üretilmiştir. Şekil 3.4' de görülen bu malzemeler beton gibi, polimer, metal, seramik karışımından oluşur ve küçük parçacıklar içermediğinden, uygun kayma özelliğine sahip değildirler.

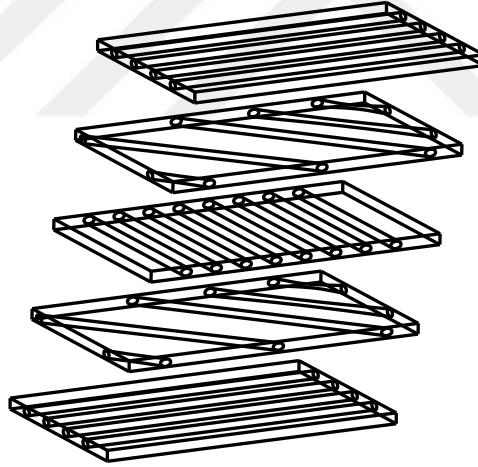


Şekil 3.4 Parçacık takviyeli kompozit [43].

Bu kompozitlerde parçacık takviyesi arttıkça gözeneklilik hatası da buna bağlı olarak artış göstermektedir. Gözeneklilik hatasının giderilmesi amacıyla da haddeleme benzeri işlemler yapılmaktadır. Toz metalürjisi yöntemi kullanılarak üretilen kompozit malzeme, matris elyaf birleşiminin homojen olmaması ve parça boyutu tesirinden dolayı döküm yöntemi kullanılarak yapılan üretimden dayanım olarak daha azdır. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin özellikleri ve birleştirme oranları parçacık takviyeli karma malzemenin özelliklerini belirler [43].

3.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Şekil 3.5’ de oluşum yapısı verilen tabakalı kompozitler, farklı istifleme açlarına sahip tabakaların üst üste yerleştirilmesiyle elde edilmektedir. Tabakalı kompozitler, farklı açılarda istiflenmiş elyafların, çeşitli elyaflar ihtiva eden takviyelerin ya da tek yöne sahip elyafların matris malzeme içerisinde yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Tabakaların istiflenme açısının ve sırasının, maruz kalacağı kuvvete bağlı olarak değişmesi mümkün olduğundan rijitlik ve mukavemet açısından avantajlıdır. Kompozit malzemeyi oluşturan tabakaların açısı ve istiflenme sırası arzu edildiği gibi yapılabilir.



Şekil 3.5 Tabakalı kompozitler [43].

Şekil 3.5’de görüldüğü gibi tabakalı kompozitlerin dış kısmındaki tabakalar iç kısımlardakine göre 0.5 kat daha fazla mukavemet göstermekle birlikte iç kısımlardaki tabakaların eğilme dayanımı belirlenememektedir [43].

3.2. Sandviç Malzemeler

Kompozit malzemeler tek parça veya sandviç yapıya sahiptirler. Tek parça yapı, cam, aramid, karbon ve elyaf, reçine katmanlarından oluşurken sandviç yapı ise, dış ve iç kısımdaki elyaf tabakalar ve bunların arasındaki sandviç malzemedir. Sandviç

yapıda kalınlık arttırılarak form direnci elde edilir ve tek parça yapıya sahip kompozite göre hafiflik ve mukavemet alanlarında avantaj sağlar. Sandviç malzemeler kullanım alanına ve uygulama tipine bağlı olarak farklı özellikler göstermekle birlikte çeşitli malzemelerle kullanılmaya uygundur.

3.2.1. Sandviç Malzemelerin Çeşitleri

Sandviç malzemeler, yüzey ve çekirdek kısımlarından oluştuğu için tek bir yapı olarak sınıflandırmaya tabii tutulamazlar. Fakat ihtiva ettiği kısımlar sınıflandırmaya uygundur.

3.2.1.1. Yüzey Çeşitleri

Yüzey kısmında kullanılan malzemeler kullanılma yerine göre ağırlıklı olarak cam veya fiber takviyeli plastik yapılar olmakla birlikte nadir olarak paslanmaz çelik, çelik ve alüminyumdur. İstenilen mukavemeti sağlaması için kullanılan kuvvetlendirici elyaflar ise kendi başlığı altında ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Cam elyaflar; Kompozit panellerinde ilk olarak cam elyaflar kullanılmıştır. R, E, S olarak isimlendirilen farklı mukavemet değerlerine sahip cam elyaflar bulunmaktadır ve kullanımı, reçine özümsemesi oldukça elverişlidir.

Aramid elyaflar; Aramid elyafların kullanımı en yaygın olanı Dupont de Nemours' un 1960'ların sonlarında piyasaya arz ettiği kevlar aramidlerdir. Çeliğin çekme mukavemetinden beş kat daha üstün bir mukavemete sahip olan aramid elyaf, bu özelliğinden ötürü balistik korumada tercih edilmektedir ve bu avantajlarından dolayı çeşitli türlerde aramid elyaflar üretilmiştir. Sürtünme, aşınma ve çekme mukavemetleri avantaj sağlamasına rağmen basma mukavemeti ve yoğunluğunun düşük olması, sudan kaçınma özelliğinin naylon altyapıya sahip olması dezavantajlı özellikleridir. Ayrıca reçinenin çok kaliteli bir yapıya sahip olması durumunda bile elyaf oranı %50'yi geçmemektedir ve depolanması durumunda rutubet aldıklarında ıslanma olarak adlandırılan işlem zorlaşacağından yapı zarar görecektir.

Karbon elyaflar; Aramid ve cam elyaflardan mukavemet açısından üstündürler ve düşük ağırlıklarda özellikle darbelerin etkisi altında kalması durumunda rijit yapı sağlarlar. Kırılgan bir yapıya sahip olması ve uzama seviyesinin düşük olmasından ötürü problemler ortaya çıkmasına rağmen son gelişmelerle birlikte uzamalı karbon elyaflar geliştirilmiş olup yaşanan problemlerin önüne geçilmiştir. Karbon elyafların plastik yapıya sahip matris içerisindeki ıslanabilme kabiliyeti uygundur.

Boron elyaflar; Boron elyaflar metal takviyeli kompozitlerde kullanılırlar. Yüksek ısı altında çok iyi mukavemet göstermesi istenilen türbin kanatları gibi yerlerde matris olarak alüminyum oksit kullanmak suretiyle boron elyaflardan yararlanılır.

Diğer plastik elyaflar; Naylon ve polietilen elyaflar, kompozit malzemelerde kullanılma amacına bağlı olarak nadiren kullanılmaktadırlar.

3.2.1.2. Reçine Çeşitleri

Kompozit malzemelerde ilk kez matris olarak reçineler kullanılmıştır ve reçine çeşitlerinin özellikleri başlıklar halinde sırayla açıklanmıştır.

Polyesterler; Islak yatırma işlemi için uygun olan bu malzemeler katılaşması sürecinde çoğuzlaşması ekzotermik tepkimeyle gerçekleşmektedir. Bu işlemin gerçekleşmesi esnasında solventi stiren monomeri ortaya çıkar. En çok kullanılan polyester çeşitleri genel amaçlı dayanım sağlayan izoftalik veya kimyasal dayanımı sağlayan ortoftaliktir. Aşındırıcı ve sulu ortamlarda katkısız olarak, polyesterin mukavemeti avantaj sağlamaz. Saf polyesterin imalat ortamında çalışma süresi ortalama 35 dakikadır. Çalışma süresinin uzatılması ancak önleyici maddeler ilave edilmesiyle mümkün olur. Reaksiyon esnasında ekzotermik tepkime göstermesi ve tepkime hızının kontrolünün zor olması imalat sürecinde dezavantaj sağlar.

Vinilesterler; Bu malzemeler polyester malzemelerde olduğu gibi, ıslak yatırma işlemi için uygundur ve katılaşması sürecinde çoğuzlaşması ekzotermik tepkimeyle gerçekleşmektedir. Bu işlemin gerçekleşmesi esnasında solventi stiren monomeri ortaya çıkmakla birlikte önleyici maddeler vasıtasıyla çalışma süresi ortalama 11 saate kadar arttırılabilir. Böylece vakum etkisi altında yapılan geniş yüzey uygulamalarının gerçekleştirilmesi mümkün olur.

Epoksiler; Epoksi reçine, sertleşme esnasında vinilester ve polyester gibi davranış göstermekle birlikte tepkimenin gerçekleşmesi esnasında monomer açığa çıkmaz. İmalat ortamında çalışma süresi ise 25 °C sıcaklıkta ortalama 15 saattir. 0 °C altında karışım halinde en fazla iki ay depolanabilir.

3.2.1.3. Çekirdek Çeşitleri

PVC köpükler; Su soğurma direnci iyi olan pvc köpükler en çok tercih edilen çekirdek malzemesi olup 40-300 kg/m³ aralığında yoğunluğa sahiptirler. Pvc köpükler yapılarına göre şu şekilde incelenebilir;

- Doğrusal yapıya sahip pvc köpük, yapısında değişme meydana gelebilir, mukavemet özellikleri değişmez ve yüksek ısıya direnç gösterebilir.

- Çapraz bağlı yapıya sahip pvc köpük, kırılğan yapıya sahiptir.

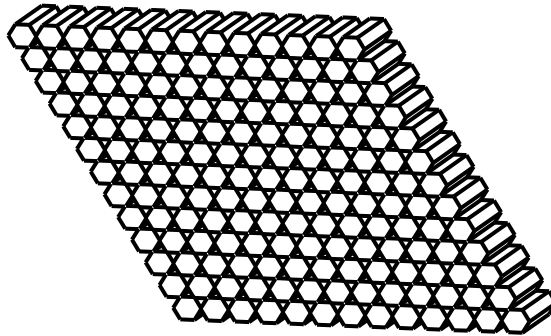
Balsa; Yüzeyle doksan derece açı yapacak şekilde kesilen balsa ağacı çekirdek malzeme olarak kullanılır. Bu ağaç kullanılarak yapılan malzemeler balsa çekirdekli sandviçler olarak adlandırılır ve ani kırılmalara, büyük boyutlara, rijitliğe sahiptirler. Yüksek yoğunluklu ve doğal bir malzeme kaynaklı olduğundan pvc' nin sağlamış olduğu geniş seçim aralığını sunmaz ve standartlaştırmaya imkan vermez.

Tahta; Lamine ve kontrplak biçime sahip olan ve basma dayanımına maruz kalan yerlerde çekirdek malzemesi olarak kullanılırlar. Standartlaştırılması balsaya nazaran avantaj sağlarken, ağırlığı çalışmalarda olumsuz etki sağlar.

Bal peteği (Honeycomb); Kompozit veya metalik yapıya sahip olan bal peteği, metalik yapıya sahip olduğunda çok ince alüminyum malzemeden, kompozit yapı tercih edildiğinde ise naylon, kağıt, fenolik veya epoksi reçineden üretilirler. Dış yüzeylere uygulanması basit olmamakla birlikte ağırlıklarına göre mukavemetleri oldukça iyidir. Eğime sahip yüzeylerde uygulanması gerektiğinde ise özel teknikler uygulanmalıdır. Bal peteği yapılarından aleve ve ısıya üstün dayanım sağlayan nomex en çok tercih edilenlerdendir.

3.3. Petekli Yapılar

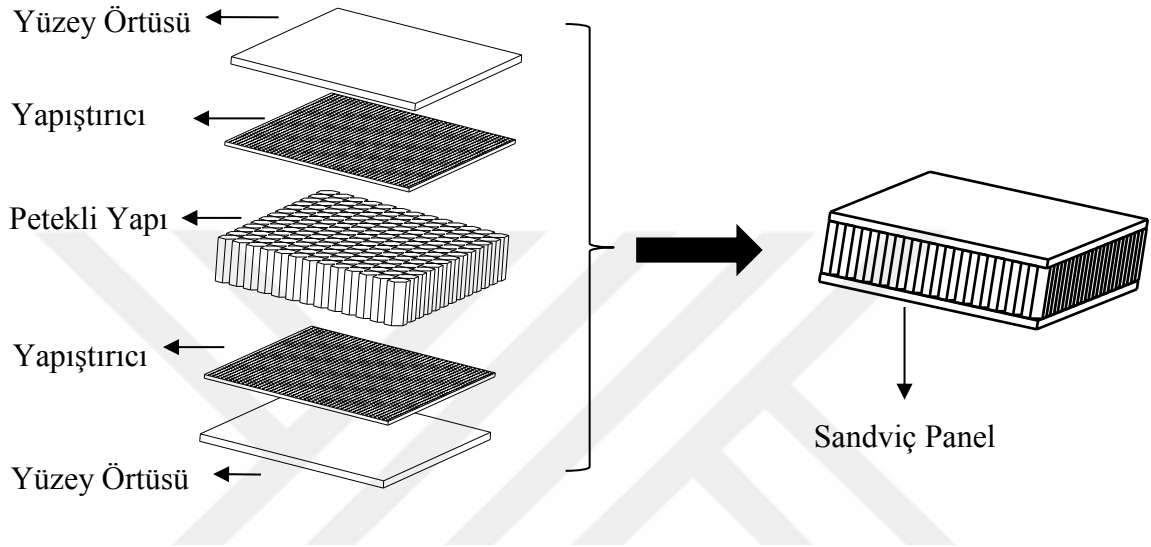
İnce bir yapıya sahip olan tabakalara altıgen şekil verilmesi ve birleştirilmesiyle elde edilen, bal peteğine benzeyen yapısı nedeniyle petekli yapı olarak isimlendirilir ve kompozit yapı imalatı için kullanılır. Hava sanayisinde uçakların gövde kısmı için 1940'lı yıllardan itibaren tercih edilmiştir. Şekil 3.6'da görüldüğü gibi petekli yapıya sahip hücreler yapıştırıcıyla birleştirilerek elde edilirler.



Şekil 3.6 Altıgen hücreli petekli yapı [44].

Dolgu elemanı amacıyla sandviç yapıda kullanılan petekli yapılar şekil 3.7'de görüldüğü gibi sandviç yapının üst ve alt yüzeylerine yüzey örtüleri yardımıyla

yapıştırılarak sandviç paneller elde edilir. Metal hücre yapısına sahip olan titanyum, nikel alaşımlı metal, çelik gibi malzemelerden elde edilen petekli yapıların birleştirilmesinde lehim ve kaynak kullanılır. Metal hücrelerden oluşan petekli yapılar sıcaklığın yüksek olduğu uygulamalarda tercih edilirler. Uzay, deniz ve hava sanayi gibi yüksek mukavemet gerektiren sektörlerde kullanılan petekli yapılar oldukça hafif olmasına rağmen farklı türdeki sandviç yapılardan daha maliyetlidir ve üretimi özel işçilik gerektirmektedir [44].



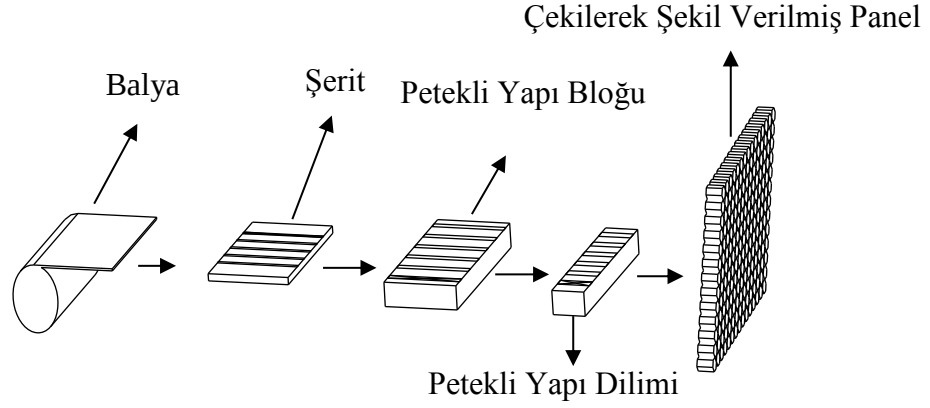
Şekil 3.7 Sandviç panelin yapıştırılarak elde edilmesi [44].

3.3.1. Petekli Yapı Üretim Yöntemleri

Petekli yapılar en çok uzatma ile şekil verme ve kıvrırma ile şekil verme suretiyle iki şekilde üretilirler. Bu yöntemler aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

3.3.1.1. Uzatarak Şekil Verme Yöntemi

Petekli yapıların üretiminde en çok tercih edilen bu yöntem hem metal hem de metal olmayan, şerit şekle sahip petek hücrelerinin üretiminde kullanılırlar. Bu yöntemle üretimde sırasıyla; Şerit şeklinde levha malzemeler kesilir, birleştirilecek yüzeylere yapıştırıcı sürülür, levha malzemeler üst üste dizilir ve elde edilen petekli yapı bloğu uygun sıcaklıkta preslenir ve işlenmeye başlanır. Fakat alüminyum bloklar çekme işlemine tabii tutulacağı zaman uygun şeritlere ayrılırlar ve çekme işlemine başlanır. Çekme işlemi esnasında her dilim plaka, yanındaki hücreye temas etmediği kısımda akma göstermekte ve bu işlem sonunda şerit levhadan istenilen biçim elde edilmiş olur. Bu yöntemle ilişkin üretim aşaması şekil 3.8’ de verilmiştir ve farklı metaller için uygulanması mümkündür.

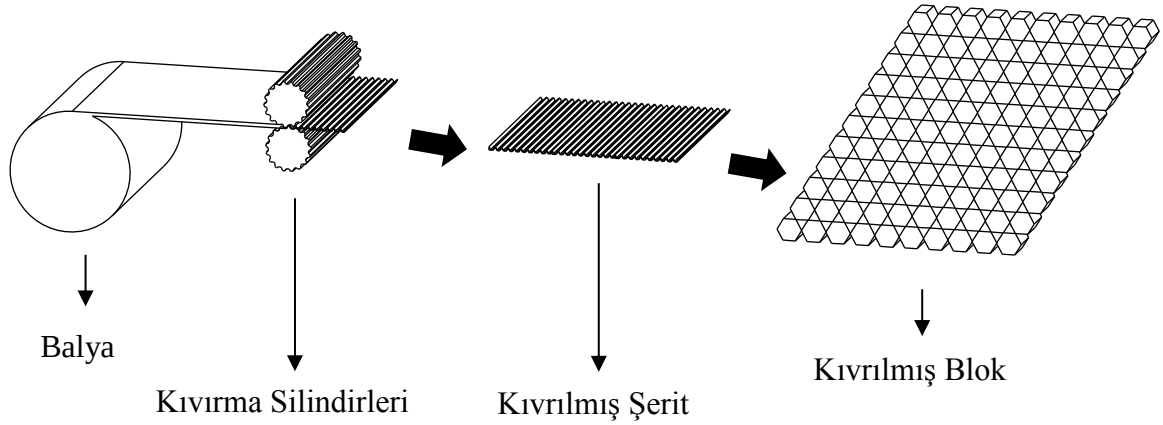


Şekil 3.8 Uzatarak şekil verme yöntemi ile petek hücre üretimi [44].

Şerit levhaların metal olmaması halinde ise yapıştırma işleminden önce korozyon önleyici işlem uygulanması gerekmez. Fakat metal olmayan malzemelerde ise gerekli reçine miktarının sağlanması amacıyla doyurma işlemi gerekir. Metal olmayan petek yapı malzemesi metal olanların aksine istenilen kalıba uygun şekil alması amacıyla çekme işlemine tabii tutulduğunda şekillerini muhafaza edemezler. Şerit levhaların metal olmaması halinde üretim sırası ise şu şekildedir; Süresi uzun olan kalıplama işlemi yapılır ve istenilen şekil oluşuncaya kadar fırında ısıya tabii tutulur, sonrasında çekme ve ısıtma işlemi geçirmiş olan blok, sıvı halde bulunan reçineye istenilen yoğunluk elde edinceye kadar daldırılır ve arzu edilen hücre yapısı meydana gelinceye kadar ısıya maruz bırakılır. Son olarak bu bloklara kesilme işlemi uygulanır [44].

3.3.1.2. Kıvrırma Yöntemi

Kıvrırma yöntemi kullanılarak yüksek yoğunluklu, kalın ve sıcaklığı yüksek olan çalışma ortamlarında kullanılan petekli yapılar üretilir. Bu yöntemin uygulanması sırasıyla; Şerit levhalar Şekil 3.9’ da görüldüğü gibi kıvrırma silindirleri vasıtasıyla kıvrılır ve birleştirme noktalarından yapıştırıcıyla birleştirilir. Sonrasında istenilen şekli almış şerit levha malzemeler üst üste yerleştirilir. Bu sayede arzu edilen blok yapı elde edilir ve uygun sıcaklıkta muhafaza edilir. Kullanılacak yere göre uygun dilimlerde kesilir ve temizleme, ekleme yapma gibi işlemler uygulanır.



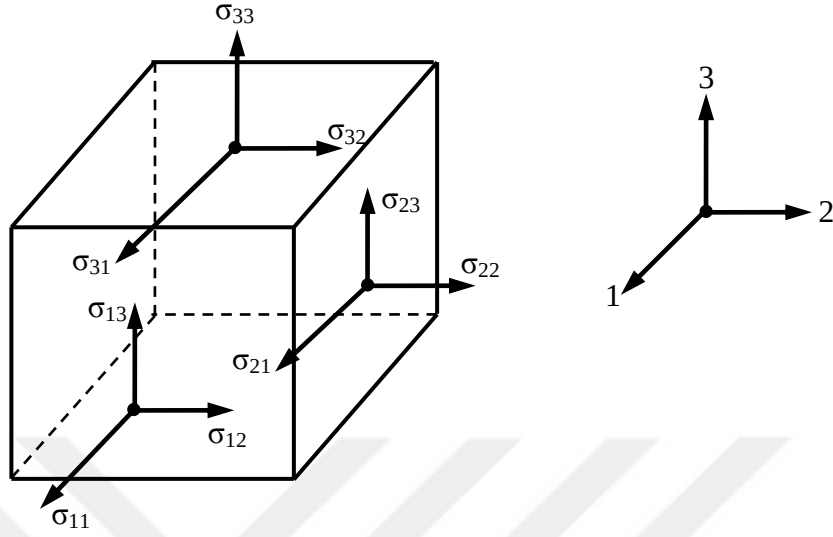
Şekil 3.9 Kıvrırma yöntemi ile petekli yapı hücre üretimi [44].

3.4. Kompozit Tabakaların Makromekanik Analizi

Matris/elyaf takviyeli bir kompozit malzemenin kalınlığı, lamine özelliklerine, kompozit malzemenin üretim tekniğine, kompozit tabakaların özelliklerine, düz, çok katlı veya farklı yönlü elyafların düzenlenmesine bağlıdır. Lamine kompozit analizi yapılırken matris ve elyaf arasında tam bir bağın olduğu varsayımı yapılır. Eğer elyaflar uygun bir şekilde yerleştirilirse, polimer matriste meydana gelen gerilme dağılımındaki sürünme etkisi azaltılabilir. Yük uygulanmış kompozit malzemedeki elyaf oranı az ise matristeki sürünme etkisi oldukça fazla olur. Fakat kompozit malzemedeki elyaf oranı artarsa yükün daha az kısmı matris tarafından taşınır. Yükün uygulandığı kompozit malzemelerde, gerilme-şekil değiştirme bağıntılarının geliştirilmesi için, kompozit malzemelerin basma ve çekme özelliklerinin aynı olduğu ve lineer elastik özellik gösterdiği varsayımları yapılır [37].

3.4.1. İzotropik Tabaka

Kompozit malzemeleri meydana getiren bileşenlerin özellikleri ve mikro-yapısal şekilleri değiştirilerek, farklı mekaniksel özellikler elde edilebilir. Kompozit malzemenin yapısını oluşturmada kullanılan elyafların yönlenmiş halleri makroskobik ölçüde incelenir. Bütün doğrultularda aynı malzeme özelliklerini gösteren kompozit malzeme şekil 3.10' da gösterildiği gibi gerilmelere maruz kalabilir. [42].



Şekil 3.10 Üç boyutlu gerilme sistemi [42].

Hooke kanunu bağıntıları;

$$\sigma_{11} = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} \right\} \cdot [\epsilon_{11} + \nu \cdot \epsilon_{22}] \quad (3.1)$$

$$\sigma_{22} = \left\{ \frac{E}{1-\nu^2} \right\} \cdot [\epsilon_{22} + \nu \cdot \epsilon_{11}] \quad (3.2)$$

$$\sigma_{12} = \left\{ \frac{E}{(1-\nu^2)^2} \right\} \cdot [\epsilon_{12}] \quad (3.3)$$

yazılabilir. Matris formunda ifade edilir ise;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & Q_{13} \\ Q_{21} & Q_{22} & Q_{23} \\ Q_{31} & Q_{32} & Q_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$[\sigma] = [Q] \cdot [\epsilon] \quad (3.5)$$

şeklinde yazılır. (3.4) ve (3.5)'teki eşitliklerden;

$$Q_{12} = Q_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (3.6)$$

$$Q_{12} = Q_{21} = \frac{E \cdot \nu}{1-\nu^2} \quad (3.7)$$

$$Q_{13} = Q_{23} = Q_{31} = Q_{32} = 0 \quad (3.8)$$

$$Q_{33}=Q_{22}=\frac{E}{2 \cdot (1+\nu^2)}=G \quad (3.9)$$

denklemleri yazılabilir.

Denklem (3.4) ve (3.5) kullanılarak türetilmiş denklemler, düzlem gerilmeye maruz kalmış bir izotropik malzemeyi karakterize etmek için iki elastik sabitin olması gerektiğini göstermektedir. Denklem (3.9)' da, E: Elastisite modülü, G: Kayma modülü ve ν : Poisson oranını temsil etmektedir. İzotropik malzemelerdeki kayma modülü (3.9) eşitliğinde görüldüğü gibi diğer iki elastik özelliklerin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir [27].

Eşitlik 3.1' e karşılık gelen uzama ve gerilme denklemleri olarak;

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$[\epsilon] = [S] \cdot [\sigma] \quad (3.11)$$

yazılabilir. Burada;

$$S_{11}=S_{22}=\frac{1}{E} \quad (3.12)$$

$$S_{12}=S_{21}=-\frac{\nu}{E} \quad (3.13)$$

$$S_{33}=\frac{1}{G} \quad (3.14)$$

olur. Denklem (3.4)' te verilen, Q ile temsil edilen kare matris, malzeme matrisi olarak isimlendirilir. Bu kare matrisin bileşenleri, malzemenin sahip olduğu elastik özelliklerin bir fonksiyonudur. Q , uzama ve gerilme vektörleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. (3.10) eşitliğinde S ile gösterilen kare matris ise uyum matrisi olarak isimlendirilir ve Q matrisinin tersidir.

3.4.2. Ortotropik Tabaka

Bir kompozit malzemenin yapısını oluşturan elyaflar, tek yönlü sürekli olarak yerleştirilirse elyaf eksenine paralel doğrultuda yüksek elastisite modülü ve yüksek mukavemet elde edilecektir. İki yönlü doğrultuda yerleştirilmesi durumunda ise, elyaflar hem eksene dik yönde hem de eksene paralel bir şekilde konumlandırıldığı için iki ortogonal yönde de elastisite modülü ve mukavemet eşit olur.

Hooke kanunu bağıntıları;

$$\sigma_{11}=Q_{11} \cdot \varepsilon_{11}+Q_{22} \cdot \varepsilon_{22} \quad (3.15)$$

$$\sigma_{22}=Q_{12} \cdot \varepsilon_{11}+Q_{22} \cdot \varepsilon_{22} \quad (3.16)$$

$$\sigma_{12}=Q_{33} \cdot \varepsilon_{12} \quad (3.17)$$

yazılabilir. Burada;

$$Q_{11}=\frac{E_{11}}{(1-v_{12} \cdot v_{21})} \quad (3.18)$$

$$Q_{22}=\frac{E_{22}}{(1-v_{12} \cdot v_{21})} \quad (3.19)$$

$$Q_{12}=Q_{22}=\frac{v_{21} \cdot E_{11}}{(1-v_{21} \cdot v_{12})}=\frac{v_{12} \cdot E_{22}}{(1-v_{12} \cdot v_{21})} \quad (3.20)$$

$$Q_{33}=G_{12} \quad (3.21)$$

olur. Burulmaların meydana geldiği doğrultulara göre, ortotropik tabakada gerilmeler ve kayma modülü tanımlanır. Kompozit malzemenin ortotropik yapıya sahip olması durumunda ifade edilmesi için tam bağımsız, dört adet elastik sabit kullanılır ($E_{11}, E_{22}, v_{12}, G_{12}$) [42].

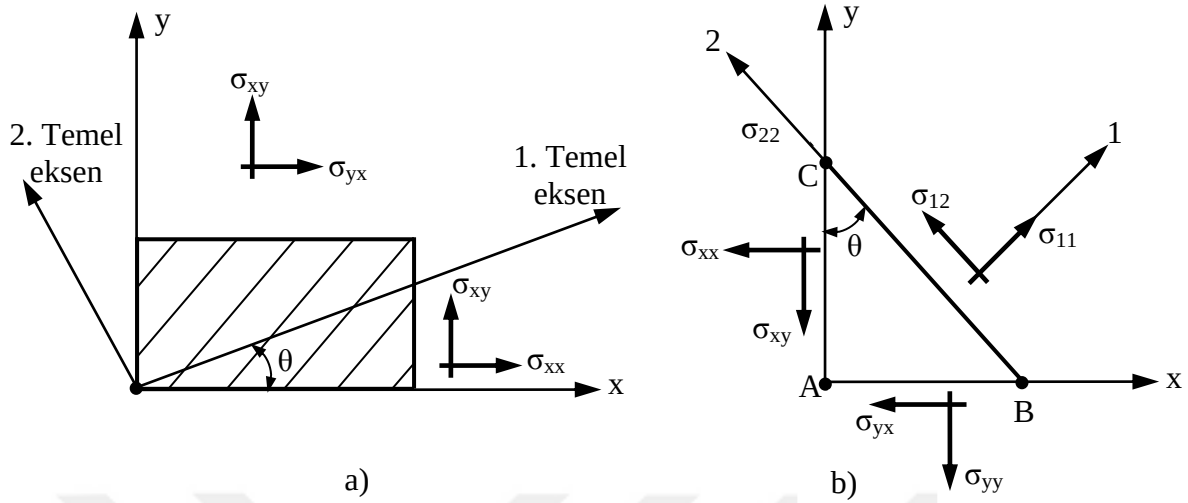
Burada;

$$S_{11}=\frac{1}{E_{11}} ; \quad S_{22}=\frac{1}{E_{22}} ; \quad S_{33}=\frac{1}{G_{12}} \quad (3.22)$$

$$S_{12}=-\frac{V_{21}}{E_{22}}=-\frac{V_{12}}{E_{11}} \quad (3.23)$$

1 doğrultusunda kuvvet uygulandığında, 2 doğrultusundaki uzamayı ifade etmek amacıyla V_{12} kullanılır (şekil 3.10). Eksenlerin keyfi seçilmesi durumunda, uzamalar ve gerilmeler arasındaki bağıntının oluşturulması için kompozit malzemenin temel eksenine θ açısı kullanılarak yönlendirme yapılır.

3.4.2.1. Gerilme Bağıntıları



Şekil 3.11 Referans eksenleri hakkında ortotropik tabaka doğrultusu a) referans eksenleri (x, y) θ doğrultusunda tabakanın esas eksenleri (1, 2), b) (1, 2) ve (x, y) eksenlerinde gerilim altındaki bir eleman [42].

Şekil 3.11'de 1 yönündeki kuvvetlerin çözülmesiyle elde edilen denge denklemi;

$$\sigma_{11} \cdot BC - \sigma_{xx} \cdot \cos\theta = -\sigma_{yy} \cdot AB \cdot \sin\theta = -\sigma_{xy} \cdot AC \cdot \sin\theta - \sigma_{yx} \cdot AB \cdot \cos\theta = 0 \quad (3.24)$$

yazılabilir.

$AC = AB \cdot \cos \theta$, $AB = BC \cdot \sin \theta$ ve $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$ olduğundan dolayı;

$$\sigma_{11} = \sigma_{xx} \cdot \cos 2\theta + \sigma_{yy} \cdot \sin 2\theta + \sigma_{xy} \cdot 2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \quad (3.25)$$

elde edilir [18].

2 doğrultusundaki kuvvetler çözümlenirse;

$$\sigma_{12} = -\sigma_{xx} \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta + \sigma_{yy} \cdot \cos 2\theta + \sigma_{xy} \cdot (\cos 2\theta - \sin 2\theta) \quad (3.26)$$

halini alır. Benzer olarak;

$$\sigma_{22} = \sigma_{xx} \cdot \sin 2\theta + \sigma_{yy} \cdot \cos 2\theta - \sigma_{xy} \cdot 2 \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \quad (3.27)$$

yazılabilir. Böylece, (x,y) referans eksenlerindeki ve (1,2) temel eksenlerdeki gerilmeler matris formunda;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

şeklinde yazılabilir. [T] matrisinin dönüşümü ise;

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -2mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -2mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitliklerde; $m = \cos \theta$ ve $n = \sin \theta$ ' yı göstermektedir.

3.4.2.2. Şekil Değiştirme Bağlılıkları

Şekil 3.12' de görülen OFAE, 0-1 doğrusunun 0-x doğrusuyla θ açısı yaptığı zaman oluşan $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}, \epsilon_{xy}$ uzamaları altında olan bir elemandır. 1-2 eksenleriyle, x-y eksenleri arasındaki bağıntı elde edilirse, x ve y doğrultularında meydana gelen kayma ve normal uzamalar;

$$\epsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3.32)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.33)$$

$$\epsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (3.34)$$

yazılabilir. OFAE elemanı gerilmenin etkisi altında kaldığında, OA doğrusu deformasyona uğrayarak OC doğrusu haline gelir. Bu yüzden 1-2 ya da x-y koordinat doğrultularında yer değiştirme ifade edilebilir. x-y eksen takımında A noktasının C noktasına göre koordinat durumu AB, BC iken 1-2 eksen takımında A noktasının C noktasına göre koordinat durumu AD, CD olur. Böylece;

$$AB = \frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y \quad (3.35)$$

$$BC = \frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \quad (3.36)$$

yazılabilir. Şekil 3.11'deki transformasyon bağıntısı kullanılarak;

$$\begin{bmatrix} A & D \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} mn \\ -nm \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

yazılabilir. Bu yüzden;

$$AD = \cos\theta \cdot \left[\frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y \right] + \sin\theta \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \right] \text{ olur.} \quad (3.38)$$

$$CD = -\sin\theta \cdot \left[\frac{\partial u}{\partial x} \delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \delta y \right] + \cos\theta \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial x} \delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \delta y \right] \text{ ve} \quad (3.39)$$

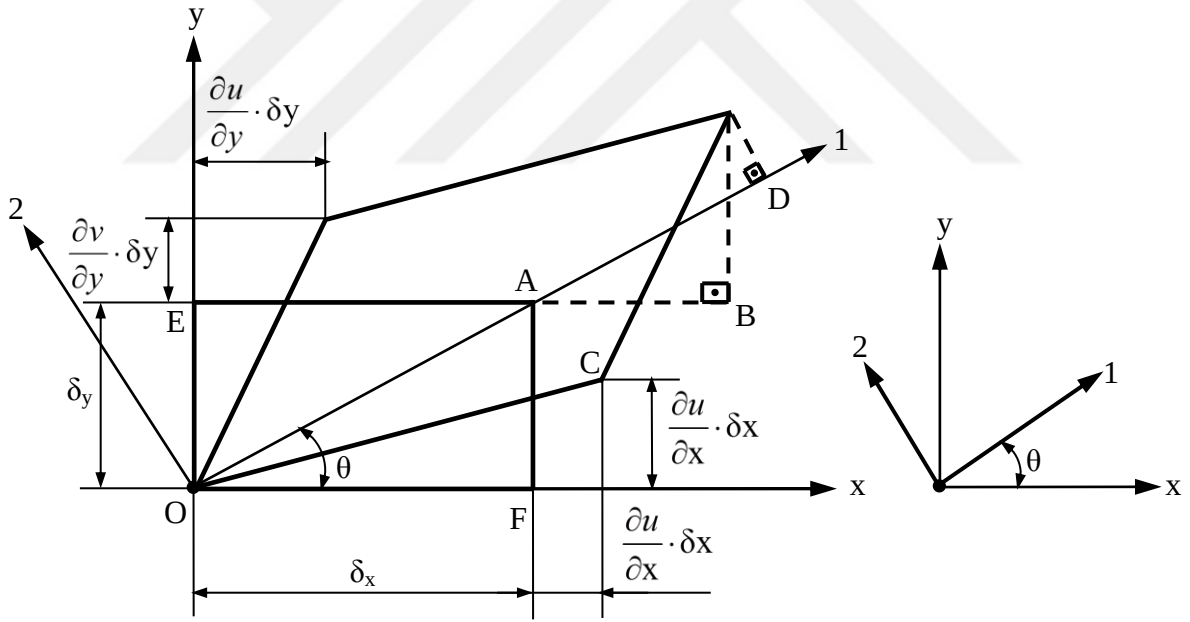
$$\epsilon_{11} = \frac{AD}{OA} = \cos\theta \cdot \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\delta x}{\delta s} + \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\delta y}{\delta s} \right] + \sin\theta \cdot \left[\frac{\partial v}{\partial x} \frac{\delta x}{\delta s} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{\delta y}{\delta s} \right] \quad (3.40)$$

$$OF = \delta x, OE = \delta y, OA = \delta s \text{ ve } \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & n \\ -n & m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \text{ yazılabilir.}$$

Burada, $OA = \delta s$ ve $\frac{\delta x}{\delta s} = \cos\theta$, $\frac{\delta y}{\delta s} = \sin\theta$ olduğundan dolayı,

$$\epsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x} \cdot \cos^2\theta + \frac{\partial v}{\partial y} \cdot \sin^2\theta + \left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right] \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta \quad (3.41)$$

elde edilir.



Şekil 3.12 Normal ve kayma uzamaları altında deformasyona uğrayan bir eleman [27].

(3.32) ve (3.34) eşitliklerindeki uzama değerleri (3.40) eşitliğinde yerine yerleştirilirse;

$$\epsilon_{11} = \epsilon_{xx} \cdot m^2 + \epsilon_{yy} \cdot n^2 + \frac{\epsilon_{xy}}{2} \cdot 2mn \quad (3.42)$$

Benzer şekilde ϵ_{22} ,

$$\epsilon_{22} = \epsilon_{xx} \cdot n^2 + \epsilon_{yy} \cdot m^2 - \frac{\epsilon_{xy}}{2} \cdot 2nm \text{ ve } \frac{\epsilon_{12}}{2} = -\epsilon_{xx} \cdot mn - \epsilon_{yy} \cdot nm + \frac{\epsilon_{xy}}{2} (m^2 - n^2) \quad (3.43)$$

halini alır. Bu yüzden matris şeklinde yazılmış (3.44) eşitliğinde x, y referans eksenleri ile esas eksenler gerilmelerle birleşir.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12}/2 \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy}/2 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

Burada; [T]: (3.24), (3.25) denklemlerinde verilen matrisin dönüşümü yapılarak elde edilmiştir ve ;

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy}/2 \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12}/2 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

şeklinde yazılabilir.

3.4.2.3. Gerilme- Şekil Değiştirme Bağlılıkları

x-y eksen takımında, şekil değiştirme ve gerilme arasındaki bağıntılar, 1-2 esas eksen takımındaki malzeme özelliklerine bağlı olarak;

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = [S] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = [Q] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

(3.29) ve (3.47) eşitliklerinden;

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

yazılır. (3.28) ve (3.46) eşitliklerinden;

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = [S] \cdot [T] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

elde edilir. (3.44) ve (3.45) denklemlerinin yarı kayma uzamasından tam kayma uzamasına dönüşümlerinin yapılması için, [T] matris, [R] ve $[R]^{-1}$ ile sırasıyla çarpılır. Burada R;

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

olur.

Bu yüzden (3.44) ve (3.45) eşitlikleri;

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = [R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = [R] \cdot [T]^{-1} \cdot [R]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$$[R] \cdot [T] \cdot [R]^{-1} = \left[[T]^{-1} \right]^T \quad (3.53)$$

$$[R] \cdot [T]^{-1} \cdot [R]^{-1} = [T]^T \quad (3.54)$$

ve

$$\left[[T]^{-1} \right]^T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & nm \\ n^2 & m^2 & -nm \\ -2mn & 2mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

$$[T]^T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -nm \\ n^2 & m^2 & nm \\ 2nm & -2nm & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

olarak elde edilir. Böylece (3.51) ve (3.52) eşitlikleri,

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} = \left[[T]^{-1} \right]^T \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

ve

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = [T]^T \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

şeklinde yazılabilir. (3.57) eşitliği (3.48) eşitliğinde yerine yerleştirilirse x-y referans eksen takımında, 1-2 eksen takımındaki uzama bileşenlerine göre gerilme bileşenleri elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [T]^{-1} \cdot [Q] \cdot [T]^{-1T} \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

veya

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{Q}] \cdot \begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

dır. 3x 3 şeklinde bir matris olan $[\overline{Q}]$ 'nin bileşenleri;

$$\overline{Q}_{11} = Q_{11} \cdot m^4 \cdot Q_{22} \cdot n^4 \cdot 2 \cdot [Q_{12} + 2 \cdot Q_{33}] \cdot n^2 \cdot m^2 \quad (3.61)$$

$$\overline{Q}_{12} = Q_{21} = (Q_{11} + Q_{22} - 4 \cdot Q_{33}) \cdot n^2 \cdot m^2 + Q_{12} \cdot (n^4 + m^4) \quad (3.62)$$

$$\overline{Q}_{13} = Q_{31} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 \cdot Q_{33}) \cdot n \cdot m^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2 \cdot Q_{33}) \cdot n^3 \cdot m \quad (3.63)$$

$$\overline{Q}_{22} = Q_{11} \cdot n^4 \cdot Q_{22} \cdot m^4 + 2 \cdot [Q_{12} + 2 \cdot Q_{33}] \cdot n^2 \cdot m^2 \quad (3.64)$$

$$\overline{Q}_{23} = Q_{32} = (Q_{11} - Q_{12} - 2 \cdot Q_{33}) \cdot n^3 \cdot m + (Q_{12} - Q_{22} + 2 \cdot Q_{33}) \cdot n \cdot m^3 \quad (3.65)$$

$$\overline{Q}_{33} = (Q_{11} + Q_{22} - 2 \cdot Q_{12} - 2 \cdot Q_{33}) \cdot n^2 \cdot m^2 + Q_{33} \cdot (n^4 + m^4) \quad (3.66)$$

şeklinde yazılabilir. $[\overline{Q}]$ eşitliklerinde kullanılan m ve n (3.30) ve (3.31) denklemlerinde tanımlanmıştır. (3.58) denkleminde (3.49) denklemi yerine yerleştirilirse x-y referans eksen takımındaki uzama bileşenleri elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{bmatrix} = [\overline{S}] \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.67)$$

3x3 şeklindeki uyum matrisi $[\overline{S}]$ 'nin bileşenleri;

$$\overline{S}_{11} = S_{11} \cdot m^4 + S_{22} \cdot n^4 + (2 \cdot S_{12} + S_{33}) \cdot n^2 \cdot m^2 \quad (3.68)$$

$$\overline{S_{12}} = S_{21} = S_{12} \cdot (n^4 + m^4) + (S_{11} + S_{22} - S_{33}) \cdot n^2 \cdot m^2 \quad (3.69)$$

$$\overline{S_{13}} = S_{31} = (2 \cdot S_{11} + 2 \cdot S_{12} - S_{33}) \cdot n \cdot m^3 - (2 \cdot S_{22} + S_{12} - S_{33}) \cdot n^3 \cdot m \quad (3.70)$$

$$\overline{S_{23}} = S_{32} = (2 \cdot S_{11} + 2 \cdot S_{12} - S_{33}) \cdot n^3 \cdot m - (2 \cdot S_{22} - 2 \cdot S_{12} - S_{33}) \cdot n \cdot m^3 \quad (3.71)$$

$$\overline{S_{22}} = S_{11} \cdot n^4 + S_{22} \cdot m^4 + (2 \cdot S_{12} + S_{33}) \cdot n^2 \cdot m^2 \quad (3.72)$$

$$\overline{S_{33}} = 2 \cdot (2 \cdot S_{11} + 2 \cdot S_{22} - 4 \cdot S_{12} - S_{33}) \cdot n^2 \cdot m^2 + S_{33} \cdot (n^4 + m^4) \quad (3.73)$$

olacak şekilde hesaplanır. S_{11} , S_{22} , S_{12} , S_{21} , S_{33} ise (3.22) ve (3.23) denklemlerinde tanımlanmıştır.

3.4.2.4. Mühendislik Sabitleri

Bölüm 3.4.2.1' de tasarlanan yaklaşım kullanılarak, x-y eksen takımlarına karşılık gelen E_{xx} , E_{yy} , G_{xy} ve v_{xy} elastik özellikleri için, 1-2 eksen takımındaki elastik sabitler kullanılarak ifadeler elde edilebilir. Bu denklemler;

$$\frac{1}{E_{xx}} = \frac{1}{E_{11}} \cdot m^4 + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot v_{12}}{E_{11}} \right) \cdot n^2 \cdot m^2 + \frac{1}{E_{22}} \cdot n^4 \quad (3.74)$$

$$\frac{1}{E_{yy}} = \frac{1}{E_{11}} \cdot n^4 + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2 \cdot v_{12}}{E_{11}} \right) \cdot n^2 \cdot m^2 + \frac{1}{E_{11}} \cdot m^4 \quad (3.75)$$

$$\frac{1}{G_{xy}} = 2 \cdot \left(\frac{2}{E_{11}} + \frac{2}{E_{22}} + \frac{4 \cdot v_{12}}{E_{11}} - \frac{1}{G_{12}} \right) \cdot n^2 \cdot m^2 + \frac{1}{G_{12}} \cdot (n^4 + m^4) \quad (3.76)$$

$$v_{xy} = E_{xx} \cdot \left[\frac{v_{12}}{E_{11}} \cdot (n^4 + m^4) - \frac{1}{E_{11}} + \frac{1}{E_{22}} - \frac{1}{G_{12}} \right] \cdot n^2 \cdot m^2 \quad (3.77)$$

şeklinde yazılabilir. Bu yüzden x-y eksen takımı ile herhangi bir açıdaki elastik özelliklerin hesaplanması için E_{11} , E_{22} , G_{11} ve v_{12} ' nin bilinmesi yeterlidir.

3.5. Mekanik Bağlantıların Avantaj ve Dezavantajları

Malzemelerin birleştirilmesinde mekanik bağlantıların kullanılması birçok avantaj sağlar. Mekanik birleştirme elemanlarının, birleştirilen parçalara zarar görmeden bağlanıp sökülebileme imkanını vermesi dolayısıyla çok yararlıdır. Bağlantının sökülüp takılabileme özelliği, birleşen yapının biçiminin değiştirilebilmesine, yapıya farklı bir elemanın ilave edilmesini ve yapıda herhangi bir bozulma meydana geldiğinde onarımın gerçekleştirilmesinde avantajlar sağlamasına ilaveten uygun mekanik birleştirme yapılması halinde uzuvlara bağıl hareket imkanı verir. Bağıl hareketin yapılmasına imkan veren sökülebilen birleştirme, arzu edilen hareketin gerçekleştirilmesine yapının bütünlüğünü

koruyarak izin verir. Birleştirme işlemi, malzemelerin yapılarında kimyasal değişim gibi yapısal değişikliklere neden olmamakla birlikte farklı özellikte olan bütün malzemelerin birleştirilmesine izin verir. Bununla birlikte, birleştirilecek malzemeler arasında yapıştırıcı ile birleştirmede olduğu gibi kimyasal uyumluluk aranmamakta ve hasarda tolerans göstermektedir. Mekanik birleştirme, karmaşık olmayan ve ön işlem gerektirmeyen bir yöntemdir ve birleştirilen malzemeler yük uygulanmaması halinde temas halinde bulunmazlar. Otomasyon işlemlerine uygun olan ve yapıştırıcı, kaynak birleştirmelerinde olduğu gibi fazla beceri gerektirmeyen bağlantı yardımcı elemanı olarak cıvata, perçin, zımba, çivi malzemelerini kullanan avantajlı birleştirme yöntemidir. Mekanik birleştirmelerin bahsedilen avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır.

Dezavantajlardan birincisi, mekanik birleştirmenin sağlanması için açılan deliğin çevresinde bağlantı elemanının oluşturduğu yorulma işleminin olduğu alanlarda önem arz eden gerilme yığılmasıdır. İkinci olarak, bahsi geçen birleştirmenin sağlanması için açılan deliğin etrafında meydana gelen gerilme yığılmalarının neden olduğu ve akma olarak adlandırılan şekil değişimi nedeniyle mekanik birleştirmenin bütün malzemelere uygulanamamasıdır. Bu tür malzemelere örnek olarak, üzerinde birleştirme amaçlı delik açıldığında kırılmaya neden olan gerilme yığılması meydana gelen gevrek ve doğal bir yapıya sahip olan cam, seramik ve muadil malzemelerdir. Üçüncü dezavantaj olarak, mekanik birleştirme elemanının dış ortamdaki su ve nem gibi faktörlerden kaynaklanan korozyona sebep olmasıdır. Birleştirilmesi istenilen malzemelerdeki artık gerilmeler ve malzemelerin elektrokimyasal yapısının farklılık göstermesi bağlantıyı olumsuz şekilde etkilemektedir. Mekanik birleştirmeli bağlantılar lehim, kaynak, yapıştırma gibi yöntemlerle kıyaslandığında daha ağır bir yapıya sahip olması ve bazen fazla işçilik gerektirmesi nedeniyle dezavantaj sağlar. Mekanik bağlantılarda sıcaklık artışıyla meydana gelen yaşlanma sürecinin hızlanmasıyla meydana gelen termal zorlanmalar, titreşimler ve esnemeler meydana geleceğinden gevşemeler ortaya çıkar. Mekanik bağlantıların avantaj ve dezavantajları hakkında özet karşılaştırma tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1 Mekanik bağlantıların avantaj ve dezavantajları [45]

AVANTAJLAR	DEZAVANTAJLAR
-Bağlantının çözülebilme özelliğine sahip olması	- Gerilme birikimlerinin belirgin olması
-Bağıl hareket toleransının sınırlı olması	- İşlenme işlemi gerektiği durumlarda talaş kaldırmanın sorun teşkil etmesi
-Birleştirilen malzemelerdeki kimyasal kompozisyonlar ve mikro yapıda farklılaşma olmaması	- Sızdırmazlık özelliğinin uygun olmaması
-Birleştirme işleminde farklı malzemelerin kullanılabilmesi	- Konstrüksiyonun ağır bir yapıya sahip olması
-Hasar toleransının sınırlı olması	- Bağlantıdaki çözülme olasılığı
-Bağlantıdaki basit yapı ve herhangi bir ön işlem gerektirmemesi	- Fazla montaj işçiliğine ihtiyaç duyulması
-Üretim işleminin basit ve ekonomik olması	
-Otomasyona uyumlu olması	
-Bağlantının kalite kontrol işleminin kolay olması	
-Çevresel etmenler ve yorulma yüklemesine karşı dayanıklı olması	
-Güvenilirlik seviyesinin yüksek olması	

Mekanik olarak birleştirilen malzemelerde, yapılan tasarım, malzeme boyutları ve biçimleri, bağlantıyı sağlayan birleştirme elemanı sayısı ve özellikleri oluşturulan sistemin verimini etkilemektedir. Yapıştırıcı ve lehim kullanılmasıyla malzemelerin birleştirilmesi işlemi, mekanik olarak yapılan birleştirmeye verimlilik açısından kıyaslandığında geride kalmaktadır. Bunun yanında kaynak yardımıyla malzemelerin birleştirilmesi yöntemi, mekanik yöntemden daha verimlidir [45].

3.6. Yapıştırırmalı Bağlantıların Üstünlükleri

Yapıştırma ile birleştirilmiş malzemelerin sahip olduğu avantajlar aşağıdaki gibidir.

- Hafif bir yapı elde edilmesini sağlar.
- Düzgün yüzeylerin elde edilmesini sağlar.
- Sağlam ve dayanıklı bir yapı sağlar.
- Birleştirme bölgesinde düşük gerilme yığılmasına sahiptir.

Birleştirilmesi istenen malzemelerin özelliklerine ve kullanılacak yerin özelliğine bağlı olarak tercih edilecek birleştirme yöntemi belirlenir.

3.7. Bağlantıların Tasarımı

Bağlantının tasarımının yapılması, birleştirilecek yapılarda bağlantı noktası son derece önem teşkil etmektedir. Yöntem olarak sıklıkla mekanik veya yapıştırma ile

bağlantı tercih edilmektedir. Mekanik bağlantı metodu genellikle, takılıp sökülmesi istenilen tasarımlarda tercih edilmektedir.

Kompozit malzemelerde dayanıklı bir yapı elde edilmesi için, birleştirme noktasının davranışı iyi analiz edilmelidir. Çünkü kompozitlerin birleştirilmesi işleminde, fiber ile matris arasındaki yüzeyde, açılan cıvata deliği etrafındaki gerilme yığılmaları ve lineer elastik yapıya sahip olan fiber malzemelerin uzama kapasitelerinin düşük olması nedeniyle ağırlık sınırlaması gerekir ve arzu edilmeyen zamanlarda malzemelerde hasarlar baş gösterir.

Tasarım sürecinde birleştirme işlemi için tercih edilecek yöntemin seçimi yapılırken aşağıda sıralanan maddeler göz önünde bulundurulmalıdır.

- Tasarımdaki geometrik ve ağırlık sınırlamaları
- Bağlantının sahip olması arzu edilen dayanıklılık
- Bağlantının kullanılacağı çevre şartları
- Bağlantının sökülüp takılabilir bir yapıya sahip olma zorunluluğu
- Birleştirme maliyeti
- İmalat maliyeti

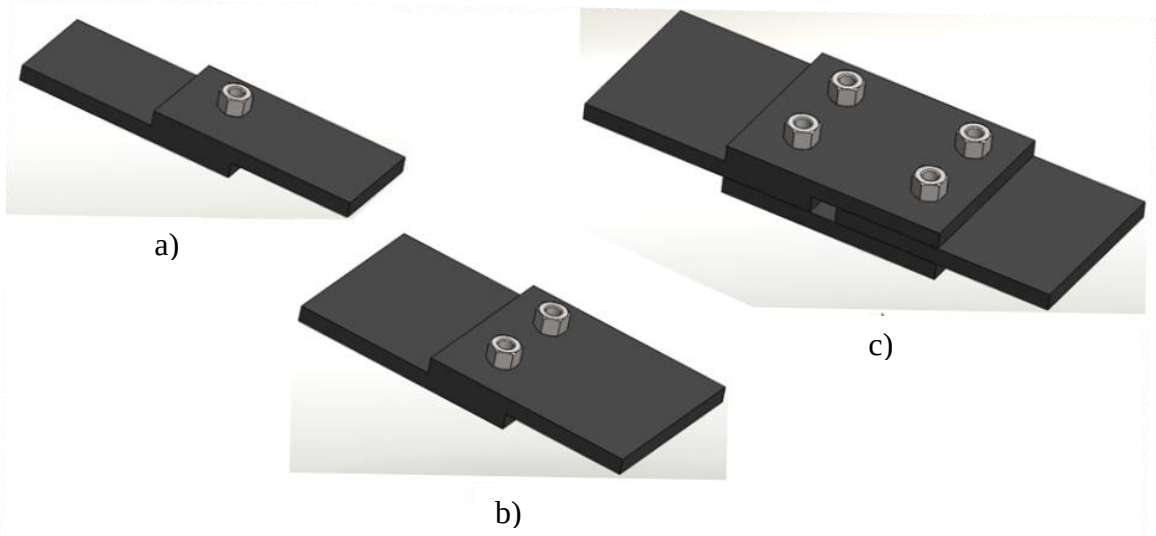
3.7.1. Bağlantı Tipleri

Kompozit malzemelerin birleştirilmesinde genellikle yapıştırıcı veya pim, cıvata, perçin kullanılarak yapılan bağlantılar kullanılır. Şekil 3.13' de çeşitli mekanik bağlantıların temsili şekilleri verilmiştir.

Kompozit malzemeler kullanılarak yapılan bağlantılar, metallerle yapılan birleştirmelerle kıyaslandığında, kompozit malzemeler arzu edilen mekanik özelliğin elde edilmesi amacıyla uygun fiber çeşidi ve tespit açısı sayesinde, metallerle yapılanlara kıyasla avantaj sağlar. Sağladığı bu avantajın yanında kompozitin karmaşık bir yapıya sahip olması nedeniyle, tamir süreci metallerden daha zordur.

Bu bilgilere ilaveten kompozit bağlantı, kalınlık boyunca farklı gerilme dağılımları göstermekte ve yataklama anında mukavemetleri oldukça düşüktür.

[46].

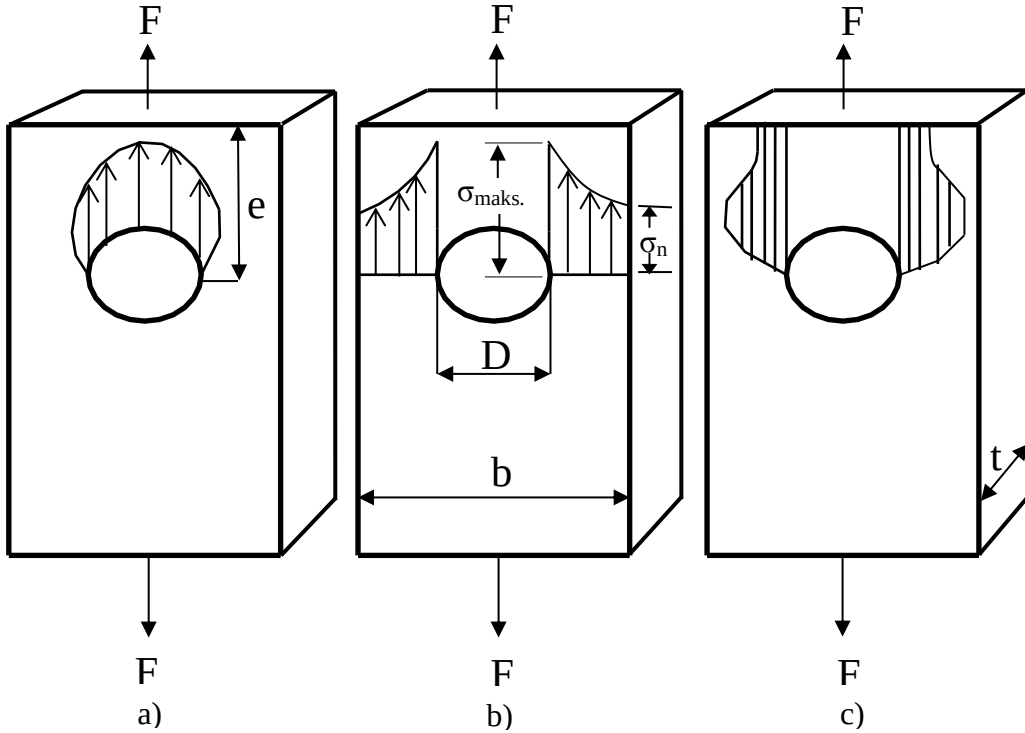


Şekil 3.13 Temel bağlantı konfigürasyonları: a) Bir cıvata ile birleştirilmiş tek bindirmeli, b) Tek bindirmeli bağlantı, c) Çift bindirmeli bağlantı

3.7.1.1. Mekanik Birleştirmeli Bağlantı Tasarımı

Mekanik birleştirmeli bağlantılarda malzemeler arasında düzgün bir kuvvet aktarımının sağlanması amacıyla yapılmaktadır.

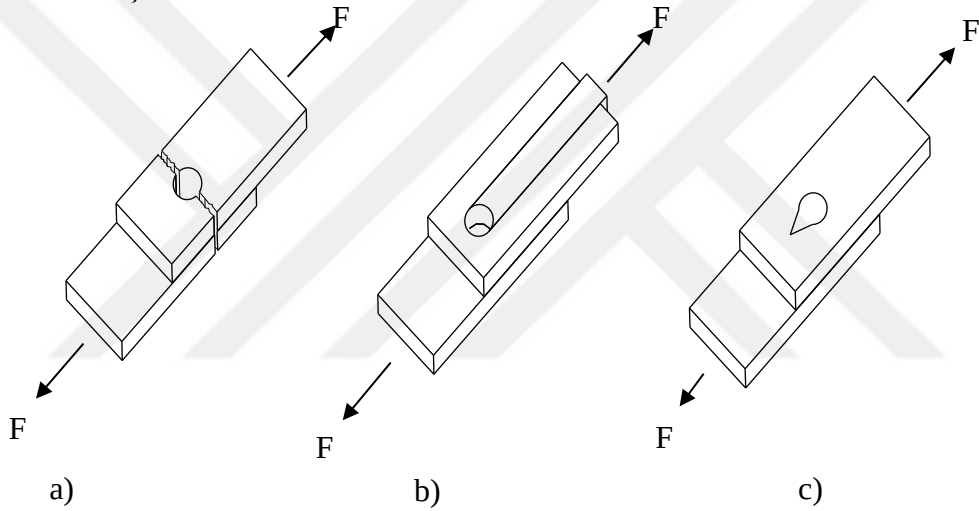
Cıvata, perçin pim gibi birleştirme elemanı, birinci malzemeden aktarılan yüke maruz kalması durumunda üzerine gelen kuvveti ilk olarak delik yüzeyine aktarır ve yük aktarımı dolayısıyla ikinci malzemeye iletir [47].



Şekil 3.14 Pim ile yüklenen delik etrafında oluşan gerilme dağılımları: a) Yataklama gerilmesi, b) Nominal çekme gerilmesi, c) Kayma gerilmesi [48].

Şekil 3.14' de görüldüğü gibi delik etrafında birbirinden farklı gerilme değerleri görülmekle birlikte maksimum gerilme değeri kuvvetin uygulandığı doğrultuda meydana gelmektedir.

Uygulanan yükün tesiriyle, bağlantının sahip olduğu tasarıma bağlı olarak kayma, çekme ve yataklama hasarları meydana gelebilmekle birlikte üç hasar türü aynı tasarımda görülebilmektedir. Geniş yapıya sahip olan bağlantılarda yataklama hasarı meydana gelmektedir. Tasarımın genişliği uygulanan kuvvete bağlı olarak azaldığında meydana gelen çekme hasarı olmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucu, bağlantıdaki delik çapının ve kuvvet etkisi altında olmayan bağlantının kenarının deliğe olan uzaklığının hasar tipinde farklılaşmaya neden olduğu görülmüştür. Tasarımlarda meydana gelebilecek hasarlar şekil 3.15 'de verilmiştir.



Şekil 3.15 Pimli bağlantılarda tipik hasar mekanizmaları: a) Çekme tipi hasar, b) Kayma tipi hasar, c) Yataklama tipi hasar [49]

Mekanik birleştirmenin pim aracılığıyla yapılması durumunda bağlantıların mukavemetlerini tespit etmek amacıyla aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

Meydana gelen hasarın çekme tipi olması durumunda nominal çekme dayanımı;

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_{\zeta}}{(b-D).t} \text{ şeklinde ifade edilmektedir.}$$

Eşitlikte kullanılan semboller;

F_{ζ} : Pim aracılığıyla iletilen yükü,

D: Tasarımdaki deliğin çapı,

b: Tasarımın sahip olduğu kesit genişliğini,

t: Tasarımı meydana getirmek üzere birleştirilen parçaların kalınlığını,

e: Kenara olan mesafeyi temsil etmektedir.

Yataklama dayanımının tespit edilmesi amacıyla;

$$\sigma_{ya} = \frac{F_k}{D.t} \text{ formülü kullanılmaktadır.}$$

Kayma durumundaki dayanımı tespit etmek amacıyla;

$$\tau_k = \frac{F_k}{2.e.t} \text{ formülü kullanılmaktadır.}$$

Dört parametre, bağlantının göstermiş olduğu performans üzerinde etkilidir.

Bunlar;

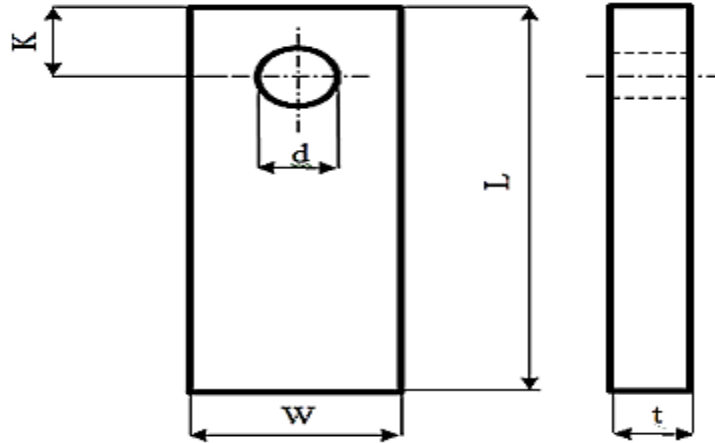
- a) Delik boyutu ve delik toleransı, sıkıştırma alanı, birleştirme elemanı boyutu ve birleştirme elemanı tipinin oluşturduğu birleştirme elemanı parametreleri,
- b) Kompozit tabakaların sıralanması, matris tipi, fiber tipi ve fiber oryantasyonun oluşturduğu malzeme parametreleri,
- c) Geometrik parametreler(numune genişliği, delik çapı vb.), yükleme yükü, yükleme tipi(basma, yorulma, çekme vb.), çevre koşulları ve bağlantı tipinin(çift bindirmeli, tek bindirmeli) oluşturduğu dizayn parametreleri,
- d) Numune kalınlığı (t), numune genişliği (b), kenar mesafesi (e), delik çapı (D) numune genişliğinin delik çapına oranı (b/D), çoklu bağlantılarda birleştirme elemanları arasındaki mesafe (adım) ve kenar mesafesinin delik çapına oranının (e/D) oluşturduğu geometrik parametrelerdir [49].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, numuneler hazırlanırken karbon fiber ve cam fiber kompozit malzemeler çözülebilir ve çözilemeyen bağlantı elemanları kullanılarak birleştirildi ve 3 kN kapasiteye sahip Geratech SJV-30K Elektrik Motorlu Test cihazı ve SH-10K Dinamometre kullanılarak, çekme testlerine tabi tutuldu. Elde edilen çekme testi sonuçları değerlendirildi.

4.1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Yöntem ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan karbon fiber ve cam fiber kompozit malzemeler, AUTOCAD 2016 programı yardımıyla, 480x480x1 mm, 400x400x1 mm ve 200x200x1 mm boyutlarındaki 0° yönlenme açısına sahip fiber plakalardan, CNC ROUTER tezgahta kesilmiş ve delinmiş halde şekil 4.1'deki gibi hazırlandı. Numune ölçüleri için tablo 4.1 kullanıldı. Çözülebilir birleştirme bağlantılarında, M8 ve M10'luk St37 civatalar, somunlar, pullar kullanılırken, çözilemeyen birleştirme bağlantılarında ise Araldite 2000 epoksi yapıştırıcılar kullanıldı. Deneysel çalışmalarda, her deney üç kez tekrarlandı ve elde edilen ortalama değer, çekme dayanımı olarak kabul edildi. Numuneler, 60 mm/dk çekme hızında çekildi.

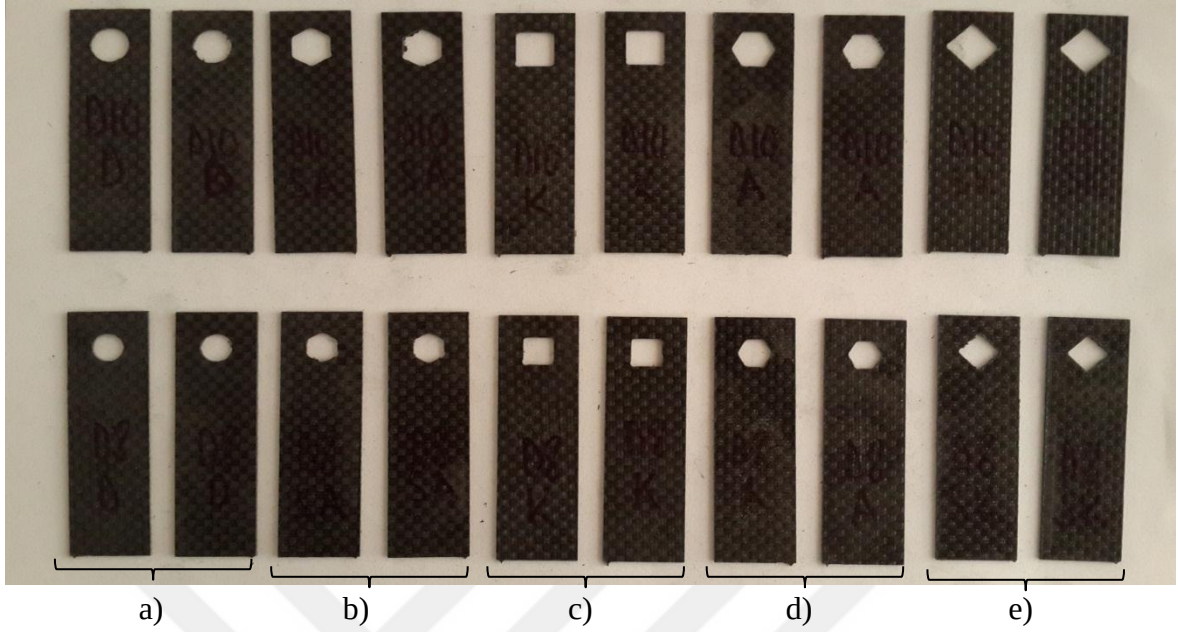


Şekil 4.1 Temsili numune resmi

Tablo 4.1 Numune ölçüleri

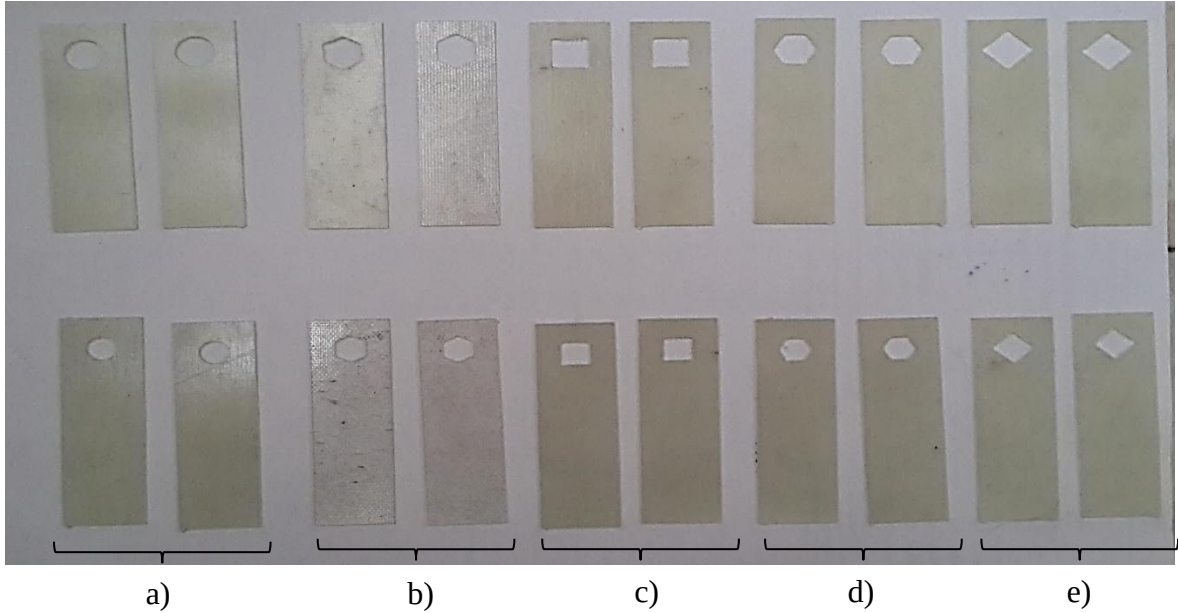
L (mm)	t (mm)	W (mm)	d (mm)	K (mm)
68	1	20	8	10
68	1	20	10	10

Şekil 4.2’de birleştirilecek karbon fiber kompozit malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Birleştirilecek karbon fiber kompozit malzemeler; a) Dairesel profil yapılı bağlantı, b) 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantı, c) Kare profil yapılı bağlantı, d) Altıgen profil yapılı bağlantı, e) 45° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantı

Şekil 4.3’de birleştirilecek cam fiber kompozit malzemeler verilmiştir.



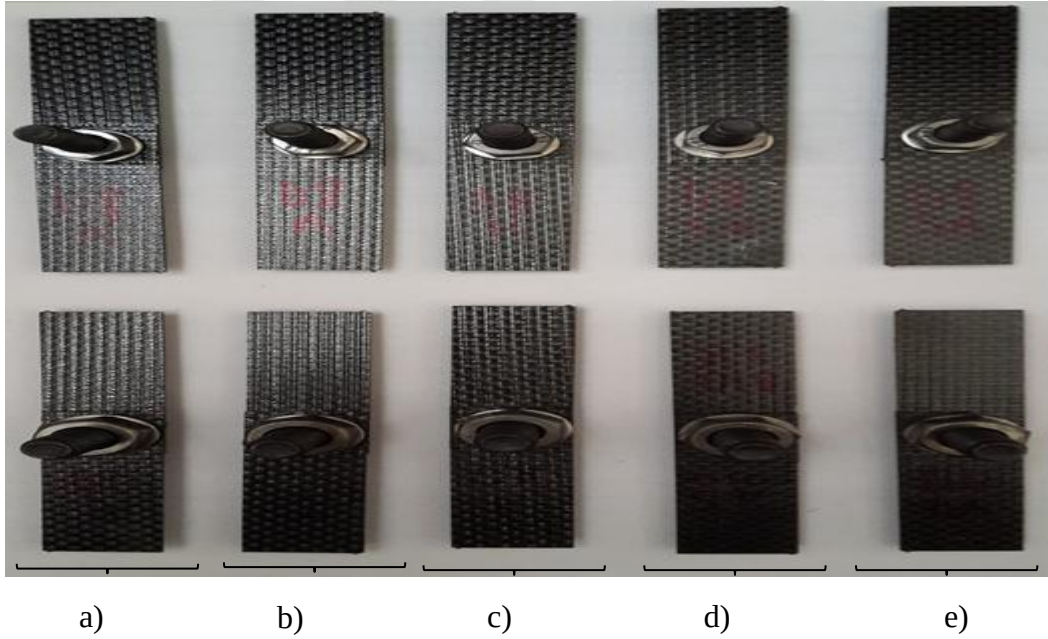
Şekil 4.3 Birleştirilecek cam fiber kompozit malzemeler; a) Dairesel profil yapılı bağlantı, b) 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantı, c) Kare profil yapılı bağlantı, d) Altıgen profil yapılı bağlantı, e) 45° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantı

Şekil 4.4'te karbon fiber malzemelerin ve cam fiber malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan 8.8 kalite civata, somun, pul ve çift bileşenli yapıya sahip epoksi yapıştırıcıya ait temsili resim verilmiştir.

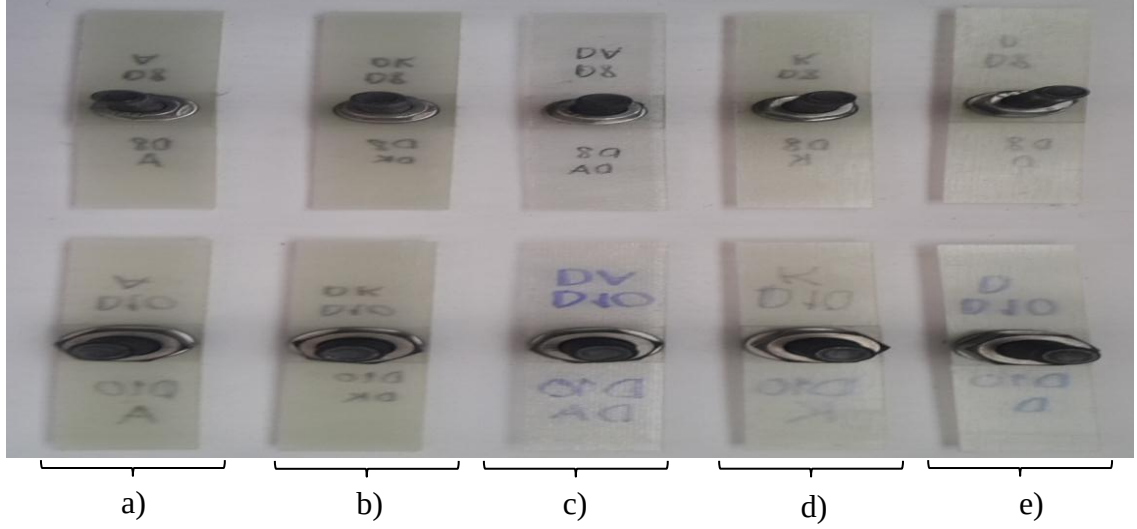


Şekil 4.4 Karbon fiber kompozit malzemelerin ve cam fiber kompozit malzemelerin birleştirilmesinde kullanılan malzemeler; a) St37 çelik civata, somun ve pul, b) Epoksi yapıştırıcı

Şekil 4.5 ve şekil 4.6' daki çözülebilir bağlantılı numuneleri hazırlanırken, civatalar, Pastorino marka tork anahtarıyla 10 Nm'ye ayarlanarak sıkılmıştır.

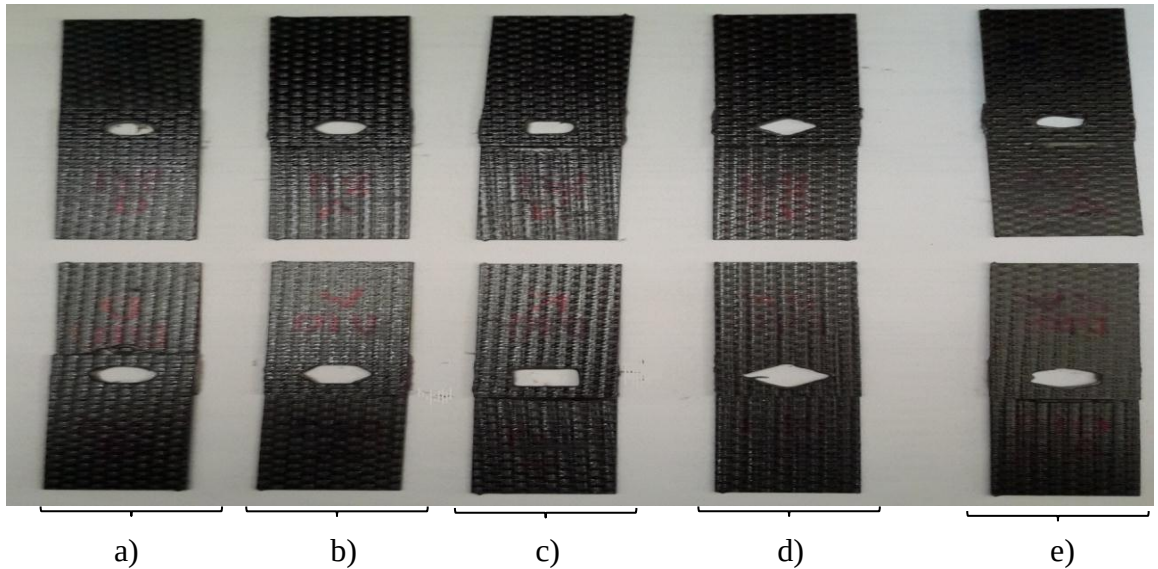


Şekil 4.5 Karbon fiber kompozit malzemelerin çözülebilir şekilde oluşturulmuş bağlantıları; a) Kare profil yapılı bağlantılar, b) Altıgen profil yapılı bağlantılar, c) Dairesel profil yapılı bağlantılar, d) 45° döndürülmüş kare profil yapılı bağlantılar, e) 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantılar

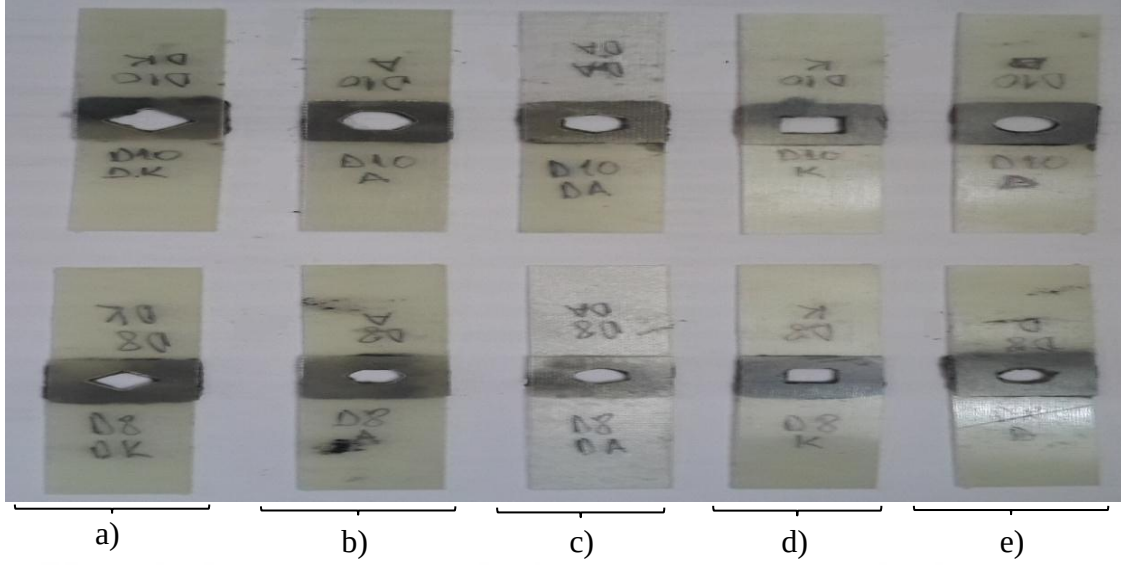


Şekil 4.6 Cam fiber kompozit malzemelerin çözülebilir şekilde oluşturulmuş bağlantıları; a) Altıgen profil yapılı bağlantılar, b) 45° döndürülmüş kare profil yapılı bağlantılar, c) 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantılar, d) Kare profil yapılı bağlantılar, e) Dairesel profil yapılı bağlantılar

Şekil 4.7 ve şekil 4.8’ deki yapıştırma bağlantıları hazırlanırken, Araldite epoksi yapıştırıcının reçine bölümünden iki birim alınarak harici bir kapta karıştırıldıktan sonra, bir birim sertleştirici katılarak homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmaya devam edildi. Kompozit plakalar, uygun çapta bir eleman kullanılarak merkezlendi ve ara yüzeye, elde edilen, karışım sürülerek oda sıcaklığında 5 gün boyunca bekletildi.



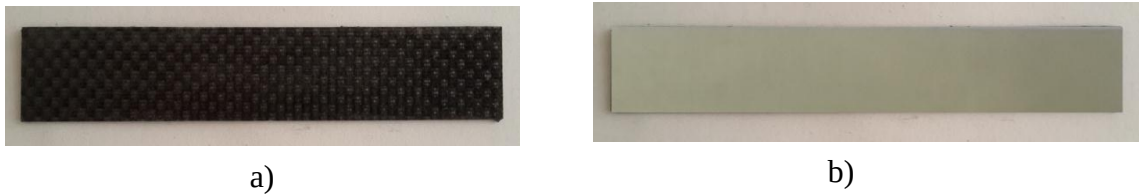
Şekil 4.7 Karbon fiber kompozit malzemelerin çözülemeyen şekilde oluşturulmuş bağlantıları; a) Dairesel profil yapılı bağlantılar, b) Altıgen profil yapılı bağlantılar, c) Kare profil yapılı bağlantılar, d) 45° döndürülmüş kare profil yapılı bağlantılar, e) 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantılar



Şekil 4.8 Cam fiber kompozit malzemelerin çözilemeyen şekilde oluşturulmuş bağlantıları; a) 45° döndürülmüş kare profil yapılı bağlantılar, b) Altıgen profil yapılı bağlantılar, c) 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantılar, d) Kare profil yapılı bağlantılar, e) Dairesel profil yapılı bağlantılar

4.2. Karbon Fiber ve Cam Fiber Kompozit Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Karbon fiber ve cam fiber kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla şekil 4.9’da görüldüğü gibi tek parçadan oluşan 116x20x1 mm boyutlarında 0° ve 90° istiflenme açlarına sahip karbon fiber ve cam fiber malzeme numuneleri elde edildi. Numuneler, şekil 4.10’ da görüldüğü gibi, Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Laboratuvarında bulunan çekme testi cihazına bağlandı ve çekme testlerine tabi tutularak, elastisite modülü, poisson oranı ve kayma modülü tespit edildi.



Şekil 4.9 Tek parçadan oluşan 116 mmx20 mmx1 mm boyutlarında numuneler; a) Karbon fiber malzeme numunesi, b) Cam fiber malzeme numunesi



Şekil 4.10 Deney düzeneği

Şekil 4.9’ deki kompozit malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilirken belirlenirken (4.1),(4.2),(4.3),(4.4) numaralarıyla belirtilen formüllerden ve 0.01mm hassasiyette dijital kumpastan yararlanılmıştır.

$$E = \sigma \cdot \varepsilon \quad (4.1);$$

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.2);$$

$$\nu_{12} = -\varepsilon_1 / \varepsilon_2 \quad (4.3);$$

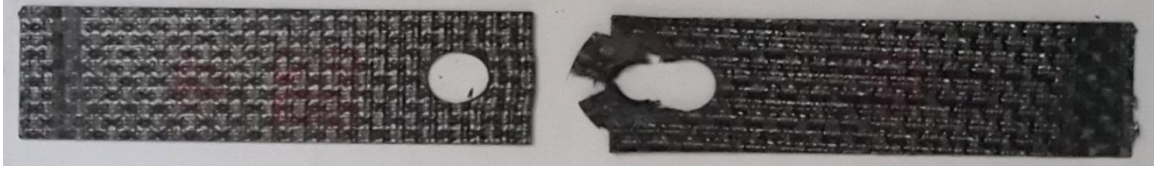
$$G = \frac{1}{\left(\frac{4}{E_3}\right) - \left(\frac{1}{E_1}\right) - \left(\frac{1}{E_2}\right) + \left(\frac{2 \cdot \nu_{21}}{E_1}\right)} \quad (4.4);$$

4.3. Karbon Fiber Kompozit Malzeme Bağlantılarının Çekme Testi Sonuçları

Bu başlık altında, çekme testi cihazında yapılan test sonucunda karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarının kopma anındaki hasar şekilleri ve kuvvet- uzama grafikleri verilmiştir.

4.3.1. M8 Cıvata Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

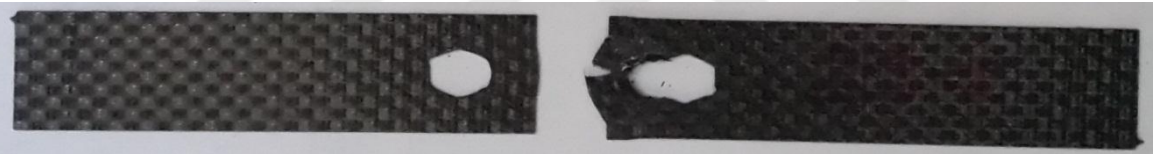
Şekil 4.11’de M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



a)



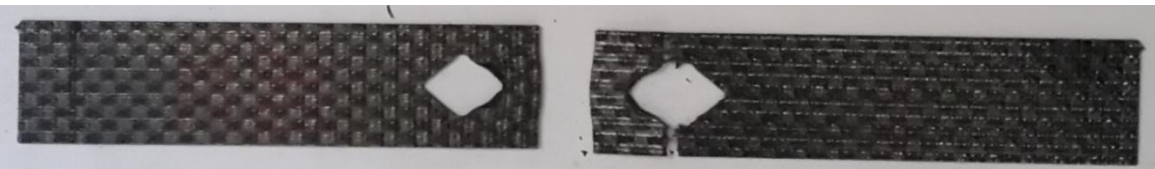
b)



c)



d)



e)

Şekil 4.11 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.11’de görülen hasar şekillerinde, çekme testi cihazının hareketli alt çenesinde bulunan bağlantı numunelerinde kopma tespit edildi. Sabit olan, üst çenede ise kayma tipi hasar görüldü. Şekil 4.11 e’deki keskin kenarlar, çentik etkisi oluşturarak hareketli çenedeki bağlantı numunesinde kayma ve çekme hasarlarının birlikte görülmesine sebep olmuştur.

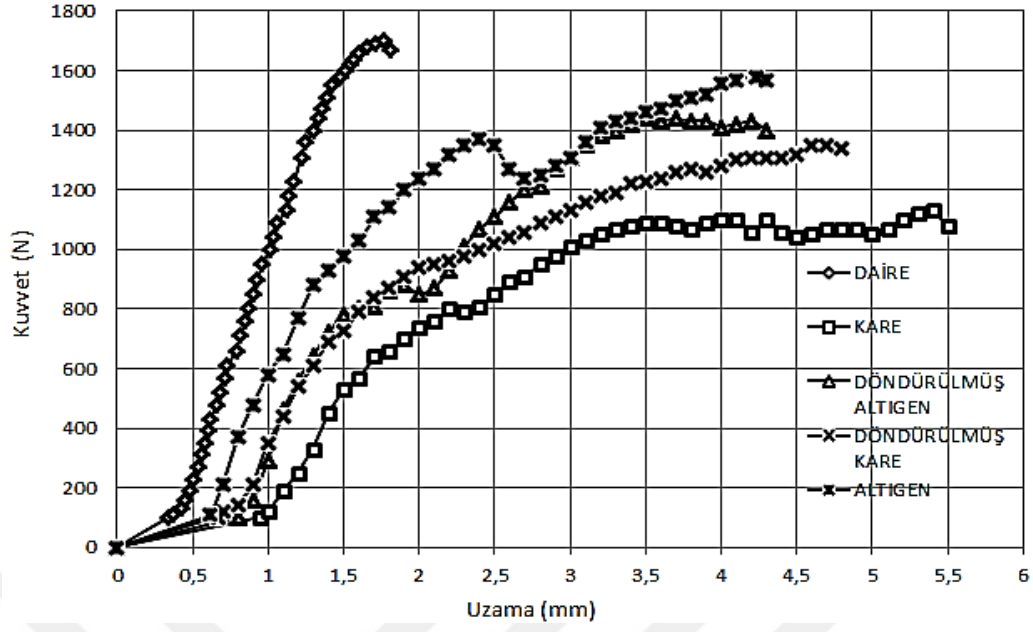
Tablo 4.2’de M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.2 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	1670	1.81
Kare	1080	5.50
Altıgen	1570	4.30
Döndürülmüş Altıgen	1400	4.30
Döndürülmüş Kare	1340	4.80

Tablo 4.2’ ye göre, en büyük kopma kuvveti 1.81 mm uzamayla dairesel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 5.50 mm uzamayla kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.12’de, M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

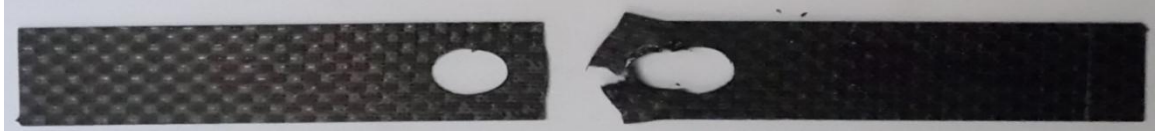


Şekil 4.12 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.12’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 1670 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 1080 N olarak tespit edilmiştir.

4.3.2. M10 Cıvata Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

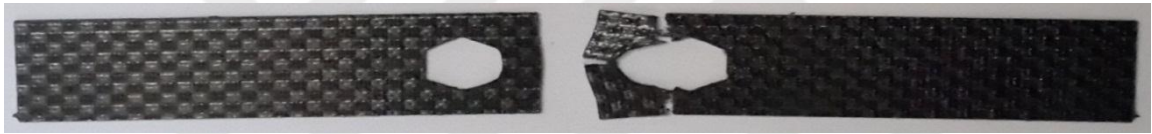
Şekil 4.13’de M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



a)



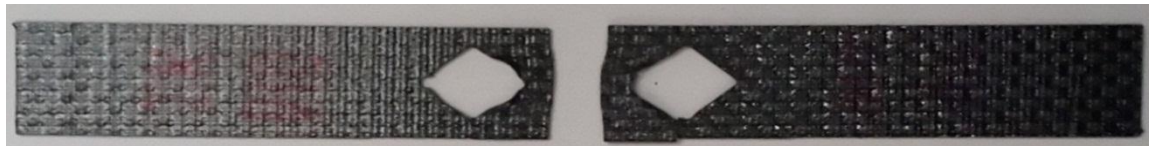
b)



c)



d)



e)

Şekil 4.13 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları;

a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.13’de görülen hasar şekillerinde, çekme testi cihazının hareketli alt çenesinde bulunan bağlantı numunelerinde kopma tespit edildi. Sabit olan, üst çenede ise

kayma tipi hasar görüldü. Şekil 4.13 e'deki keskin kenarlar, çentik etkisi oluşturarak hareketli çenedeki bağlantı numunesinde kayma ve çekme hasarlarının birlikte görülmesine sebep olmuştur.

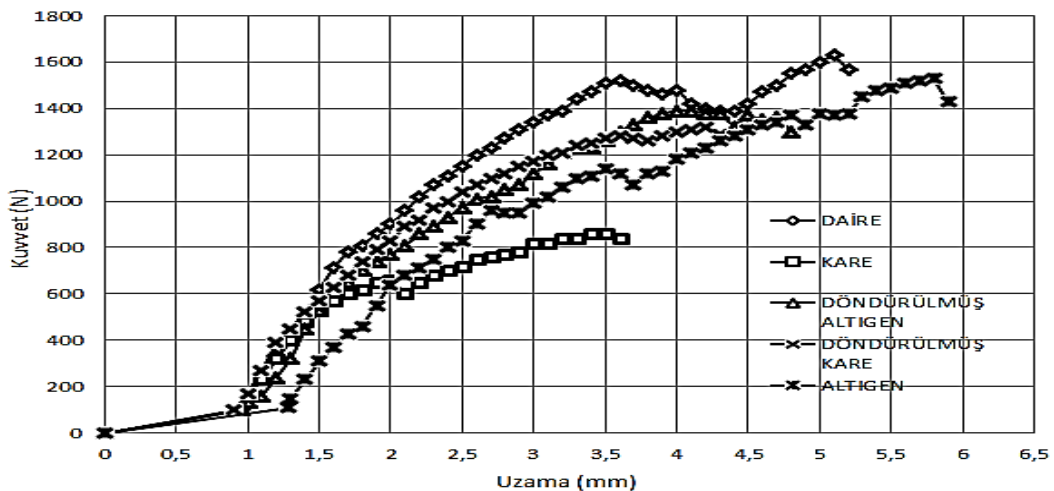
Tablo 4.3' de M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.3 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	1570	5.20
Kare	840	3.60
Altıgen	1430	5.90
Döndürülmüş Altıgen	1300	4.80
Döndürülmüş Kare	1290	4.30

Tablo 4.3'e göre, en büyük kopma kuvveti 5.20 mm uzamayla dairesel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 3.60 mm uzamayla kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.14'de, M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.14 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.14’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 1570 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 840 N olarak tespit edilmiştir.

4.3.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

Şekil 4.15’de 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



a)



b)



c)



d)



e)

Şekil 4.15 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.15’de görülen hasar şekillerinde, kopma hasarının yapıştırma bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Kompozit malzemelerde ise hasar tespit edilmemiştir.

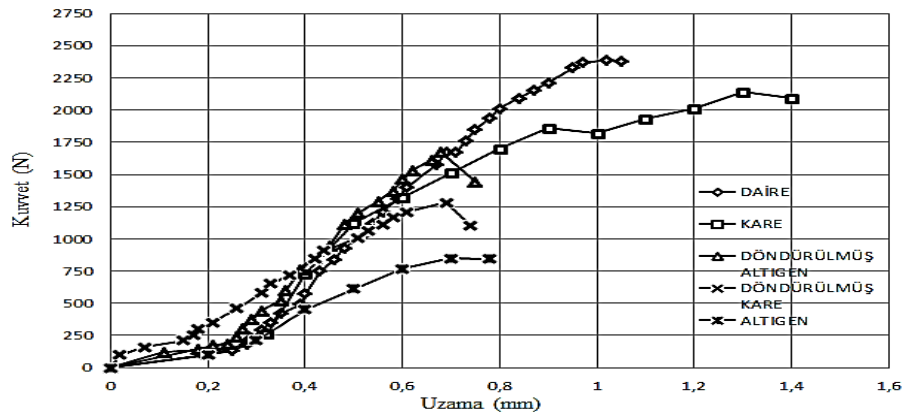
Tablo 4.4’de, 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.4 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	2380	1.05
Kare	2090	1.40
Altıgen	845	0.78
Döndürülmüş Altıgen	1440	0.75
Döndürülmüş Kare	1100	0.74

Tablo 4.4’ e göre, en büyük kopma kuvveti 1.05 mm uzamayla dairesel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 0.78 mm uzamayla altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.16’da, 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.16 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.16’da görüldüğü gibi, en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 2380 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 845 N olarak tespit edilmiştir.

4.3.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

Şekil 4.17’de 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



a)



b)



c)



d)



e)

Şekil 4.17 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.17’de görülen hasar şekillerinde, kopma hasarının yapıştırma bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Kompozit malzemelerde ise hasar tespit edilmemiştir.

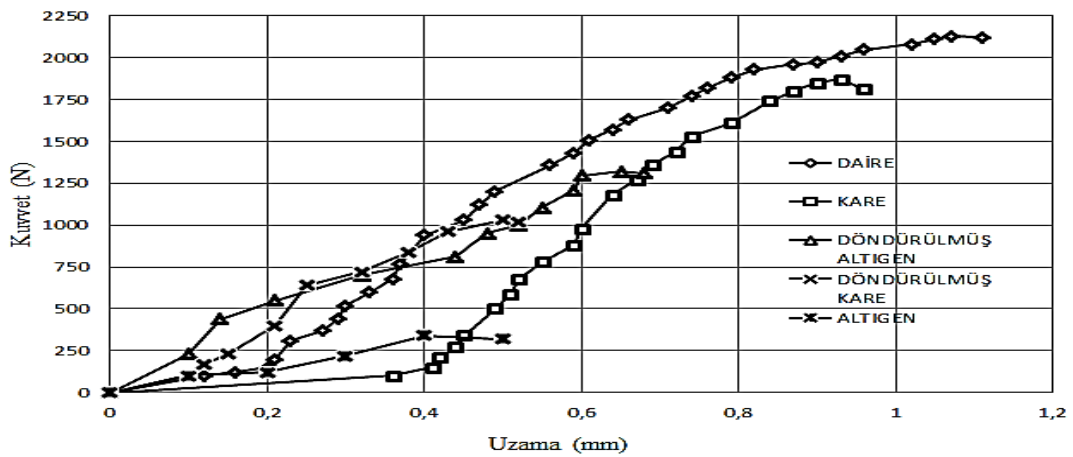
Tablo 4.5’de, 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.5 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	2120	1.11
Kare	1810	0.96
Altıgen	320	0.50
Döndürülmüş Altıgen	1310	0.68
Döndürülmüş Kare	1020	0.52

Tablo 4.5’ e göre, en büyük kopma kuvveti 1.05 mm uzamayla dairel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 0.78 mm uzamayla altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.18’de, 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

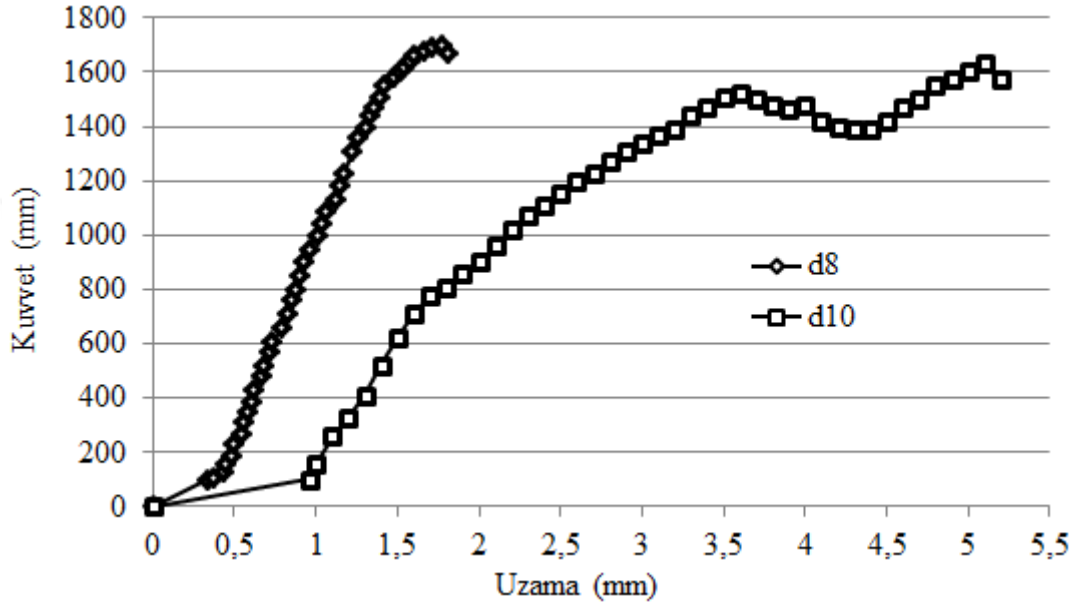


Şekil 4.18 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 2120 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 320 N olarak tespit edilmiştir.

4.3.5. Karbon Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Delik Çapına Göre Karşılaştırılması

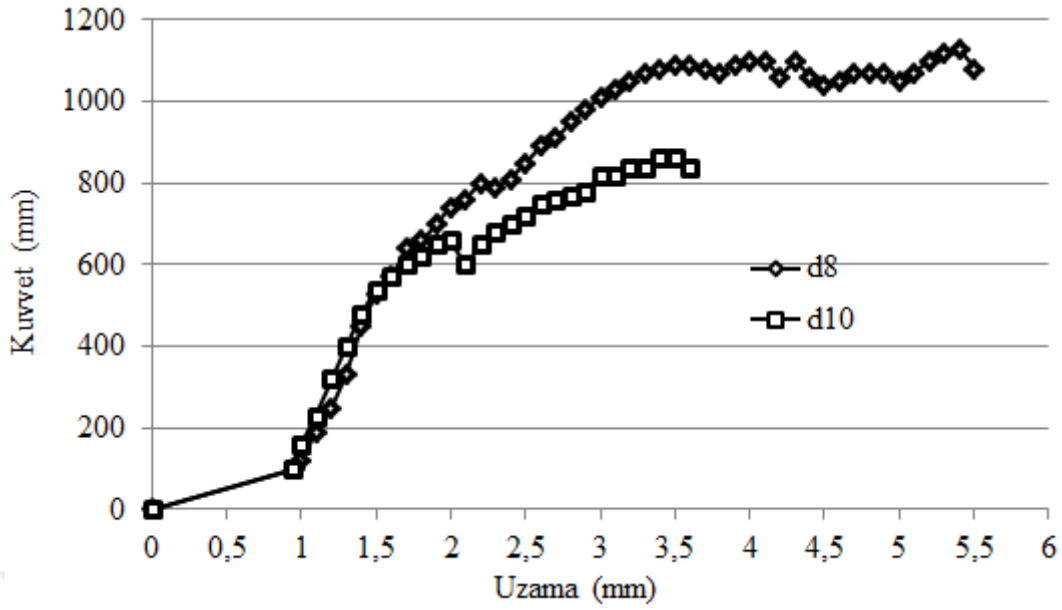
Şekil 4.19’da M8 ve M10 cıvata bağlantılı dairesel profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.19 M8 ve M10 cıvata bağlantılı dairesel profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.19’da görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1670 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1570 N olarak tespit edilmiştir.

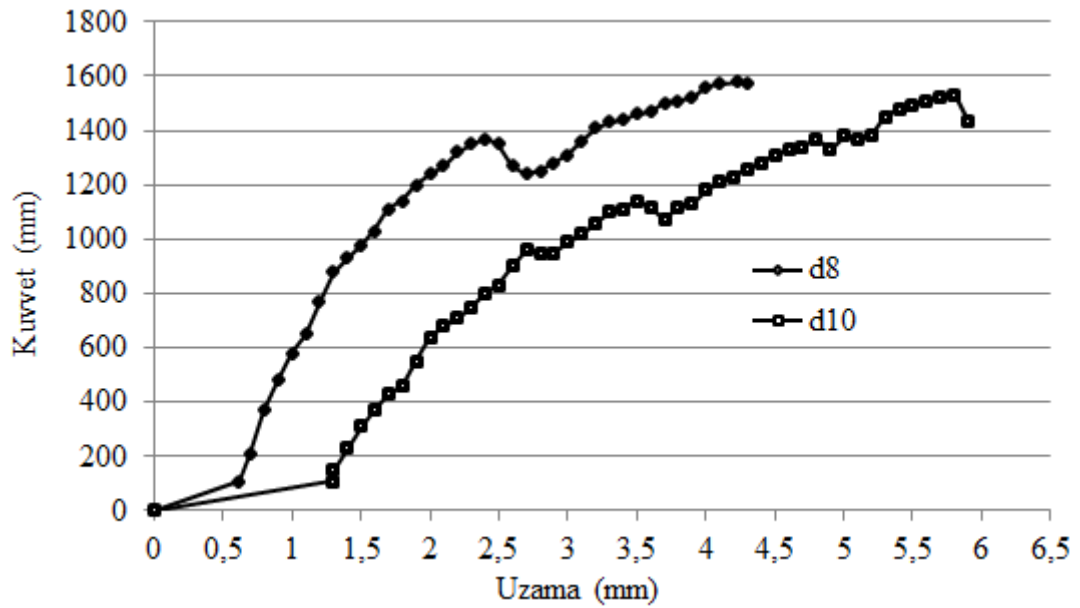
Şekil 4.20’de M8 ve M10 cıvata bağlantılı kare profil yapı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.20 M8 ve M10 cıvata bağlantılı kare profil yapıları karbon fiber numunelerinin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1080 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 840 N olarak tespit edilmiştir.

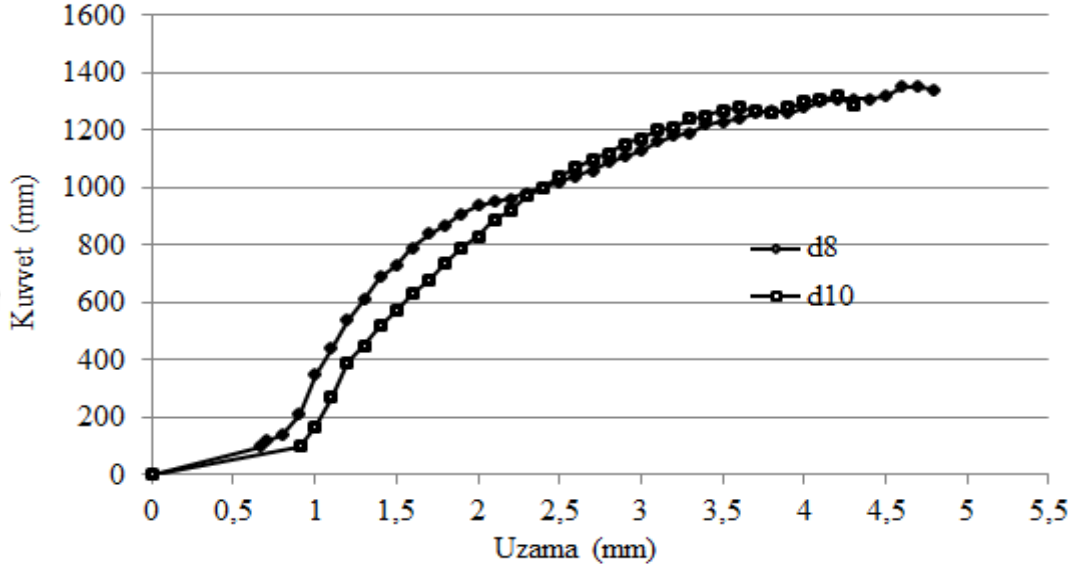
Şekil 4.21’de M8 ve M10 cıvata bağlantılı altıgen profil yapıları karbon fiber numunelerinin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.21 M8 ve M10 cıvata bağlantılı altıgen profil yapıları karbon fiber numunelerinin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1570 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1430 N olarak tespit edilmiştir.

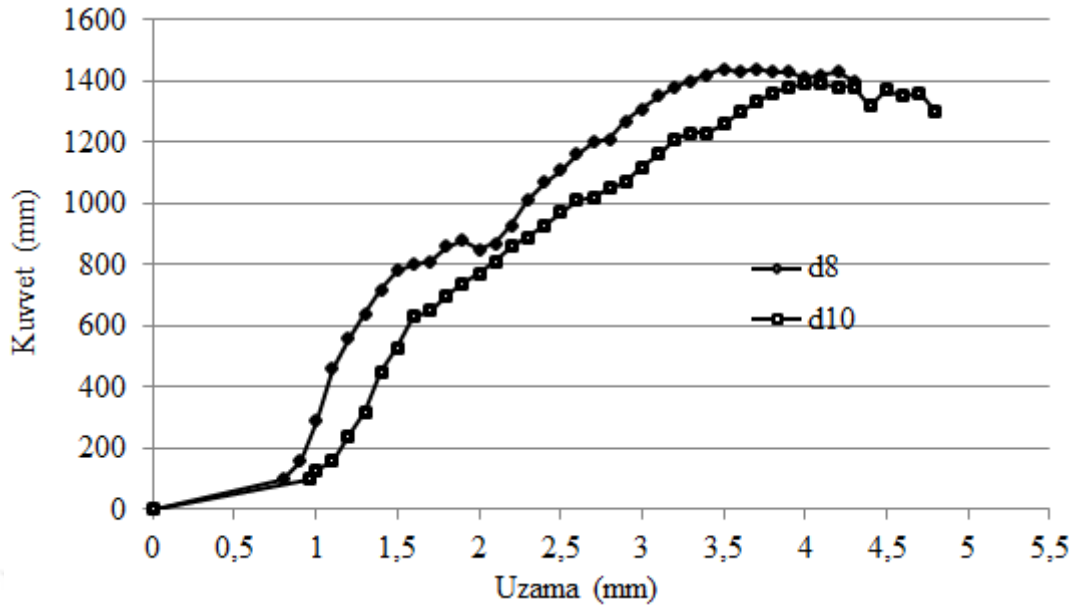
Şekil 4.22’de M8 ve M10 cıvata bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.22 M8 ve M10 cıvata bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.22’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1340 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1290 N olarak tespit edilmiştir.

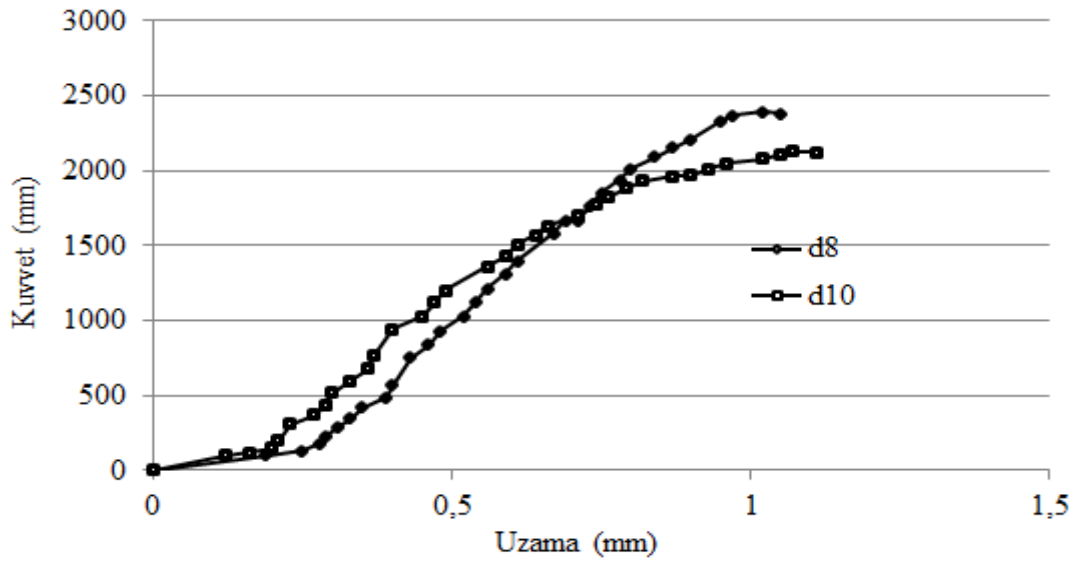
Şekil 4.23’de M8 ve M10 cıvata bağlantılı 90° altıgen profil yapıları karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.23 M8 ve M10 cıvata bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber numunelerinin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.23’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1400 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1300 N olarak tespit edilmiştir.

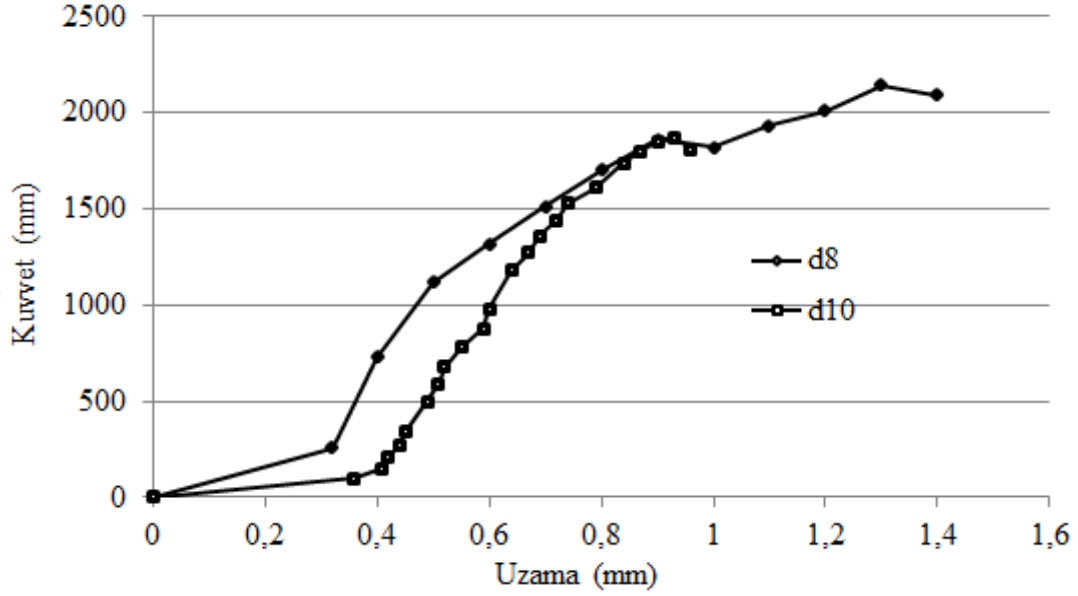
Şekil 4.24’de 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı dairesel profil yapıları karbon fiber numunelerinin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.24 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı dairesel profil yapıları karbon fiber numunelerinin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.24’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 2380 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 2120 N olarak tespit edilmiştir.

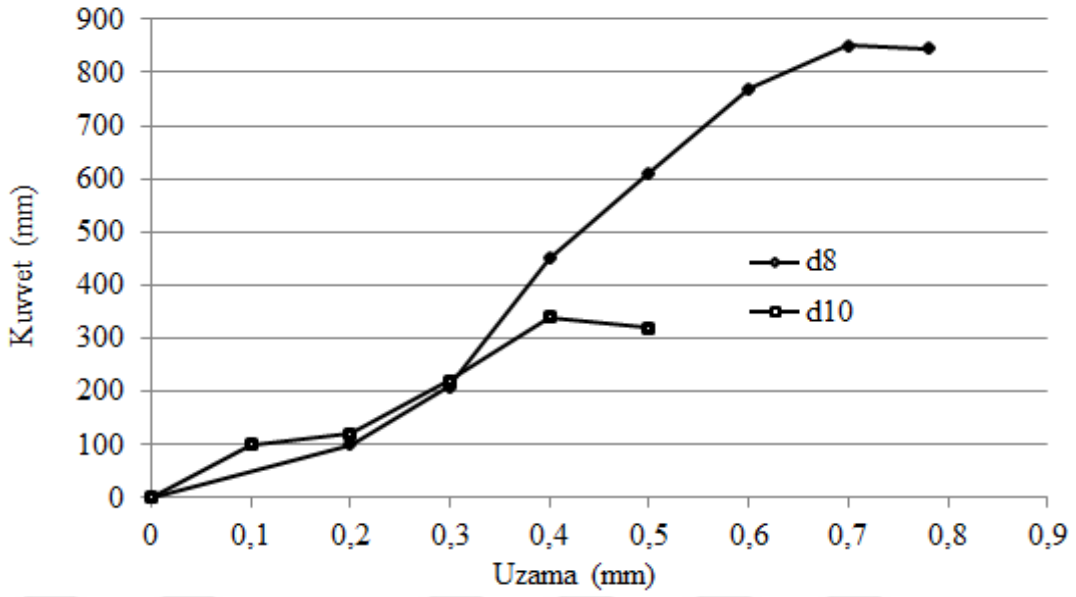
Şekil 4.25’de 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı kare profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.25 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı kare profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.25’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 2090 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1810 N olarak tespit edilmiştir.

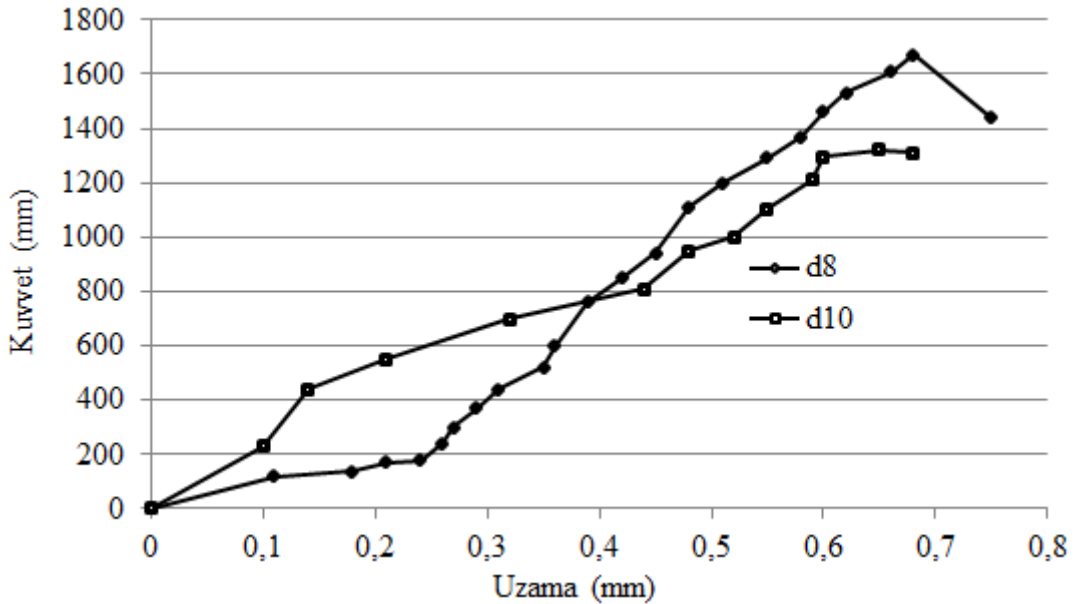
Şekil 4.26’da 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı altıgen profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.26 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı altıgen profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.26’da görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 845 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 320 N olarak tespit edilmiştir.

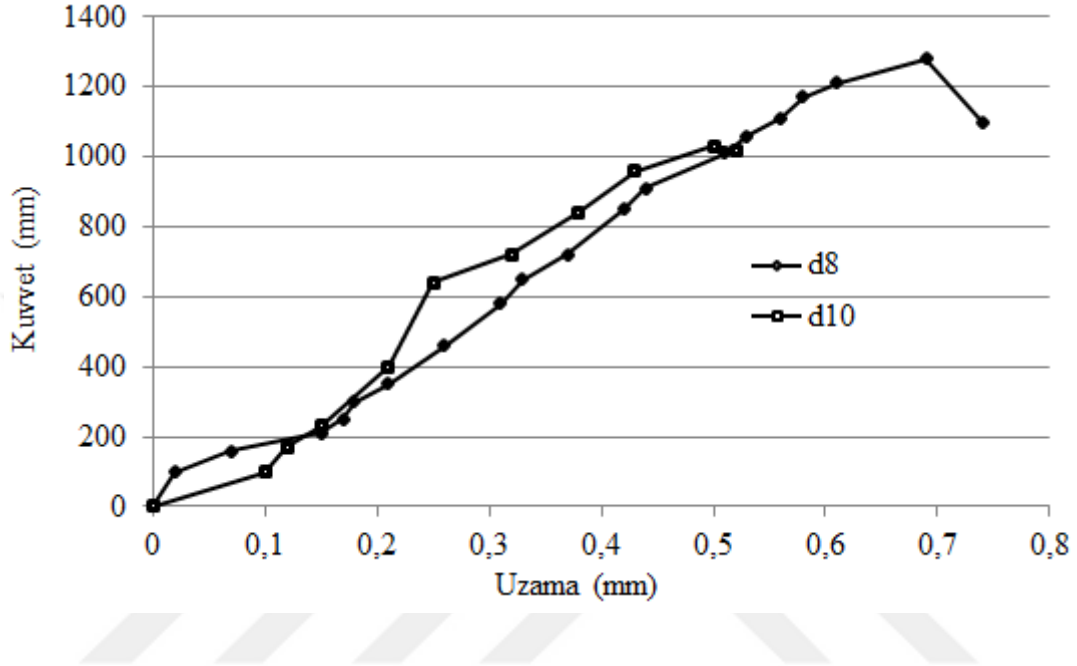
Şekil 4.27’de 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.27 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.27’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1440 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1310 N olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.28’de 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.28 8 mm ve 10 mm yapıştırma bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapılı karbon fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.28’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1100 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1020 N olarak tespit edilmiştir.

Delik çapı arttıkça, bağlantı mukavemetlerinde düşüş tespit edilmiştir. Neden olarak ise, cıvata bağlantılarında, deliğin büyüklüğünün, çekme doğrultusundaki kenarda dayanımı azaltması gösterilebilir. Yapıştırma bağlantılarında ise, deliğin çapı büyüdükçe yapışma uzunluğunun azalması neden olarak gösterilebilir.

4.3.6. Karbon Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Bağlantı Tipine Göre Karşılaştırılması

Tablo 4.6’ da, Karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 4.6 Karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen kopma kuvvetleri

Delik Şekilleri	Bağlantı Şekillerinde Meydana Gelen Kopma Kuvvetleri (N)			
	Yapıştırılmalı Bağlantılar		Civatalı Bağlantılar	
	8 mm	10 mm	M8	M10
Kare Profil	2090	1810	1080	840
Dairesel Profil	2380	2120	1670	1570
Altıgen Profil	845	320	1570	1430
45° Döndürülmüş Kare Profil	1100	1020	1340	1290
90° Döndürülmüş Altıgen Profil	1440	1310	1400	1300

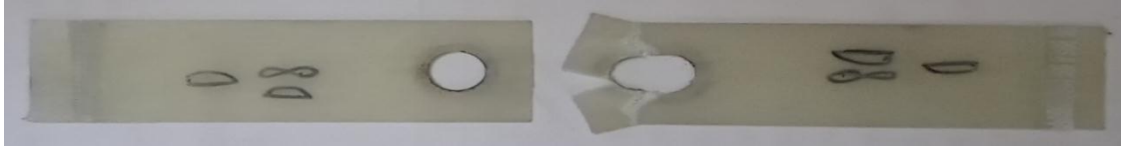
Tablo 4.6’ da görüldüğü gibi, Civatalı ve yapıştırılmalı bağlantılar kıyaslandığında, yapıştırıcı kullanılarak yapılmış dairese, kare ve döndürülmüş altıgen bağlantılardaki mukavemetlerin, civata kullanılarak yapılmış aynı profillerin mukavemetlerinden büyük olduğu görülürken, altıgen ve döndürülmüş kare bağlantılarında, civata bağlantılarının mukavemetlerinin, yapıştırma bağlantılarının mukavemetlerinden büyük olduğu görülmüştür.

4.4. Cam Fiber Kompozit Malzeme Bağlantılarının Çekme Testi Sonuçları

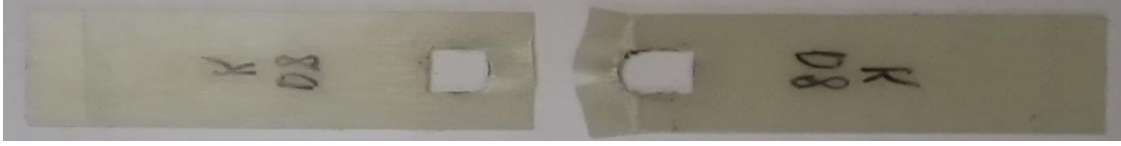
Bu başlık altında, çekme testi cihazında yapılan test sonucunda cam fiber kompozit malzeme bağlantılarının kopma anındaki hasar şekilleri ve kuvvet- uzama grafikleri verilmiştir.

4.4.1. M8 Civata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

Şekil 4.29’da M8 civata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



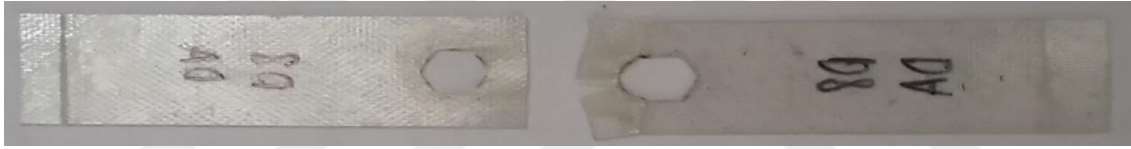
a)



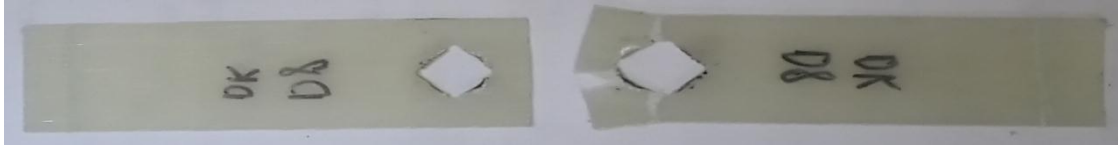
b)



c)



d)



e)

Şekil 4.29 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.29’da görülen hasar şekillerinde, çekme testi cihazının hareketli alt çenesinde bulunan bağlantı numunelerinde kopma tespit edildi. Sabit olan, üst çenede ise kayma tipi hasar görüldü. Şekil 4.29 e’deki keskin kenarlar, çentik etkisi oluşturarak hareketli çenedeki bağlantı numunesinde kayma ve çekme hasarlarının birlikte görülmesine sebep olmuştur.

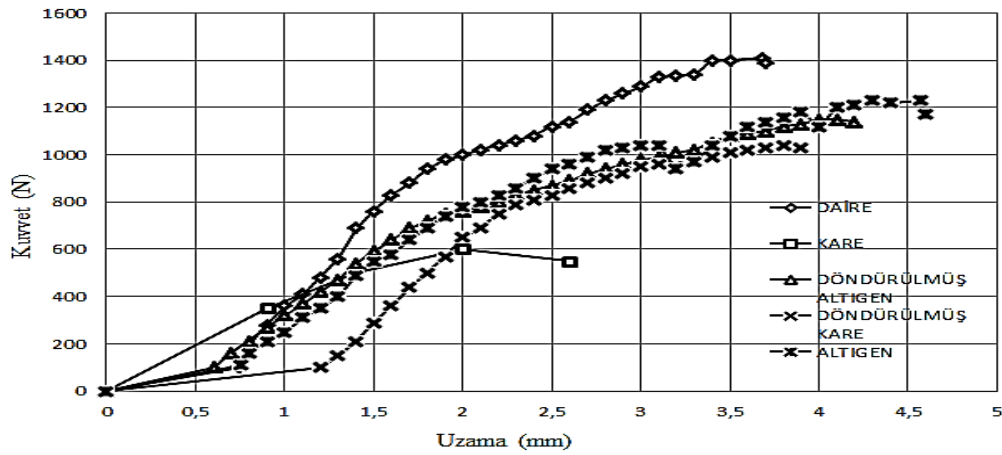
Tablo 4.7’de M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.7 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	1390	3.70
Kare	550	2.60
Altıgen	1170	4.60
Döndürülmüş Altıgen	1140	4.20
Döndürülmüş Kare	1030	3.90

Tablo 4.7’ye göre, en büyük kopma kuvveti 3.70 mm uzamayla dairesel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 2.60 mm uzamayla kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.30’da, M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.30 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

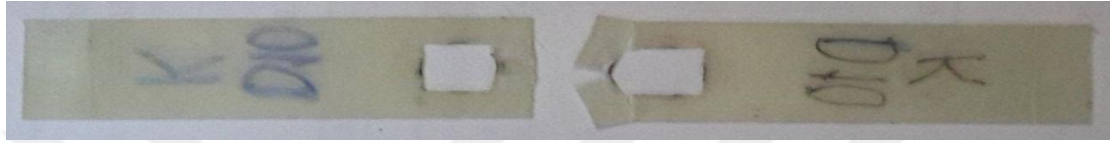
Şekil 4.30’da görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 1670 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 1080 N olarak tespit edilmiştir.

4.4.2. M10 Cıvata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

Şekil 4.31’de M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



a)



b)



c)



d)



e)

Şekil 4.31 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları;

a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.31’de görülen hasar şekillerinde, çekme testi cihazının hareketli alt çenesinde bulunan bağlantı numunelerinde kopma tespit edildi. Sabit olan, üst çenede ise kayma tipi hasar görüldü. Şekil 4.31 e’deki keskin kenarlar, çentik etkisi oluşturarak hareketli çenedeki bağlantı numunesinde kayma ve çekme hasarlarının birlikte görülmesine sebep olmuştur.

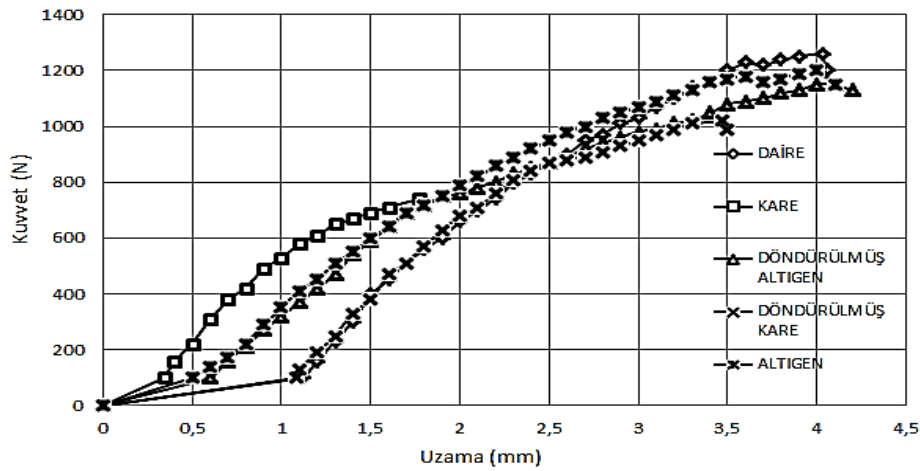
Tablo 4.8’de M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.8 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	1200	4.06
Kare	720	1.80
Altıgen	1150	4.10
Döndürülmüş Altıgen	1130	4.20
Döndürülmüş Kare	990	3.50

Tablo 4.8’e göre, en büyük kopma kuvveti 4.06 mm uzamayla daireseel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 1.80 mm uzamayla kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.32’de, M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

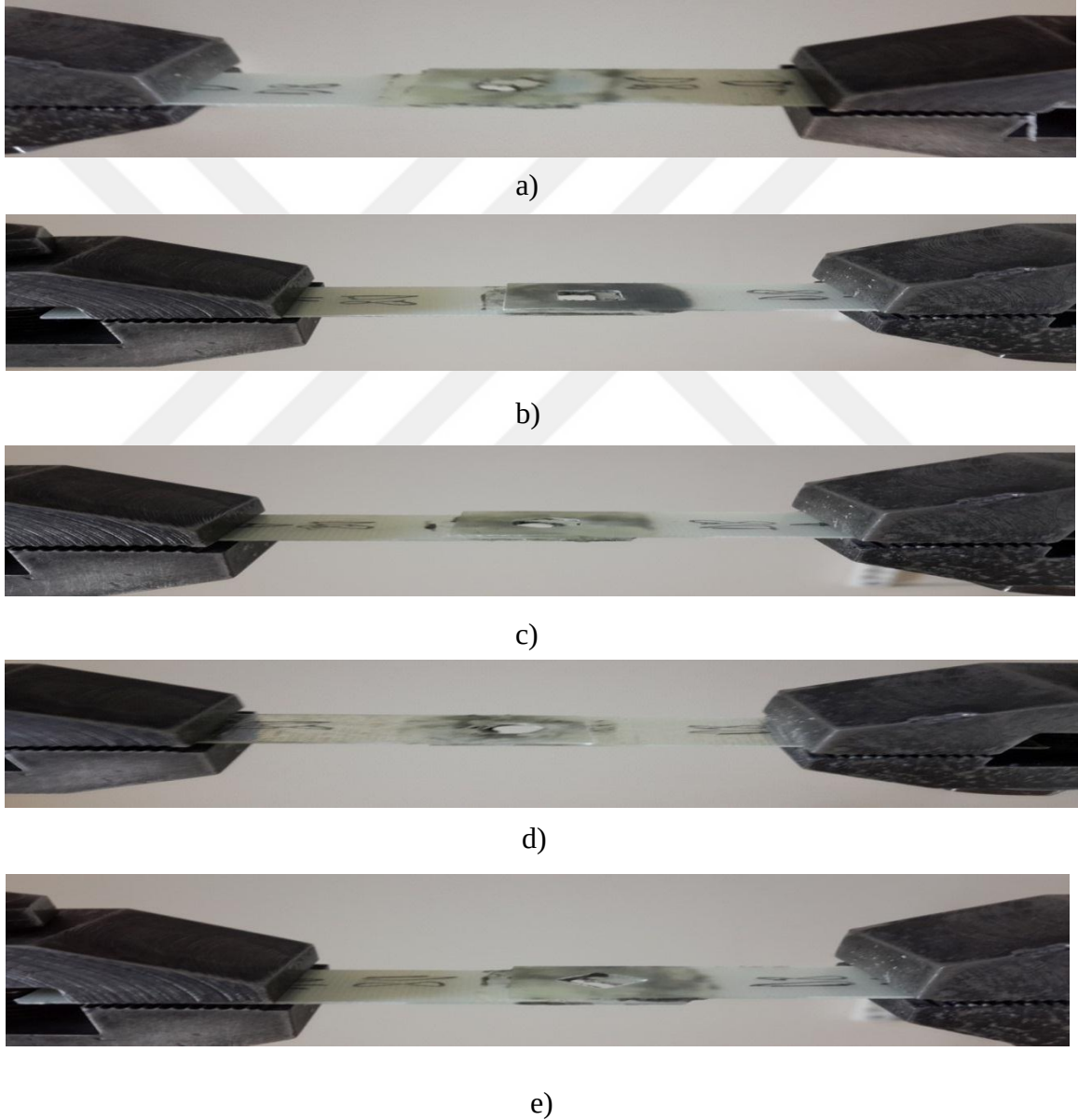


Şekil 4.32 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.32’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 1570 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 840 N olarak tespit edilmiştir.

4.4.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

Şekil 4.33’de 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



Şekil 4.33 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.33’de görülen hasar şekillerinde, kopma hasarının yapıştırma bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Kompozit malzemelerde ise hasar tespit edilmemiştir.

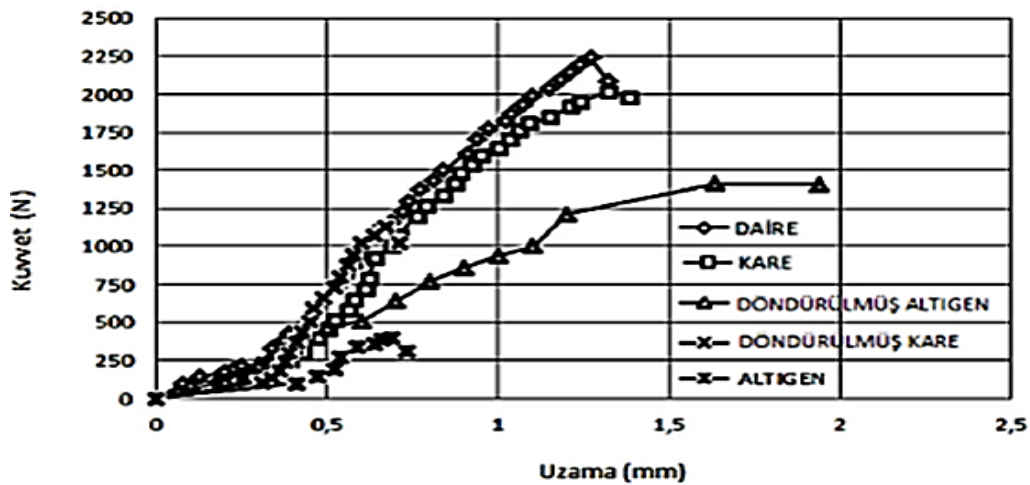
Tablo 4.9’da, 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.9 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	2090	1.32
Kare	1980	1.38
Altıgen	310	0.73
Döndürülmüş Altıgen	1405	1.94
Döndürülmüş Kare	1020	0.71

Tablo 4.9’ da göre, en büyük kopma kuvveti 1.32 mm uzamayla dairel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 0.73 mm uzamayla altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.34’de, 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.34 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.34’de görüldüğü gibi, en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 2380 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 845 N olarak tespit edilmiştir.

4.4.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

Şekil 4.35’de 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarında görülen hasar şekilleri verilmiştir.



a)



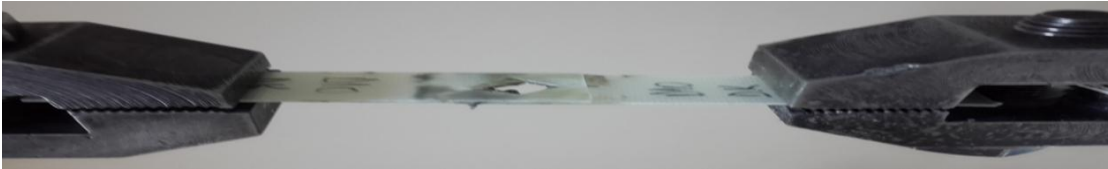
b)



c)



d)



e)

Şekil 4.35 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 4.35’de görülen hasar şekillerinde, kopma hasarının yapıştırma bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Kompozit malzemelerde ise hasar tespit edilmemiştir.

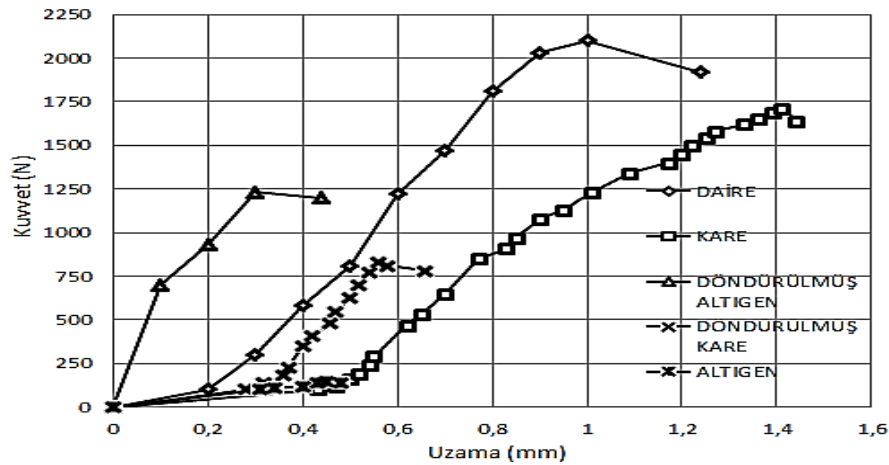
Tablo 4.10’da, 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları verilmiştir.

Tablo 4.10 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen kopma kuvvetleri ve uzama miktarları

Delik Şekilleri	Kopma Kuvvetleri (N)	Uzama Miktarları (mm)
Dairesel	1920	1.24
Kare	1640	1.44
Altıgen	140	0.48
Döndürülmüş Altıgen	1200	0.44
Döndürülmüş Kare	780	0.66

Tablo 4.10’ da göre, en büyük kopma kuvveti 1.24 mm uzamayla dairesel profil bağlantısında görülürken, en küçük kopma kuvveti 0.48 mm uzamayla altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 4.36’da, 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

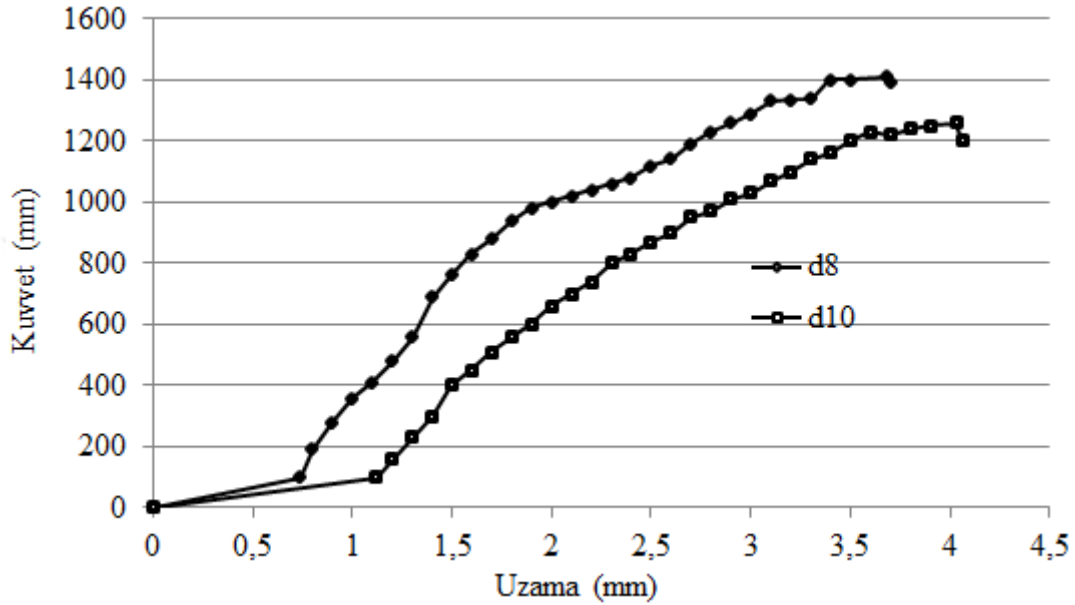


Şekil 4.36 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.36’da görüldüğü gibi, en büyük kopma kuvveti dairesel profilde 2120 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise kare profilde 320 N olarak tespit edilmiştir.

4.4.5. Cam Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Delik Çapına Göre Karşılaştırılması

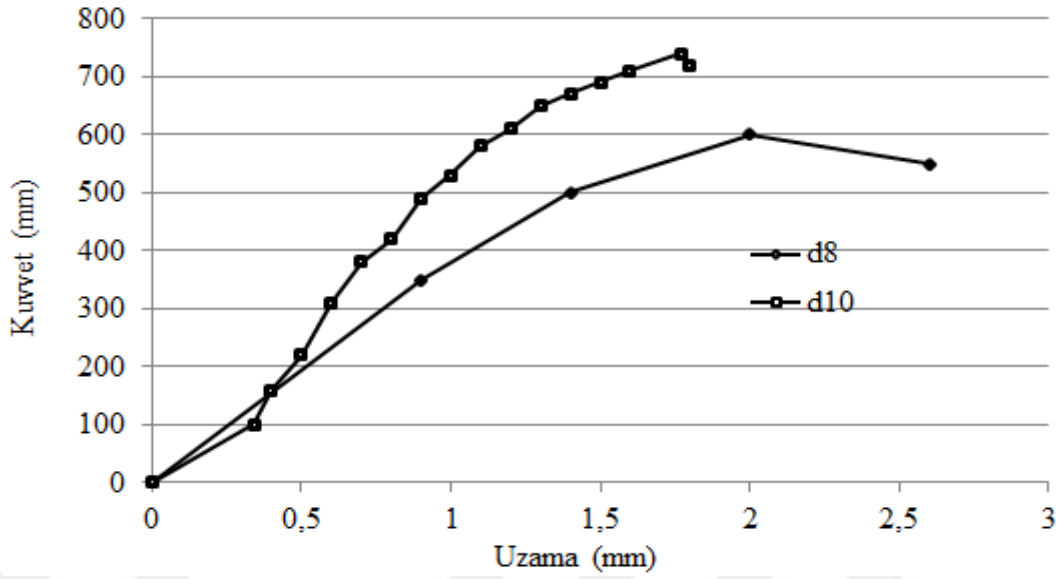
Şekil 4.37’de 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı dairesel profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.37 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı dairesel profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.37’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1390 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1200 N olarak tespit edilmiştir.

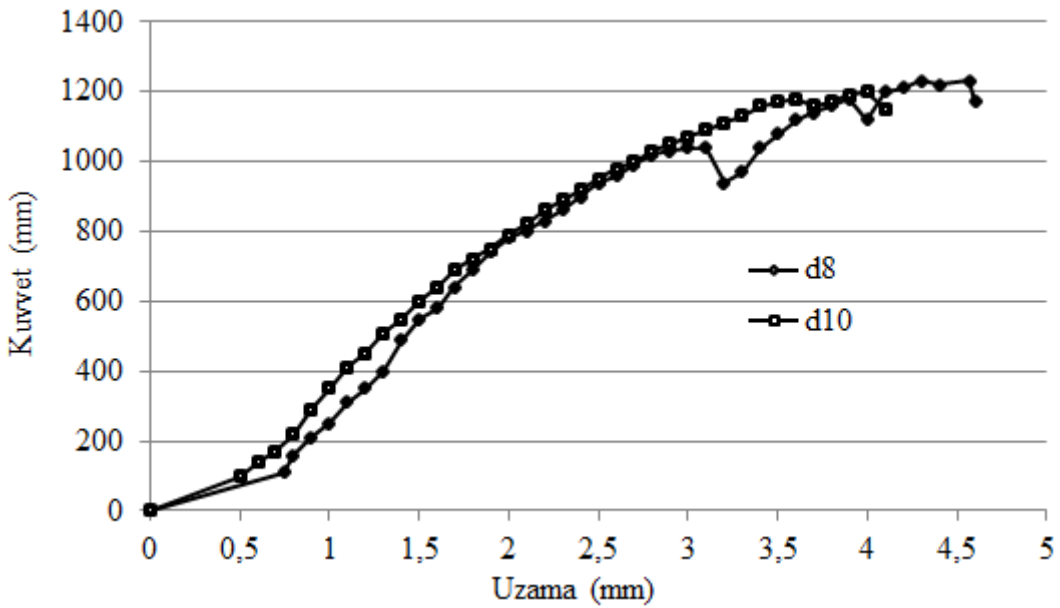
Şekil 4.38’de 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı kare profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.38 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı kare profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.38’da görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 550 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 720 N olarak tespit edilmiştir.

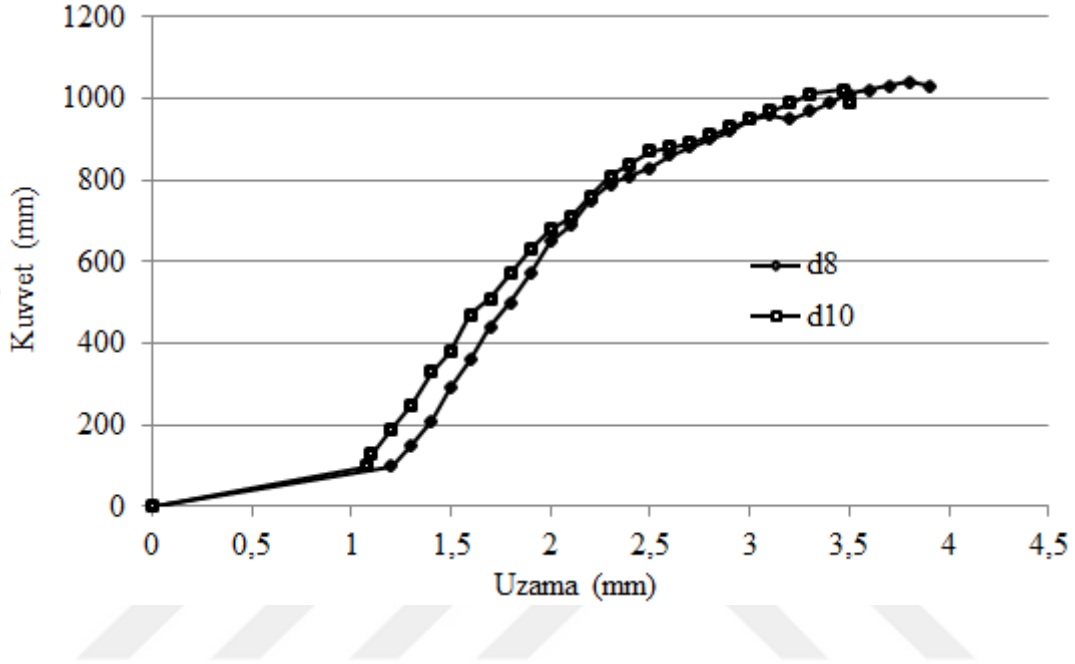
Şekil 4.39’da 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı altıgen profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.39 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı altıgen profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.39’da görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1170 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1150 N olarak tespit edilmiştir.

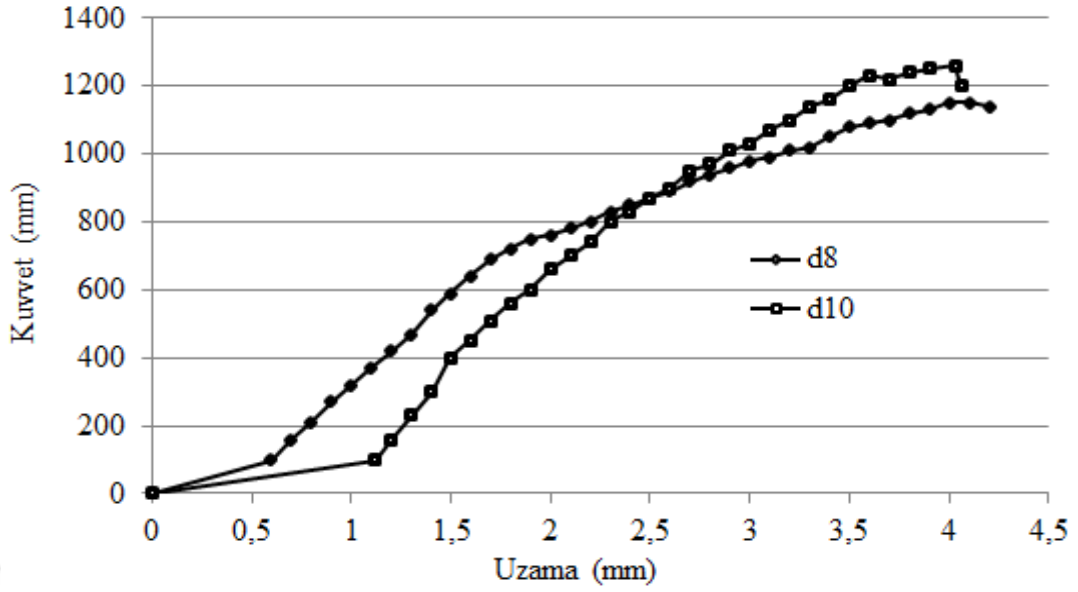
Şekil 4.40’da 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.40 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.40’da görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1030 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 990 N olarak tespit edilmiştir.

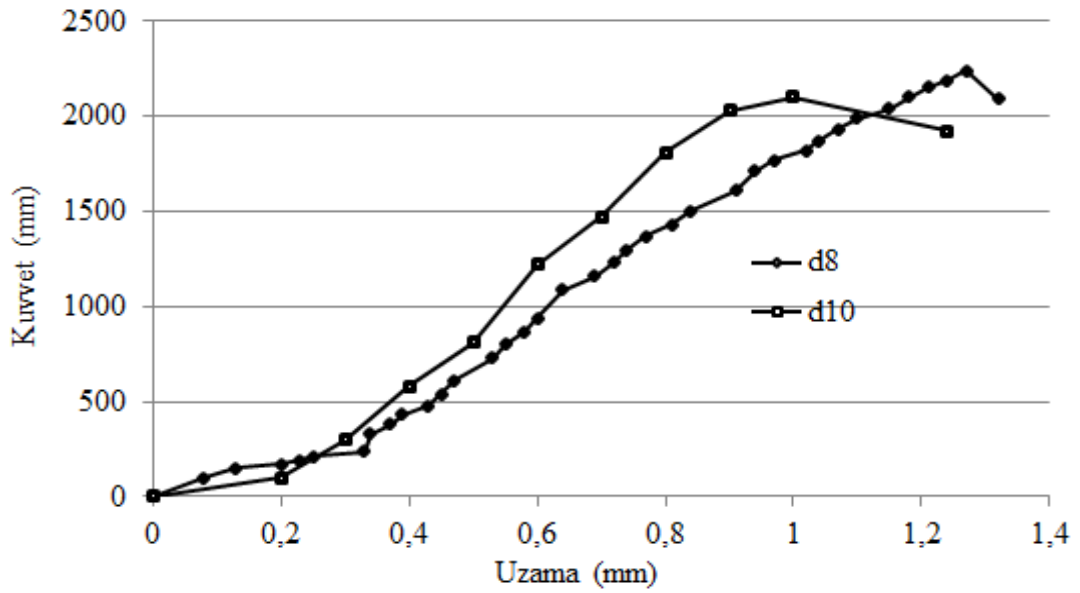
Şekil 4.41’de 8 mm ve 10 mm çapında cıvata bağlantılı 90° altıgen profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.41 8 mm ve 10 mm çapında civata bağlantılı 90° altıgen profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.41’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1140 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1130 N olarak tespit edilmiştir.

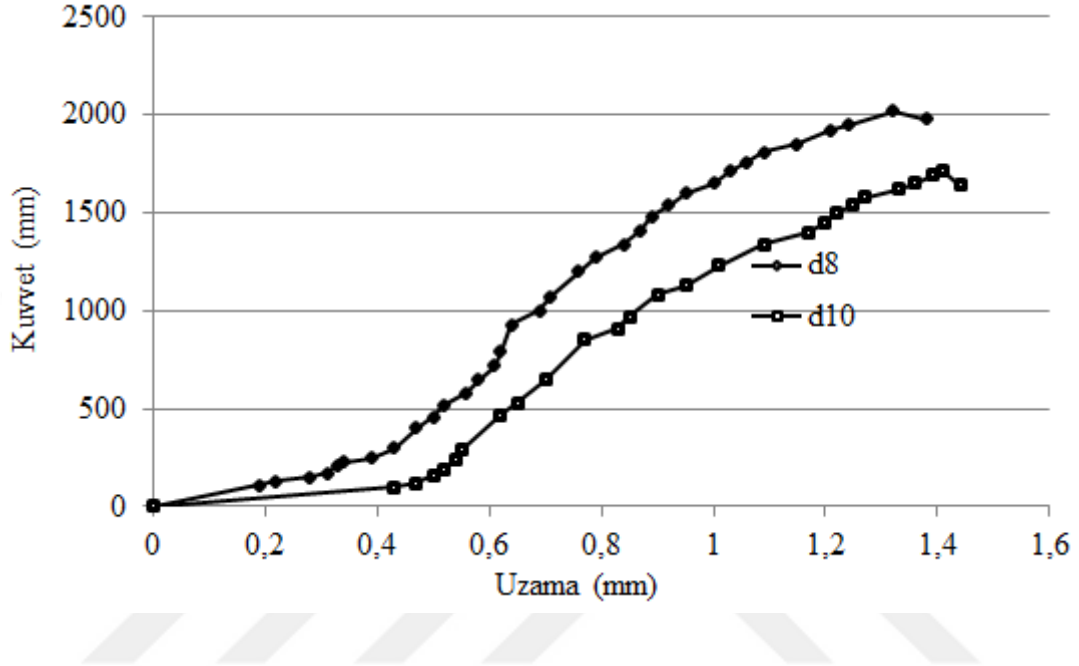
Şekil 4.42’de 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı dairesel profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.42 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı dairesel profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.42’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 2090 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1920 N olarak tespit edilmiştir.

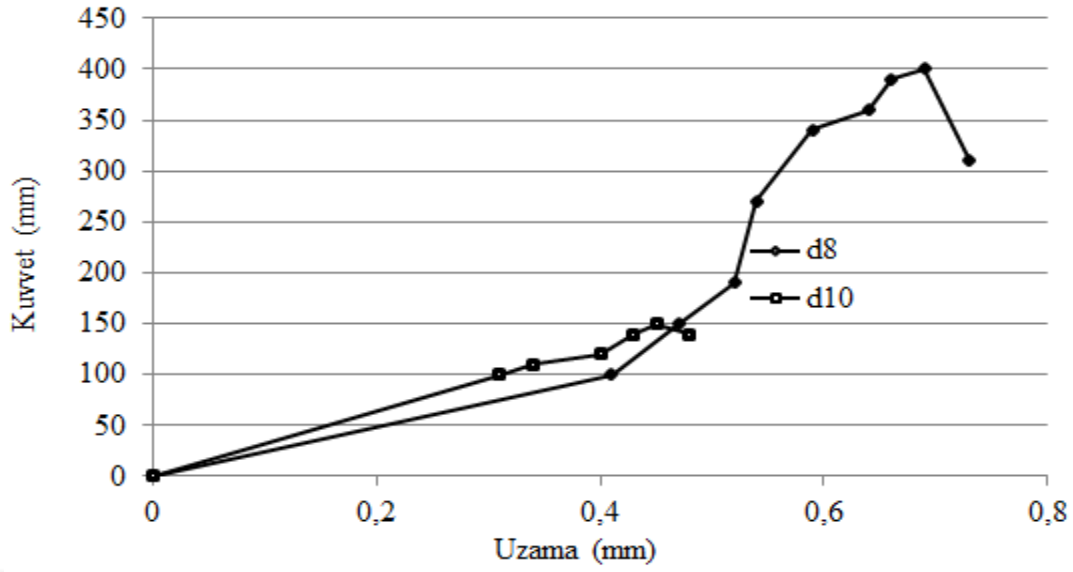
Şekil 4.43’de 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı kare profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.43 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı kare profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.43’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1980 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1640 N olarak tespit edilmiştir.

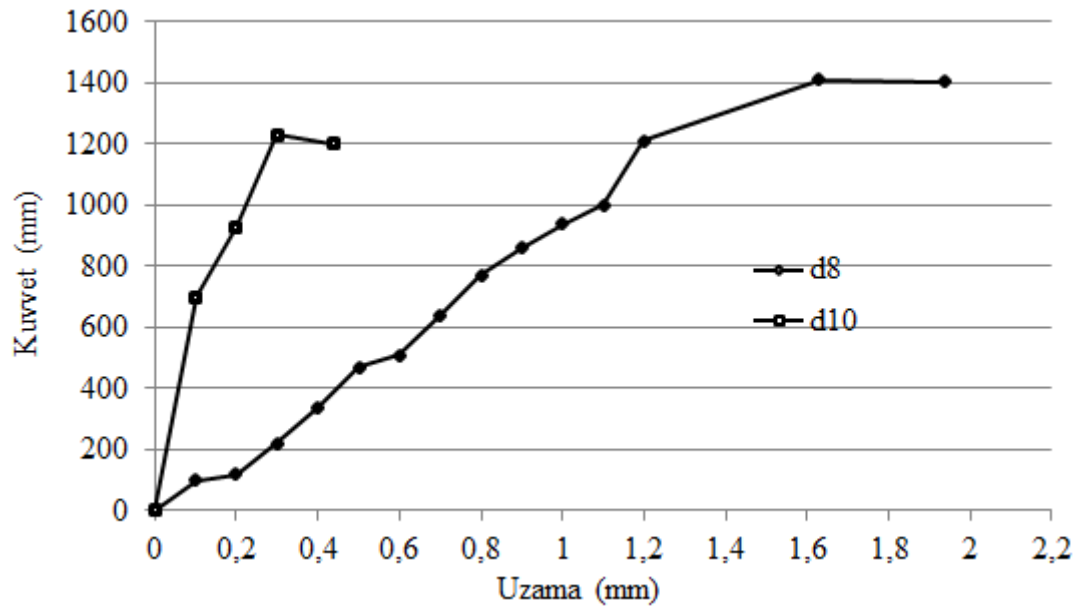
Şekil 4.44’de 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı altıgen profil yapılı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.44 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı altıgen profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet-uzama grafiği

Şekil 4.44’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 310 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 140 N olarak tespit edilmiştir.

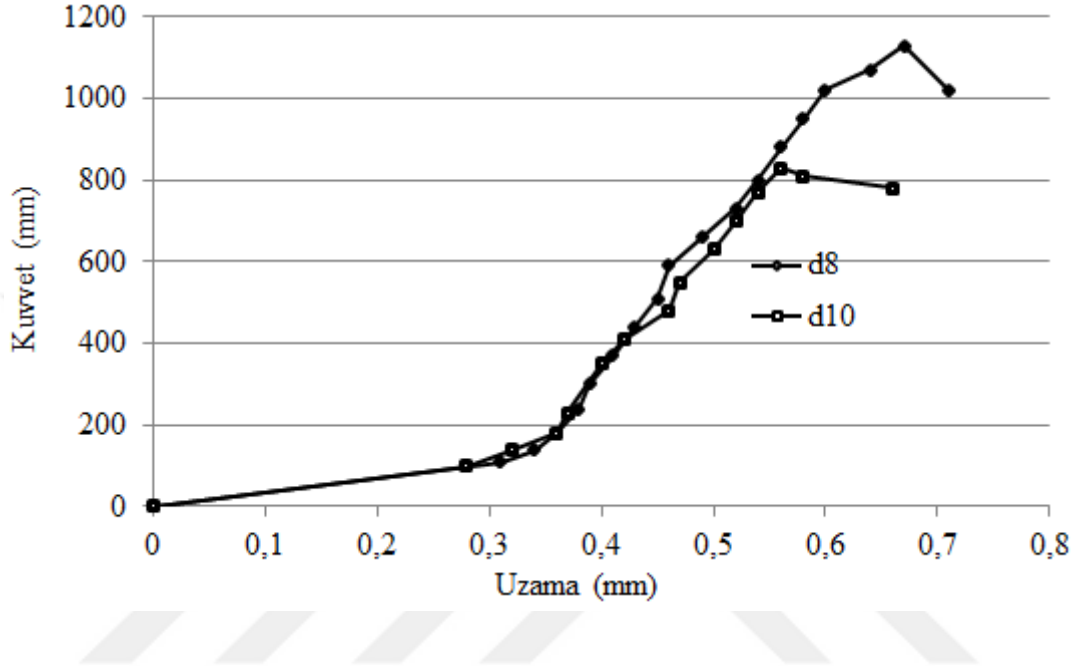
Şekil 4.45’de 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.45 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı 90° döndürülmüş altıgen profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.45’de görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1405 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 1200 N olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.46’da 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.46 8 mm ve 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı 45° döndürülmüş kare profil yapı cam fiber numunelerin kuvvet- uzama grafiği

Şekil 4.46’da görüldüğü gibi en büyük kopma kuvveti 8 mm çaptaki profil yapısında 1020 N olarak, en küçük kopma kuvveti ise 10 mm çaptaki profil yapısında 780 N olarak tespit edilmiştir.

Delik çapı arttıkça, bağlantı mukavemetlerinde düşüş tespit edilmiştir. Neden olarak ise, cıvata bağlantılarında, deliğin büyüklüğünün, çekme doğrultusundaki kenarda dayanımı azaltması gösterilebilir. Yapıştırma bağlantılarında ise, deliğin çapı büyüdükçe yapışma uzunluğunun azalması neden olarak gösterilebilir.

4.4.6. Cam Fiber Malzeme Bağlantılarının Deneysel Çalışma Sonuçlarının Bağlantı Tipine Göre Karşılaştırılması

Tablo 4.11’ de, cam fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 4.11 Cam fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen kopma kuvvetleri

Delik Şekilleri	Bağlantı Şekillerinde Meydana Gelen Kopma Kuvvetleri (N)			
	Yapıştırırmalı Bağlantılar		Civatalı Bağlantılar	
	8 mm	10 mm	M8	M10
Kare Profil	1980	1640	550	720
Dairesel Profil	2090	1920	1390	1200
Altıgen Profil	310	140	1170	1150
45° Döndürülmüş Kare Profil	1020	780	1030	990
90° Döndürülmüş Altıgen Profil	1405	1200	1140	1130

Tablo 4.11’ de görüldüğü gibi, civatalı ve yapıştırırmalı bağlantılar kıyaslandığında, yapıştırıcı kullanılarak yapılmış dairese, kare ve döndürülmüş altıgen bağlantılardaki mukavemetlerin, civata kullanılarak yapılmış aynı profillerin mukavemetlerinden büyük olduğu görülürken, altıgen ve döndürülmüş kare bağlantılarında, civata bağlantılarının mukavemetlerinin, yapıştırma bağlantılarının mukavemetlerinden büyük olduğu görülmüştür.

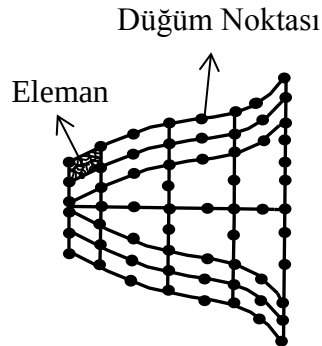
5. SAYISAL ÇALIŞMALAR

Karmaşık yapıya sahip problemler sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülebilirler. Sonlu elemanlar yönteminde ilk olarak büyük parça, her biri sabit sayı ve belirli sayıda belirsiz değişkenli sürekli fonksiyona sahip küçük parçalara ayrılır. Küçük parçalardaki düğüm noktaları için tanım denklemleri elde edilir. Tanımlanan bu denklemler ve modeldeki düğüm noktası sayısı kullanılarak polinomun derecesi belirlenir. Elde edilen polinomlar içerisinde, yaklaşım fonksiyonları yardımıyla kullanılacak enterpolasyon yöntemi tespit edilir.

Basınç, sıcaklık, yer değiştirme miktarı gibi sürekli ortamlardaki değişkenler için sonlu sayıda bilinmeyene sahip yüksek mertebeli veya lineer fonksiyon tanımlanır. Küçük alanları tanımlayan fonksiyonların birleşiminden büyük alanı ifade eden fonksiyon elde edilerek bu fonksiyonun çözülmesi ile sayısal değerler elde edilebilmektedir.

Günümüzde Ansys, Nastran, Franc gibi sonlu elemanlar yöntemini uygulayan programlar kullanılarak bir parçanın analizinin yapılması deneysel yöntemlere göre ekonomik olmasının yanı sıra çeşitli avantajlarda sağlamaktadır. Bunlar;

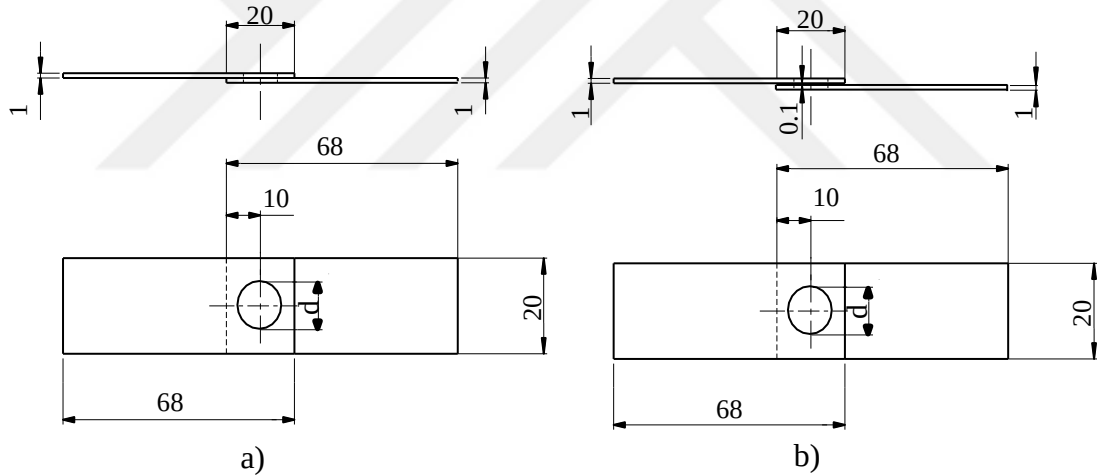
- Sonlu elemanlarda tasarlanan model gerçek model ile tam uyum sağlamaktadır.
- Karmaşık yapıya sahip parçalara çözüm için gerekli sınır şartlarının uygulanması ve analiz işleminin yapılması kolaydır.
- Sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözülmesi istenilen problemlere ilişkin sıcaklık, basınç, kuvvet, yer değiştirme gibi denklemler elde edilebilir. Ayrıca uygulanan sınır şartlarına bağlı olarak, parçadaki değişimin animasyon olarak görülmesine imkan sağlar. Şekil 5.1' de sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenen yapısal bir analiz uygulaması verilmiştir [50].



Şekil 5.1 Yapısal bir analizde sonlu elemanlar yönteminin uygulanışı [50]

5.1 Sayısal Çalışmalarda Kullanılan Yöntem ve Deney Numunelerinin Hazırlanması

Bu bölümde, ANSYS 14 sonlu elemanlar programı kullanılarak şekil 5.2’ de gösterilen, boyutlarda tasarlanan numunelere, deneysel çalışmalarda elde edilen çekme kuvvetleri uygulanarak, kuvvet-uzama eğrileri elde edildi ve uzama doğrultusunda gerilme- gerinme dağılımları belirlendi. Gerilme analizi sonuçlarından yararlanarak, oluşabilecek hasarın bağlantının hangi bölgelerinde meydana geleceği tespit edilmeye çalışıldı. Tasarımlarda şekil 5.3’ te görüldüğü gibi, kare, dairesel, altıgen, 45° döndürülmüş kare ve 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları numuneler kullanılmıştır. Profil delikleri 8 mm ve 10 mm çapındadır. Birleştirilen karbon fiber malzemeler ve cam fiber malzemeler için solid 186 eleman tipi seçildi. Bu malzemelerin çekme testi sonucunda elde edilen mekanik özellikleri tablo 5.1’ de verilmiştir. Gerilme analizleri için bu mekanik özellikler kullanılmıştır. Yapıştırıcı kullanılarak oluşturulan tasarımlarda, yapıştırıcı malzemesi için solid 185 eleman tipi seçildi.



Şekil 5.2 Bağlantı tasarımlarında kullanılan teknik resim; a) Cıvata bağlantılı modellerde kullanılan tasarım, b) Yapıştırma bağlantılı modellerde kullanılan tasarım

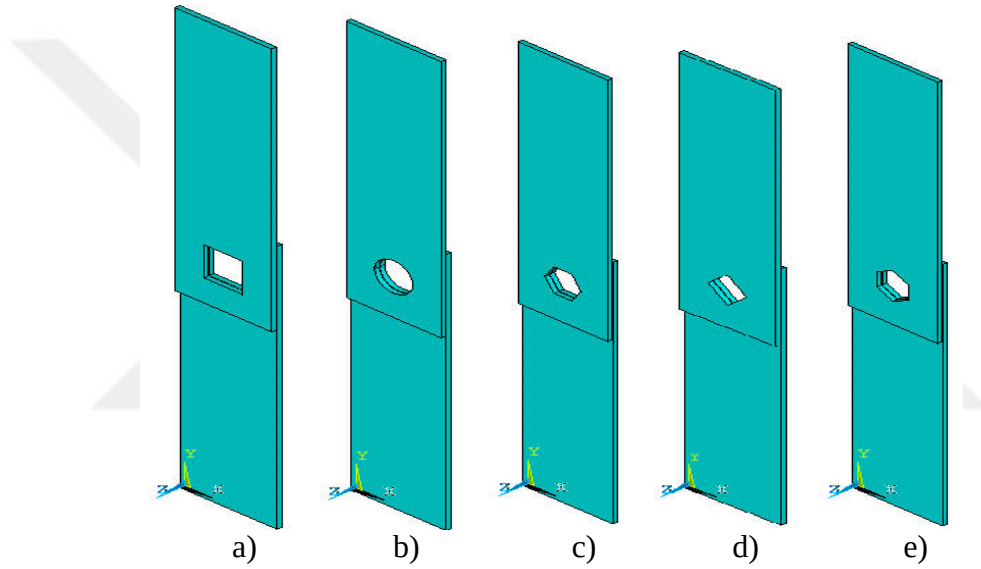
Tablo 5.1 Bağlantı tasarımlarında kullanılan karbon fiber kompozit ve cam fiber kompozit malzemelerin mekanik özellikleri

Malzeme Türü	E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	ν_{12}	ν_{23}	ν_{13}	G_{12} (MPa)	G_{23} (MPa)	G_{13} (MPa)
Karbon Fiber Kompozit	210035	19347	19347	0.2	0.2	0.2	6645.7	6645.7	6645.7
Cam Fiber Kompozit	47902	20395	20395	0.10	0.10	0.10	7812.9	7812.9	7812.9

Epoksi esaslı, çift komponentli, tiksotropik yapıştırıcının mekanik özellikleri tablo 5.2’ de verilmiştir. Yapıştırıcı, 60 dakikalık çalışma süresine ve 180 dakikalık kürlenme süresine imkan vermektedir.

Tablo 5.2 Bağlantı tasarımlarında kullanılan yapıştırıcı malzemenin mekanik özellikleri[51].

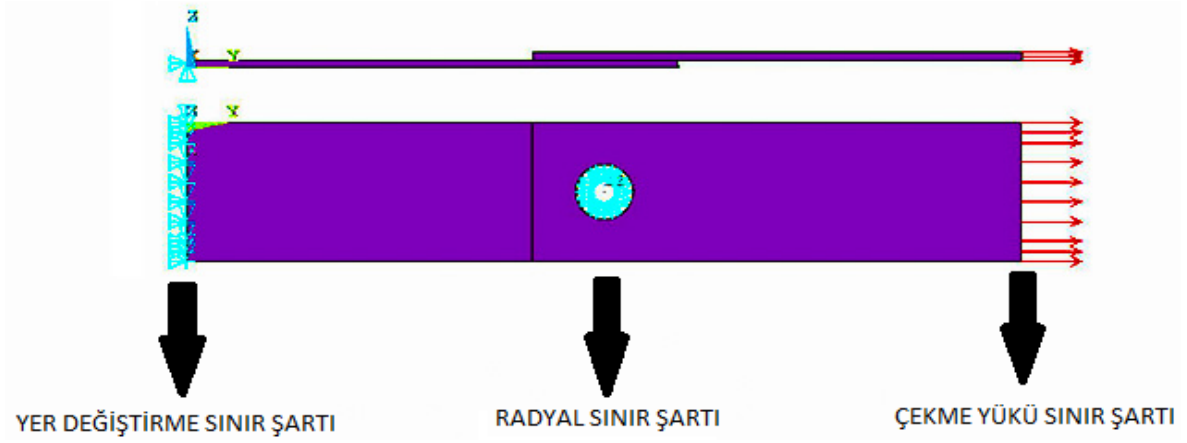
E (MPa)	v
2000	0.28



Şekil 5.3 Deney numuneleri; a) Kare profil yapılı bağlantı, b) Dairesel profil yapılı bağlantı, c) Altıgen profil yapılı bağlantı, d) 45° döndürülmüş kare profil yapılı bağlantı, e) 90° döndürülmüş altıgen profil yapılı bağlantı

Gerilme analizleri yapılırken cıvata tasarımlarında radyal sınır şartı kullanılarak, bağlantıların üzerindeki deliklerde yer değiştirmelerin olmadığı kabul edilerek modeller oluşturulmuştur [52].

Yapıştırıcı ve cıvata kullanılarak oluşturulmuş bağlantılarda kullanılan sınır şartları şekil 5.4’ te verilmiştir.



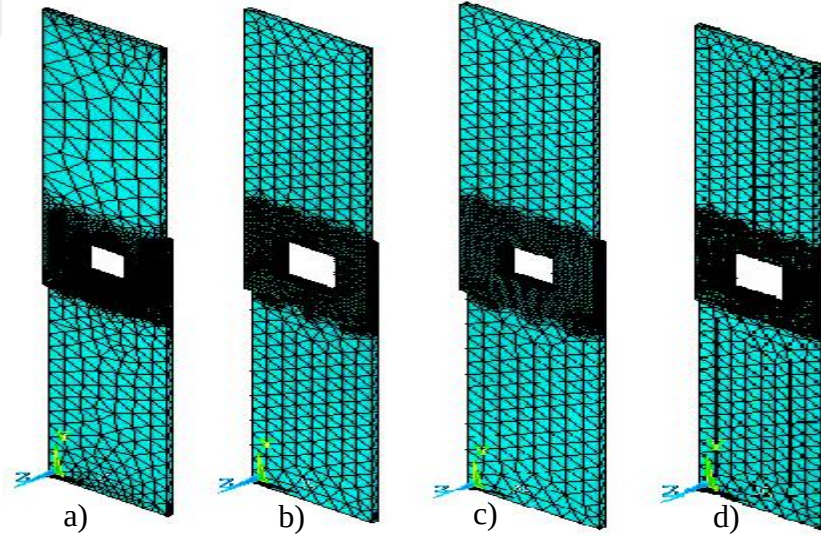
Şekil 5.4 Bağlantılarda kullanılan sınır şartları

5.2. Kompozit Malzemelerin Sonlu Elemanlar Modelleri

Bu bölümde verilen bağlantı tasarımlarının sonlu eleman modelleri oluşturulurken, kullanılan elemanlara ayırma işlemi hassasiyeti bindirme bölgesinde arttırılmıştır.

5.2.1. Kare Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri

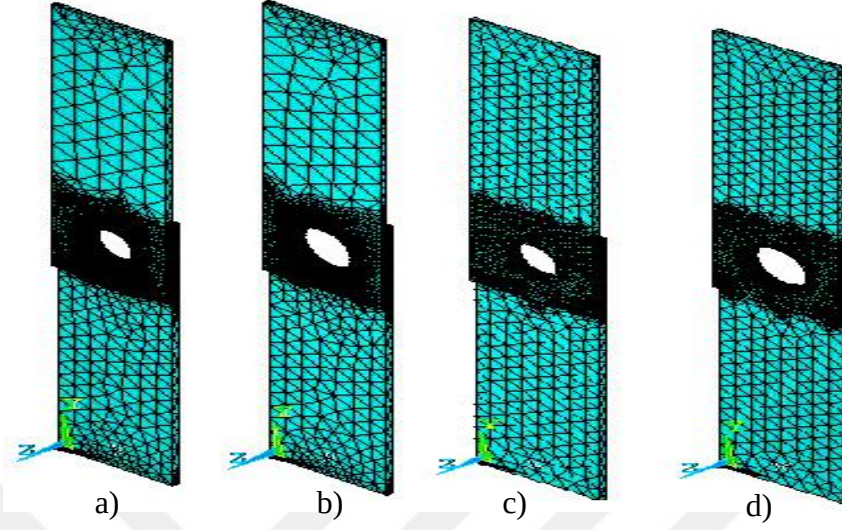
Şekil 5.5'te, kare profil yapıları bağlantıların sonlu eleman modelleri verilmiştir.



Şekil 5.5 Kare profil yapıları bağlantıların sonlu eleman modelleri; a) 8 mm çapında yapıştırma bağlantısı, b) 10 mm çapında yapıştırma bağlantısı, c) M8 civata bağlantısı, d) M10 civata bağlantısı

5.2.2. Dairesel Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri

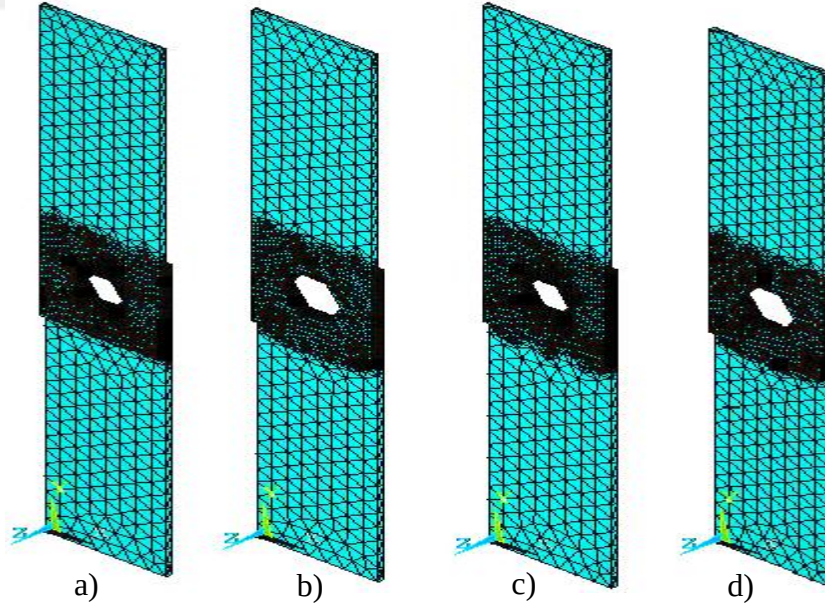
Şekil 5.6’da dairesel profil yapı bağlantıların sonlu eleman modelleri verilmiştir.



Şekil 5.6 Dairesel profil yapı bağlantıların sonlu eleman modelleri; a) 8 mm çapında yapıştırma bağlantısı, b) 10 mm çapında yapıştırma bağlantısı, c) M8 civata bağlantısı, d) M10 civata bağlantısı

5.2.3. Altıgen Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri

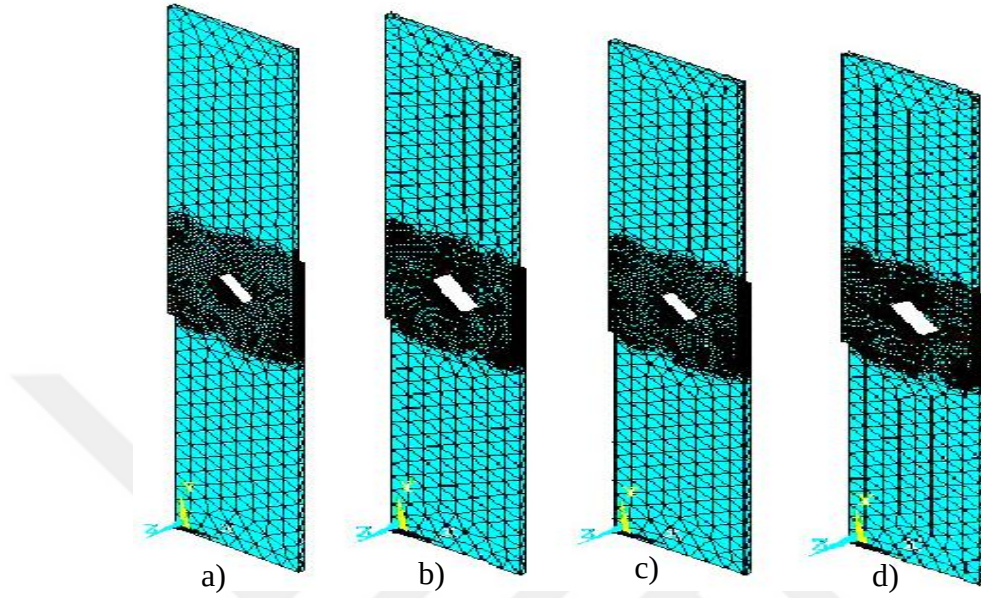
Şekil 5.7’de altıgen profil yapı bağlantıların sonlu eleman modelleri verilmiştir.



Şekil 5.7 Altıgen profil yapı bağlantıların sonlu eleman modelleri; a) 8 mm çapında yapıştırma bağlantısı, b) 10 mm çapında yapıştırma bağlantısı, c) M8 civata bağlantısı, d) M10 civata bağlantısı

5.2.4. 45° Döndürülmüş Kare Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri

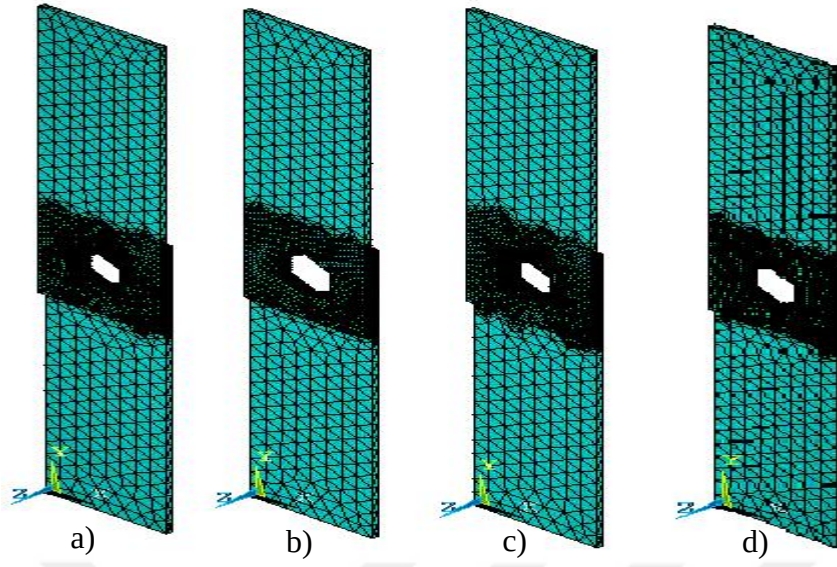
Şekil 5.8’de 45° döndürülmüş kare profil yapıları bağlantıların sonlu eleman modelleri verilmiştir.



Şekil 5.8 45° döndürülmüş kare profil yapıları bağlantıların sonlu eleman modelleri; a) 8 mm çapında yapıştırma bağlantısı, b) 10 mm çapında yapıştırma bağlantısı, c) M8 civata bağlantısı, d) M10 civata bağlantısı

5.2.5. 90° Döndürülmüş Altıgen Profil Yapılı Bağlantıların Sonlu Elemanlar Modelleri

Şekil 5.9’da 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları bağlantıların sonlu eleman modelleri verilmiştir.



Şekil 5.9 90° döndürülmüş altıgen profil yapıli bağlantıların sonlu eleman modelleri, a) 8 mm çapında yapıştırma bağlantısı, b) 10 mm çapında yapıştırma bağlantısı, c) M8 civata bağlantısı, d) M10 civata bağlantısı

Tablo 5.3’ te, oluşturulan tasarımlarda bulunan eleman sayısı, düğüm sayısı ve elemanlara ayırma boyutu verilmiştir.

Tablo 5.3 Sonlu eleman tasarımlarında bulunan eleman sayısı, düğüm sayısı ve elemanlara ayırma boyutu

Bağlantı Çeşitleri	Düğüm Sayısı (Adet)	Eleman Sayısı (Adet)	Genel Eleman Boyutu	Bindirme Bölgesi Eleman Boyutu (Min. 1- Maks. 5)
8 mm Dairesel Yapıştırma Bağlantısı	58130	308620	0,7	3
10 mm Dairesel Yapıştırma Bağlantısı	49837	260979	0,7	3
M8 Dairesel Civata Bağlantısı	12958	62804	0,7	3
M10 Dairesel Civata Bağlantısı	10705	50892	0,7	3
8 mm Kare Yapıştırma Bağlantısı	40741	208109	0,7	3
10 mm Kare Yapıştırma Bağlantısı	15499	75916	0,7	3
M8 Kare Civata Bağlantısı	12936	62777	0,7	3
M10 Kare Civata Bağlantısı	10345	49074	0,7	3
8 mm Altıgen Yapıştırma Bağlantısı	18911	94601	0,7	3
10 mm Altıgen Yapıştırma Bağlantısı	15424	75871	0,7	3
M8 Altıgen Civata Bağlantısı	10408	49622	0,7	3
M10 Altıgen Civata Bağlantısı	10119	46186	0,7	3
8 mm Döndürülmüş Altıgen Yapıştırma Bağlantısı	18112	90621	0,7	3
10 mm Döndürülmüş Altıgen Yapıştırma Bağlantısı	14750	71721	0,7	3
M8 Döndürülmüş Altıgen Civata Bağlantısı	10212	48725	0,7	3
M10 Döndürülmüş Altıgen Civata Bağlantısı	9426	44504	0,7	3
8 mm Döndürülmüş Kare Yapıştırma Bağlantısı	14744	72221	0,7	3
10 mm Döndürülmüş Kare Yapıştırma Bağlantısı	13979	66712	0,7	3
M8 Döndürülmüş Kare Civata Bağlantısı	9646	45414	0,7	3
M10 Döndürülmüş Kare Civata Bağlantısı	9340	43447	0,7	3

Tablo 5.3' e göre, eleman sayısı ve düğüm sayısı en fazla olan 8 mm çapında dairesel yapıştırma bağlantısı iken, eleman sayısı ve düğüm sayısı en az olan M10 çapında döndürülmüş kare civata bağlantısı olarak tespit edilmiştir.

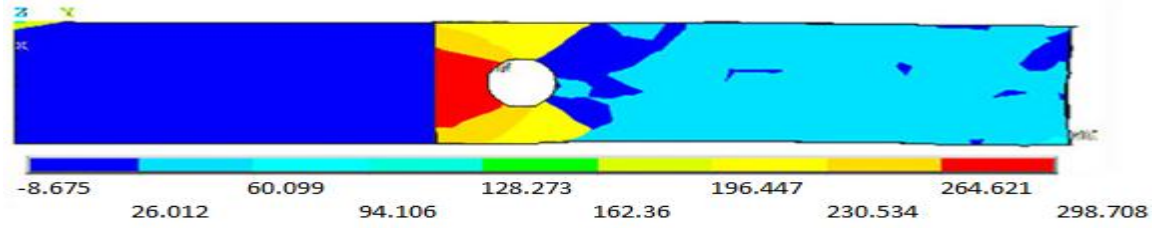
Gerilme analizi sonuçlarında, yalnızca kompozit malzemeler üzerindeki gerilme dağılımları incelenmiş olup, cıvatalar üzerinde ve yapıştırıcı bölgelerinde meydana gelen gerilme dağılımları verilmemiştir.

5.3. Karbon Fiber Kompozit Malzeme Bağlantılarının Sayısal Çalışma Sonuçları

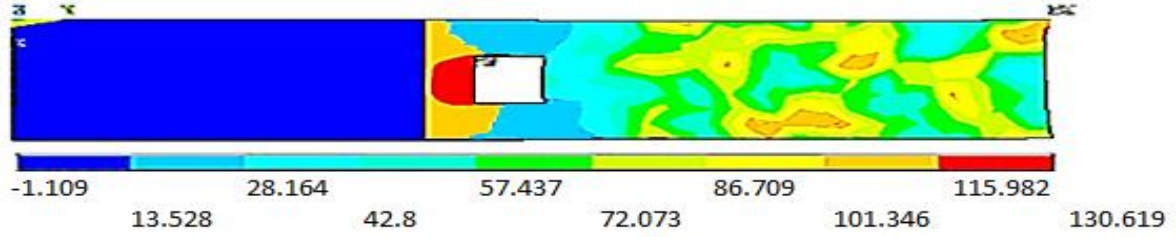
Bu başlık altında, karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarının tabi tutulduğu deneysel çalışmalardan elde edilen kopma kuvvetlerini kullanarak yapılan gerilme analizlerinin sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelenerek, bağlantılarda meydana gelecek olası hasarın hangi bölgelerde meydana geleceği araştırılmıştır. Bağlantılardaki maksimum ve minimum gerilme değerleri, kuvvet-uzama grafikleri verilmiştir.

5.3.1. M8 Cıvata Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

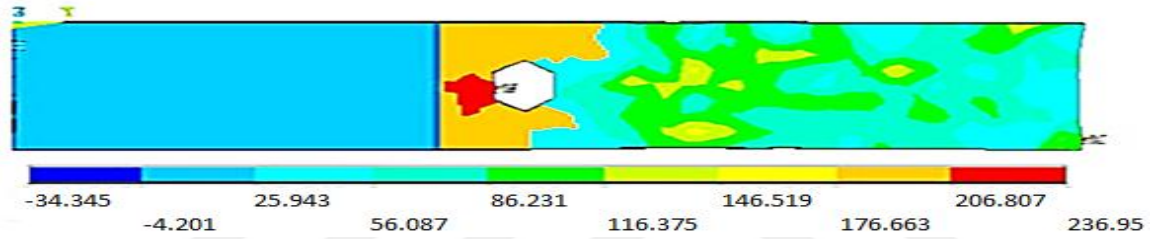
Şekil 5.10 'da M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



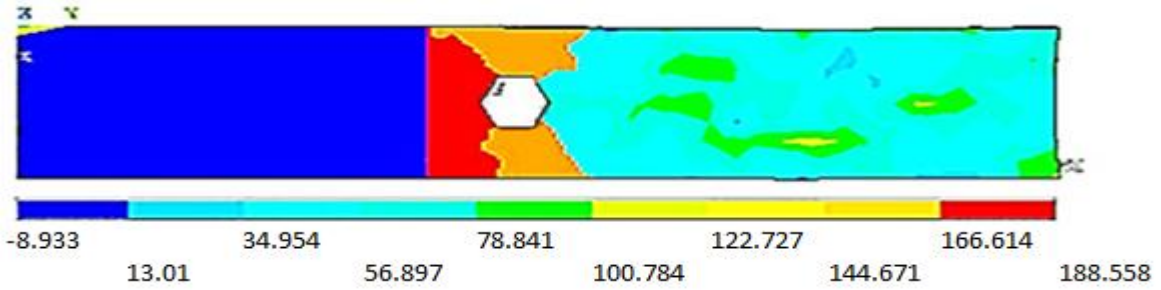
a)



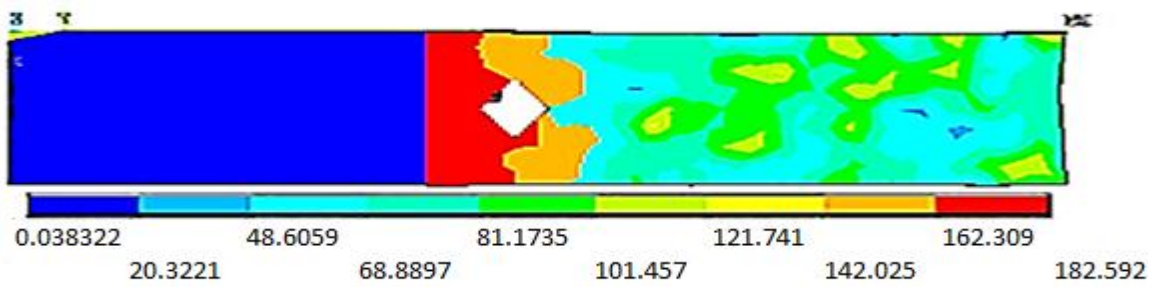
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.10 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.10’da görülen gerilme analizi sonuçlarında, çekme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde maksimum gerilmelerin görülürken, yer değiştirme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde ise minimum gerilmeler görüldü.

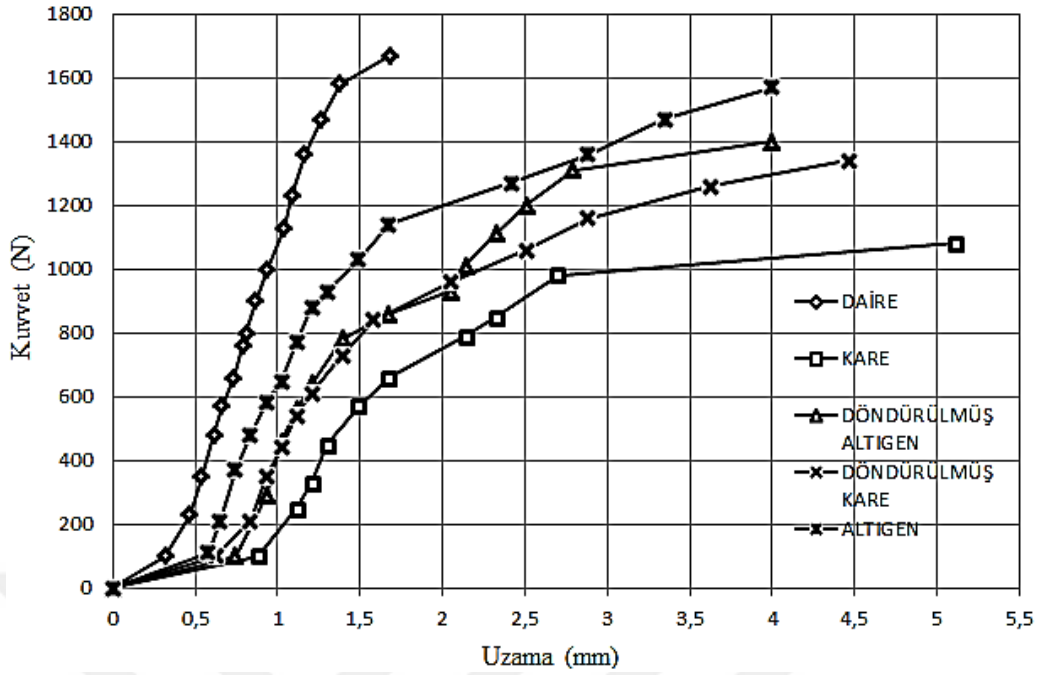
Tablo 5.4’de M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.4 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	298.708	8.675
Kare	130.619	1.109
Altıgen	236.95	34.345
Döndürülmüş Altıgen	188.558	8.933
Döndürülmüş Kare	182.592	0.038322

Tablo 5.4’ e göre, en büyük maksimum gerilme 298.708 MPa olarak daireysel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 130.619 MPa olarak kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.11’de, M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

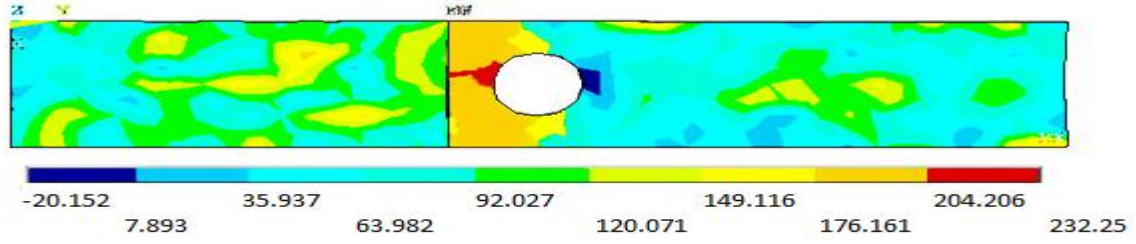


Şekil 5.11 M8 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

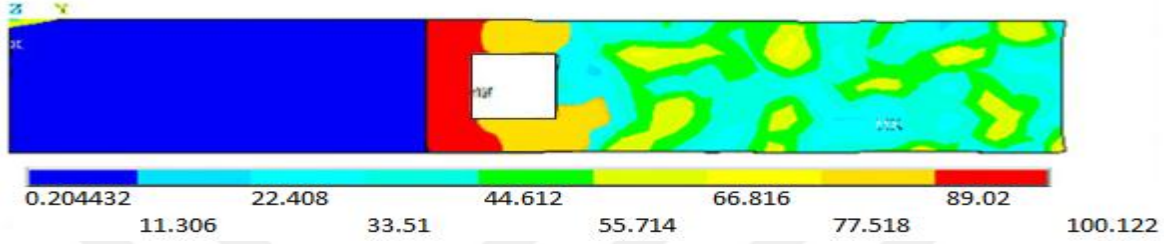
Şekil 5.11’de görüldüğü gibi mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 1670 N’da 1.6833 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan kare profilde ise 1080 N’da 5.115 mm uzama tespit edilmiştir.

5.3.2. M10 Cıvata Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

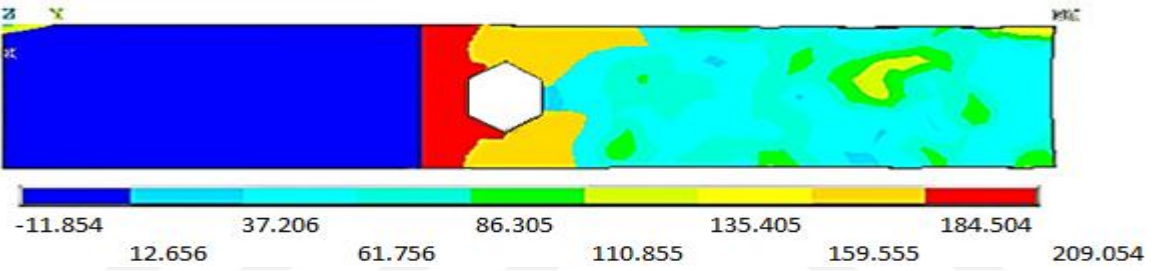
Şekil 5.12 ’de M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



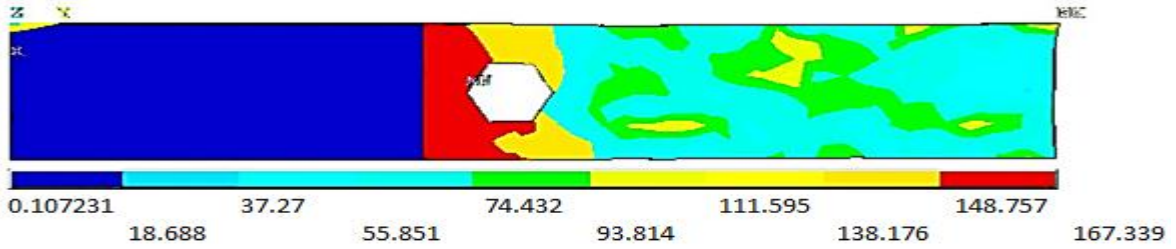
a)



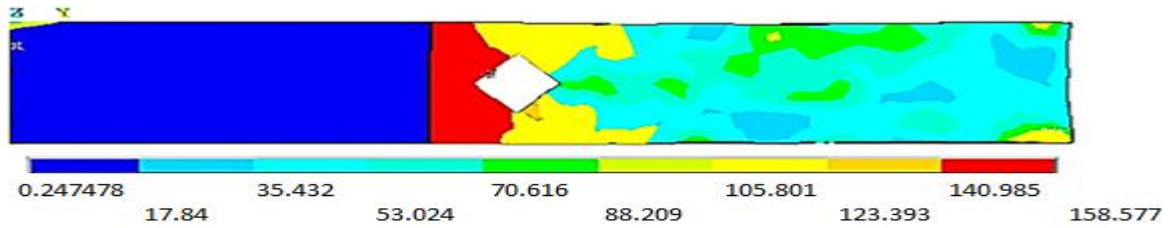
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.12 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.12’de görülen gerilme analizi sonuçlarında, çekme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde maksimum gerilmelerin görülürken, yer değiştirme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde ise minimum gerilmeler görüldü.

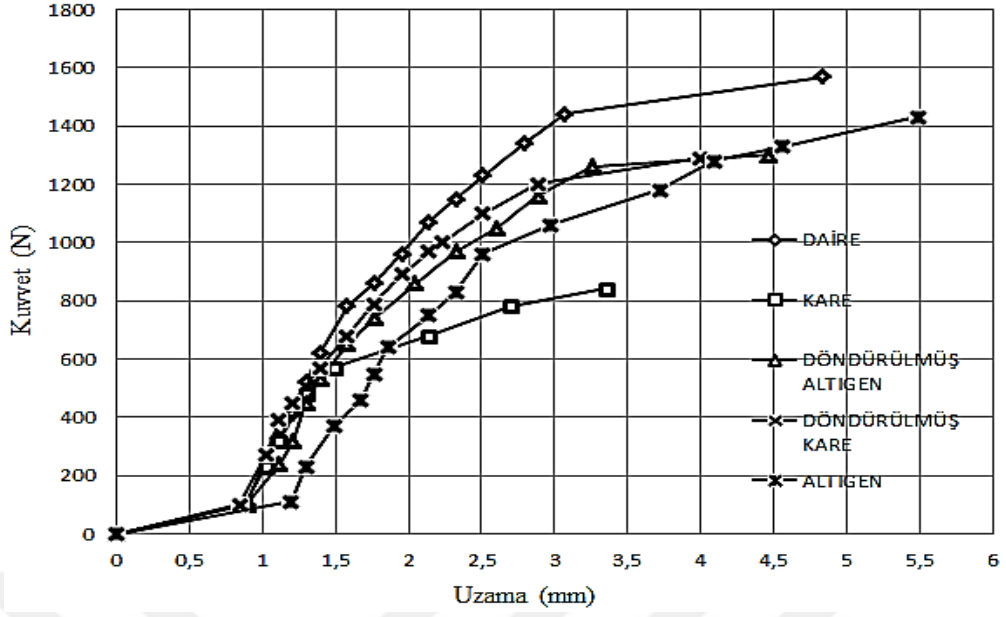
Tablo 5.5’de M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.5 M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	232.25	20.152
Kare	100.122	0.204432
Altıgen	209.054	11.854
Döndürülmüş Altıgen	167.339	0.107231
Döndürülmüş Kare	158.577	0.247478

Tablo 5.5’ e göre, en büyük maksimum gerilme 232.25 MPa olarak daireysel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 100.122 MPa olarak kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.13’de, M10 cıvata bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

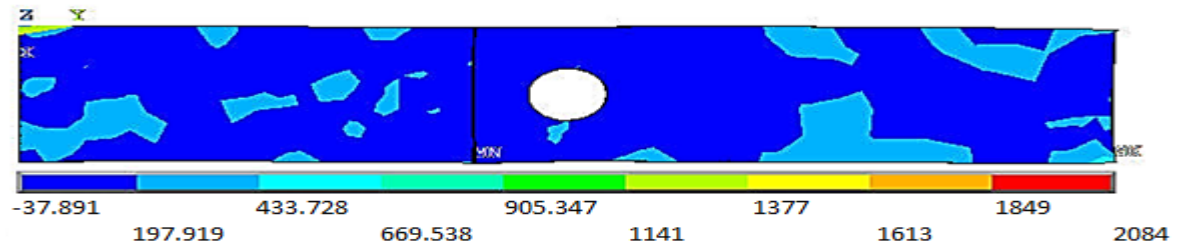


Şekil 5.13 M10 civata bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet-uzama grafiği

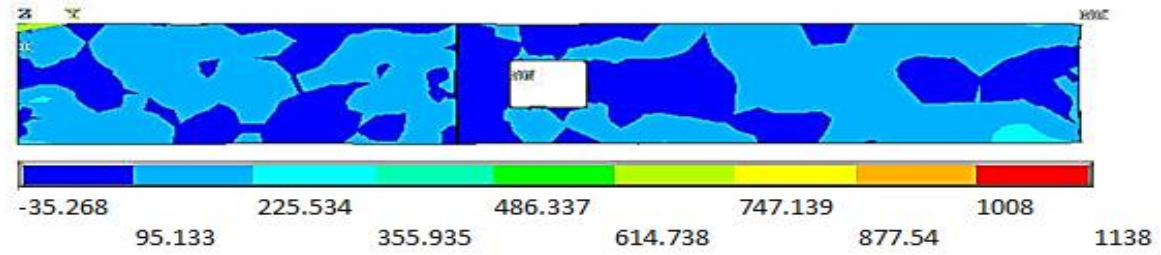
Şekil 5.13’de görüldüğü gibi, mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 1570 N’da 4.836 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan kare profilde ise 840 N’da 3.348 mm uzama tespit edilmiştir.

5.3.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

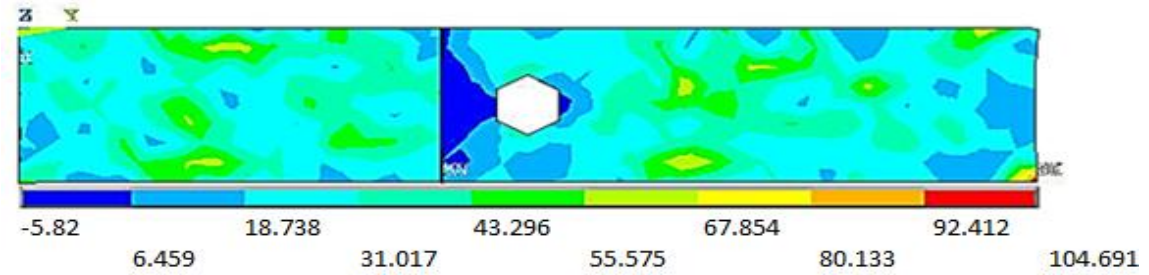
Şekil 5.14 ’de 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



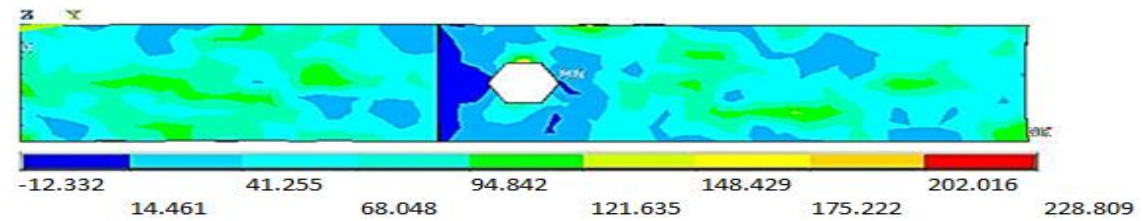
a)



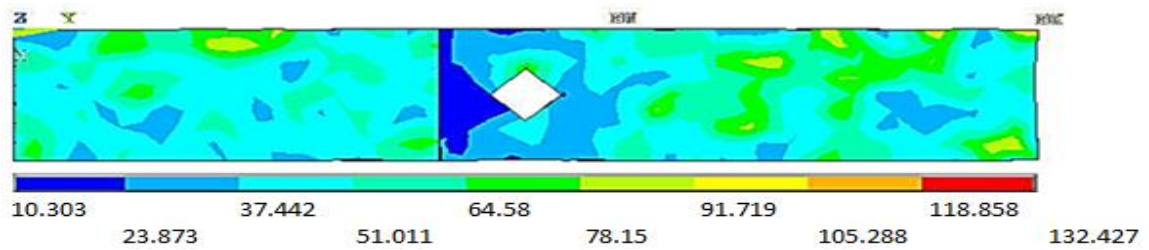
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.14 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.14’de görülen gerilme analizi sonuçlarında, gerilmelerin uniform bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Maksimum gerilmeler ise yapıştırıcı üzerinde tespit edilmiştir.

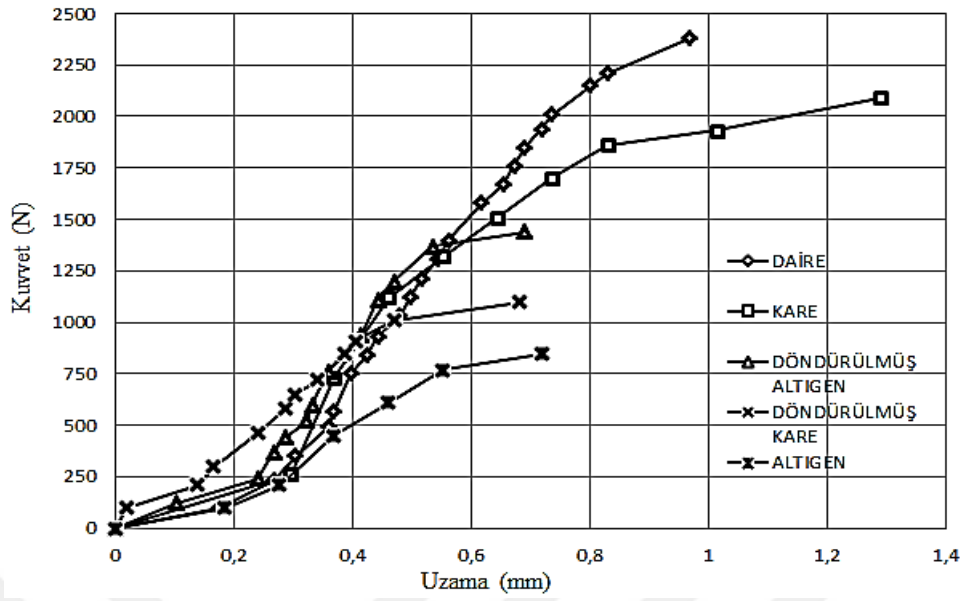
Tablo 5.6’da 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.6 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	2084	37.891
Kare	1138	35.268
Altıgen	104.691	5.82
Döndürülmüş Altıgen	228.809	12.332
Döndürülmüş Kare	132.427	10.303

Tablo 5.6’ ya göre, en büyük maksimum gerilme 2084 MPa olarak dairesel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 104.691 MPa olarak altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.15’de, 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

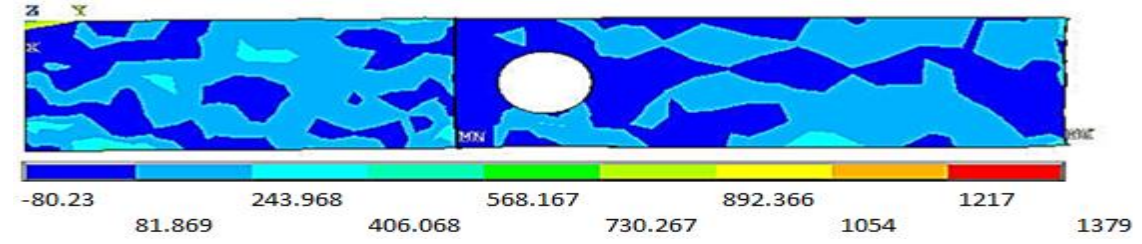


Şekil 5.15 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

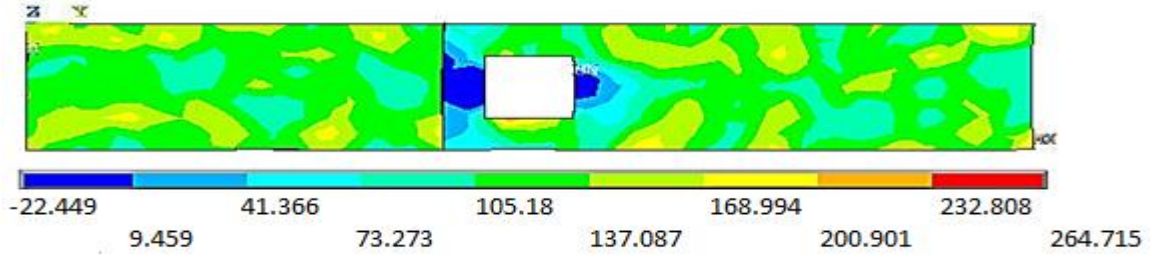
Şekil 5.15’de görüldüğü gibi mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 2380 N’da 0.966 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan altıgen profilde ise 845 N’da 0.7176 mm uzama tespit edilmiştir.

5.3.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Karbon Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

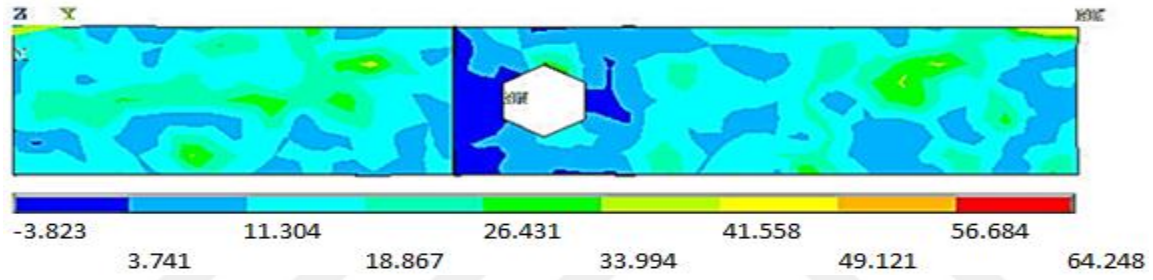
Şekil 5.16 ’da 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



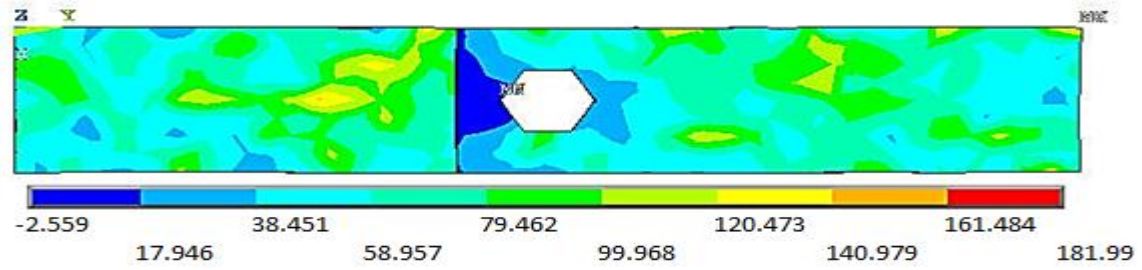
a)



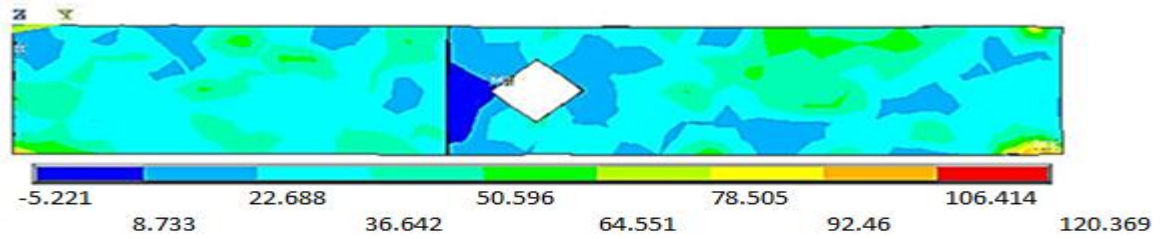
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.16 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.16’da görülen gerilme analizi sonuçlarında, gerilmelerin uniform bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Maksimum gerilmeler ise yapıştırıcı üzerinde tespit edilmiştir.

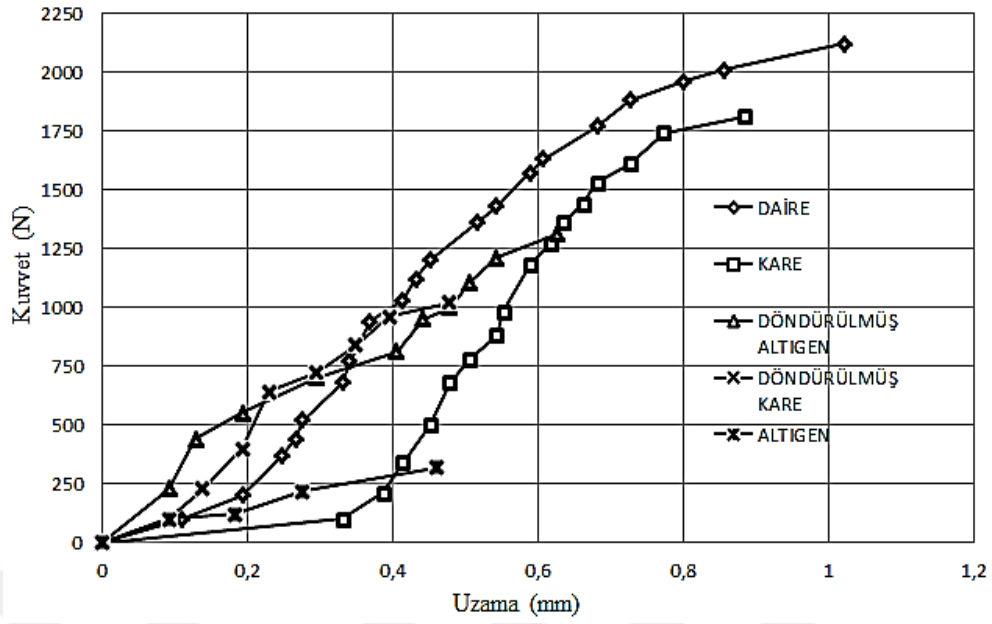
Tablo 5.7’de 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.7 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	1379	80.23
Kare	264.715	22.449
Altıgen	64.248	3.823
Döndürülmüş Altıgen	181.99	2.559
Döndürülmüş Kare	120.369	5.221

Tablo 5.7’ ye göre, en büyük maksimum gerilme 1379 MPa olarak daireysel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 64.248 MPa olarak altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.17’de, 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 5.17 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı karbon fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 2120 N’da 1.0212 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan altıgen profilde ise 320 N’da 0.46 mm uzama tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen kopma kuvvetleri kullanılarak oluşturulan karbon fiber kompozit malzemelerin gerilme analizi sonuçlarına göre, cıvatalı bağlantılarda maksimum gerilmelerin delik çevresinde gerçekleştiği belirlenirken, yapıştırmalı bağlantılarda ise, karbon fiber kompozit malzemeler üzerinde hasara neden olacak maksimum gerilmeler tespit edilmemiştir.

Tablo 5.8’ de, Karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.8 Karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Bağlantı Şekillerinde Meydana Gelen Maksimum Gerilmeler (MPa)			
	Yapıştırılmalı Bağlantılar		Civatalı Bağlantılar	
	8 mm	10 mm	M8	M10
Kare Profil	1138	655.541	130.619	100.122
Dairesel Profil	2084	1379	298.708	232.25
Altıgen Profil	104.691	64.248	236.95	209.054
45° Döndürülmüş Kare Profil	132.427	120.369	182.592	158.577
90° Döndürülmüş Altıgen Profil	228.809	181.99	188.558	167.339

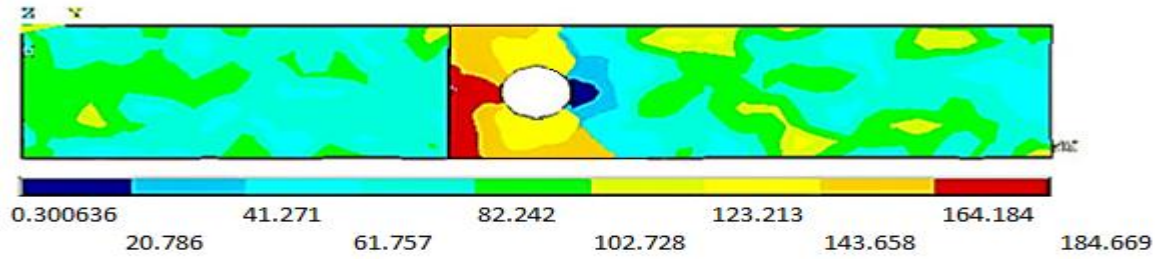
Tablo 5.8 de görüldüğü gibi, 8 mm ve 10 mm delik çaplarına sahip yapıştırma bağlantıları kıyaslandığında maksimum gerilmenin en büyük olduğu profilin daireseel profil olduğu, maksimum gerilmenin en küçük olduğu profilin ise altıgen profil olduğu tespit edilmiştir. 8 mm ve 10 mm delik çaplarına sahip civatalı bağlantılar kıyaslandığında ise maksimum gerilmenin en büyük olduğu profilin daireseel profil olduğu, maksimum gerilmenin en küçük olduğu profilin ise kare profil olduğu tespit edilmiştir.

5.4. Cam Fiber Kompozit Malzeme Bağlantılarının Sayısal Çalışma Sonuçları

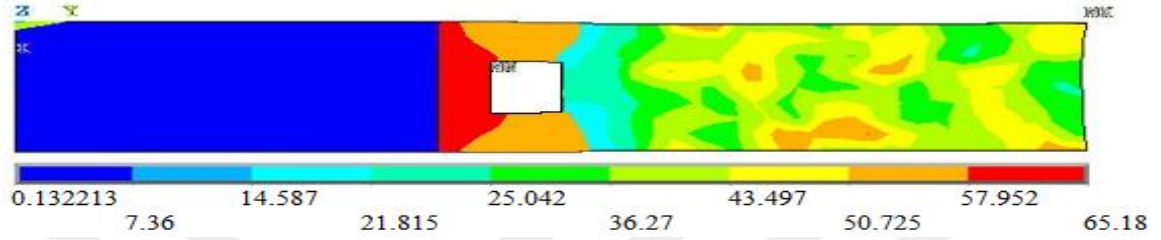
Bu başlık altında, cam fiber kompozit malzeme bağlantılarının tabi tutulduğu deneysel çalışmalardan elde edilen kopma kuvvetlerini kullanarak yapılan gerilme analizlerinin sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelenerek, bağlantılarda meydana gelecek olası hasarın hangi bölgelerde meydana geleceği araştırılmıştır. Bağlantılardaki maksimum ve minimum gerilme değerleri, kuvvet-uzama grafikleri verilmiştir.

5.4.1. M8 Civata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

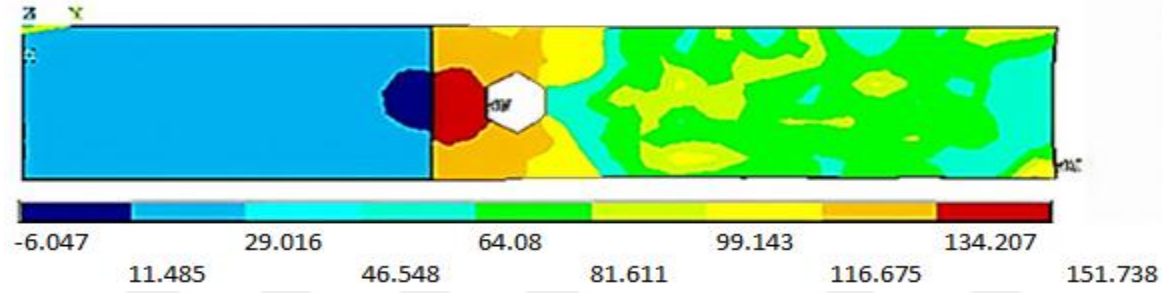
Şekil 5.18 'de M8 civata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



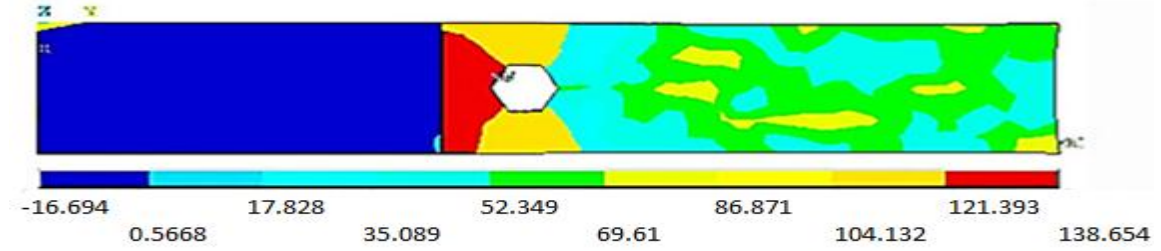
a)



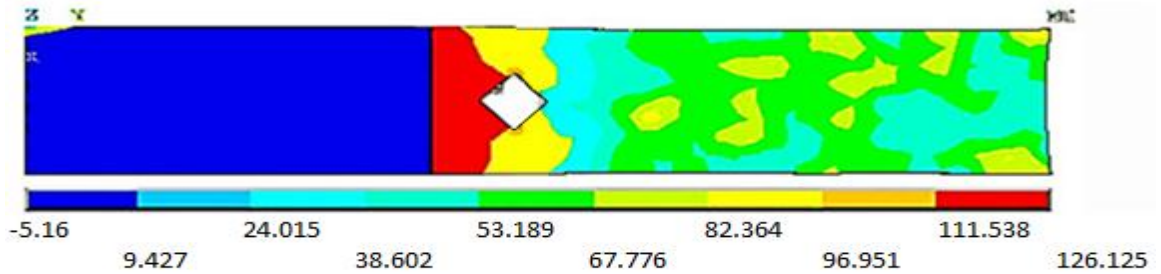
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.18 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları;

a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.18’da görülen gerilme analizi sonuçlarında, çekme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde maksimum gerilmelerin görülürken, yer değiştirme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde ise minimum gerilmeler görüldü.

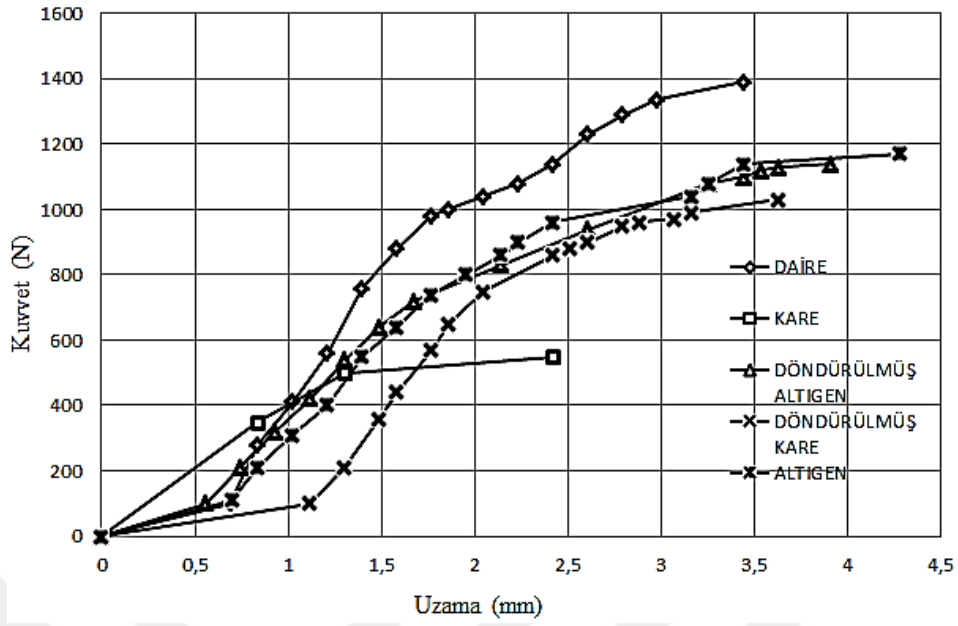
Tablo 5.9’da M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.9 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	184.669	0.300636
Kare	65.18	0.132213
Altıgen	151.738	6.047
Döndürülmüş Altıgen	138.654	16.694
Döndürülmüş Kare	126.125	5.16

Tablo 5.9’ a göre, en büyük maksimum gerilme 184.669 MPa olarak dairesel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 65.18 MPa olarak kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.19’da, M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

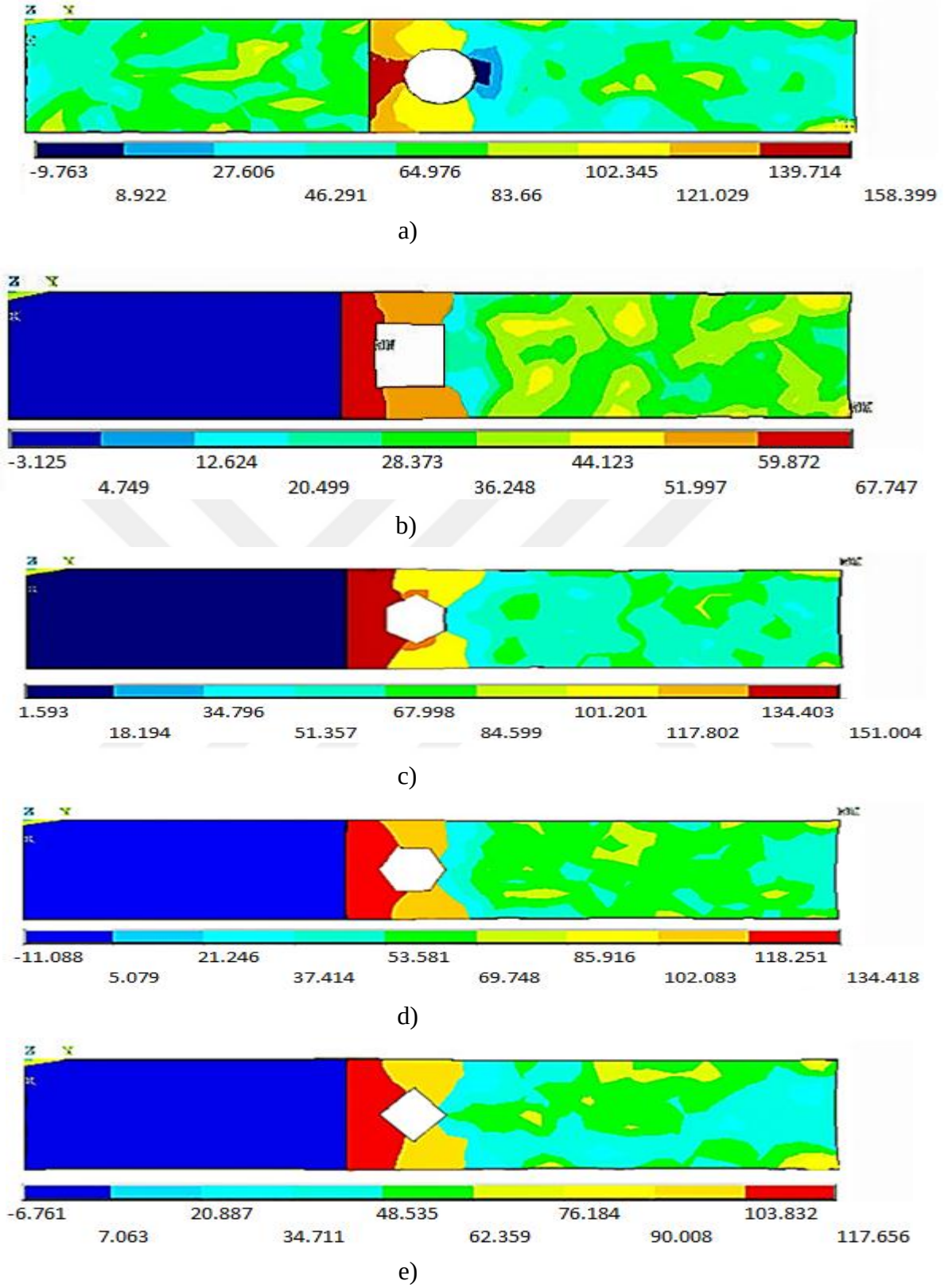


Şekil 5.19 M8 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 5.19’da görüldüğü gibi mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 1390 N’da 3.441 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan kare profilde ise 550 N’da 2.418 mm uzama tespit edilmiştir.

5.4.2. M10 Cıvata Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

Şekil 5.20 ’de M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.20 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları;

a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.20’de görülen gerilme analizi sonuçlarında, çekme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde maksimum gerilmelerin görülürken, yer değiştirme sınır şartının uygulandığı bağlantı bölümünde ise minimum gerilmeler görüldü.

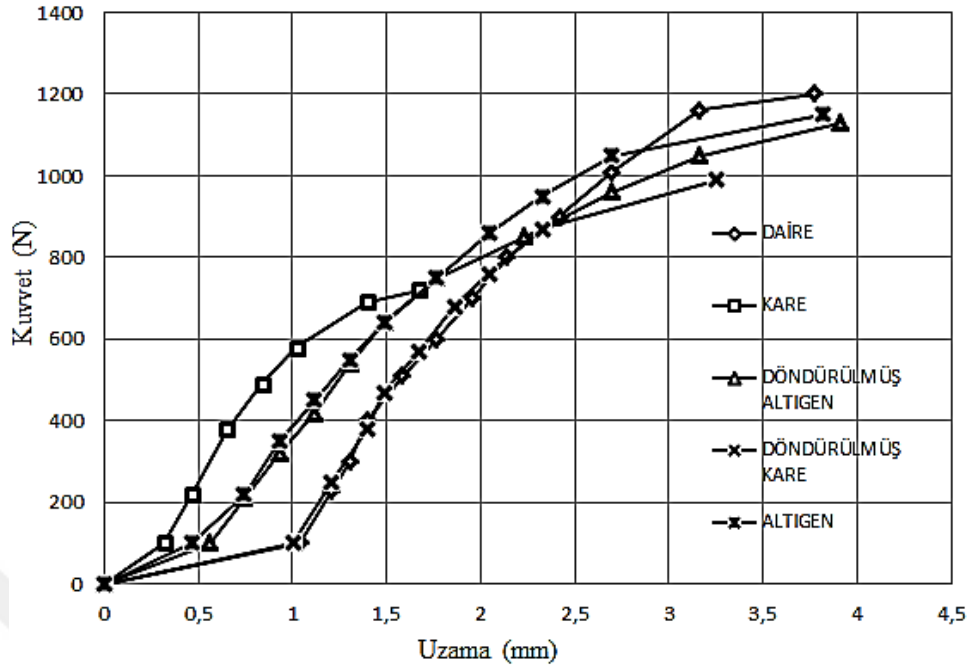
Tablo 5.10’da M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.10 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	158.399	9.763
Kare	67.747	3.125
Altıgen	151.004	1.593
Döndürülmüş Altıgen	134.418	11.088
Döndürülmüş Kare	117.656	6.761

Tablo 5.10’ a göre, en büyük maksimum gerilme 158.399 MPa olarak daireysel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 67.747 MPa olarak kare profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.21’de, M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

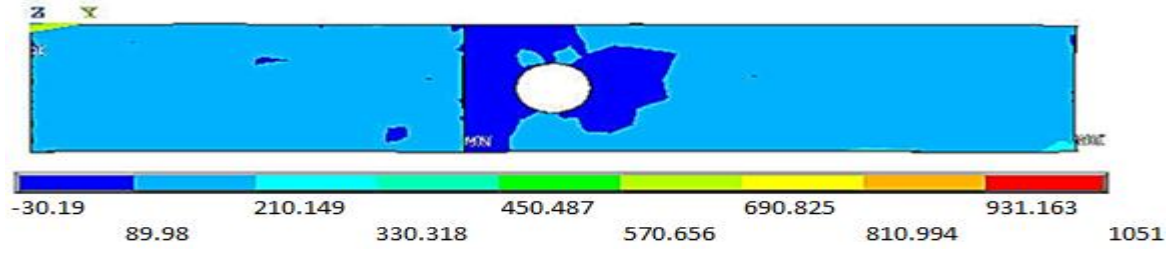


Şekil 5.21 M10 cıvata bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

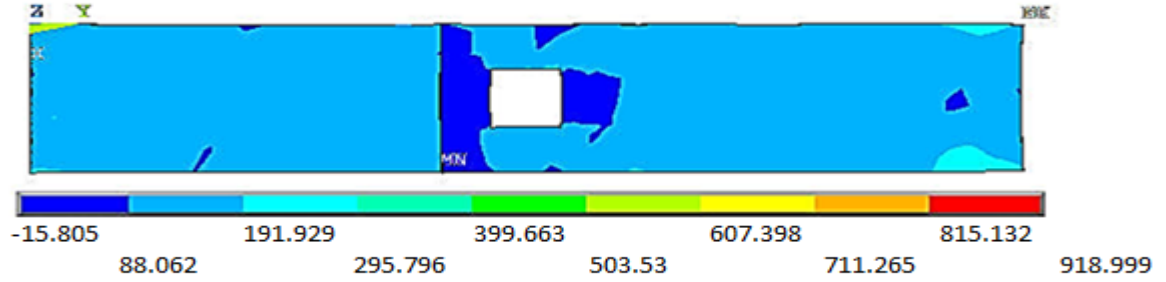
Şekil 5.21’de görüldüğü gibi, mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 1200 N’da 3.7758 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan kare profilde ise 720 N’da 1.674 mm uzama tespit edilmiştir.

5.4.3. 8 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

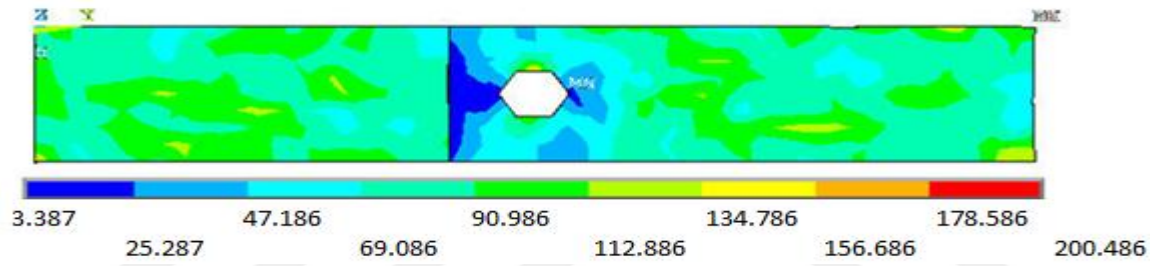
Şekil 5.22 ’de 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



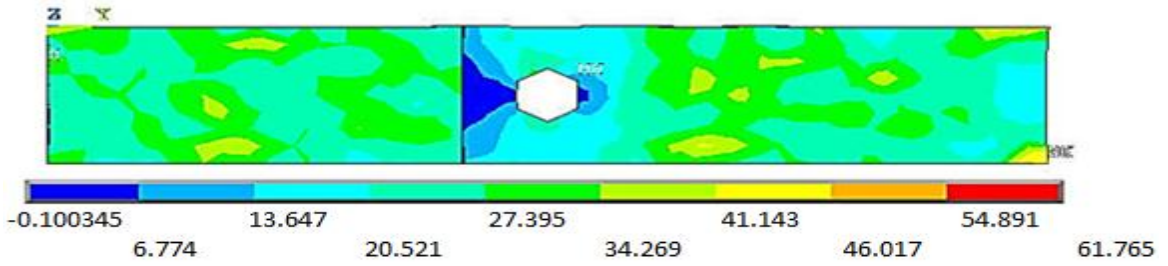
a)



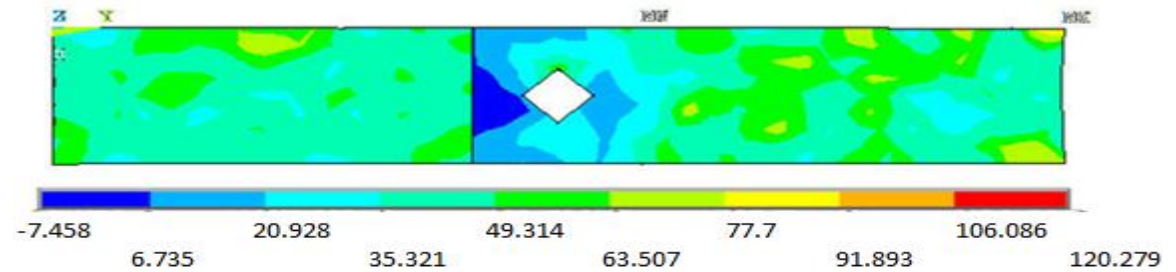
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.22 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.22’de görülen gerilme analizi sonuçlarında, gerilmelerin uniform bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Maksimum gerilmeler ise yapıştırıcı üzerinde tespit edilmiştir..

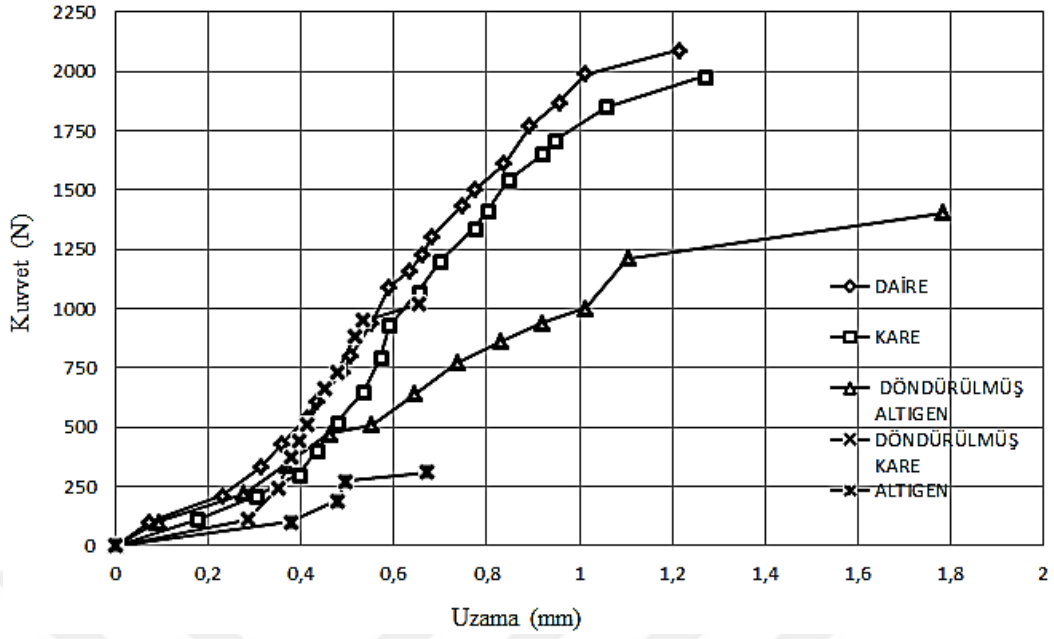
Tablo 5.11’de 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.11 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	1051	30.19
Kare	918.999	15.805
Altıgen	61.765	0.100345
Döndürülmüş Altıgen	200.486	3.387
Döndürülmüş Kare	120.279	7.458

Tablo 5.11’e göre, en büyük maksimum gerilme 1051 MPa olarak daireysel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 61.765 MPa olarak altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.23’de, 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.

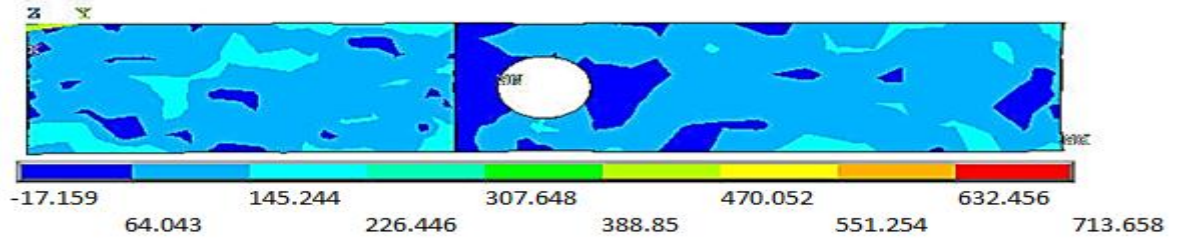


Şekil 5.23 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

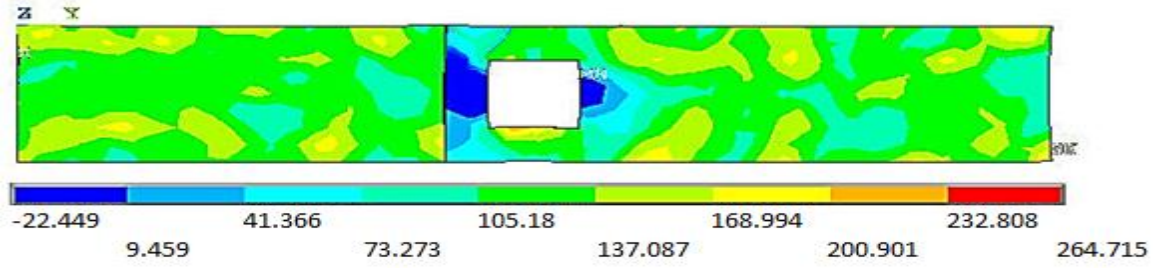
Şekil 5.23’de görüldüğü gibi mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 2090 N’da 1.2144 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan altıgen profilde ise 310 N’da 0.6716 mm uzama tespit edilmiştir.

5.4.4. 10 mm Çapında Yapıştırma Bağlantılı Cam Fiber Kompozit Malzeme Numunelerinin Gerilme Analizleri

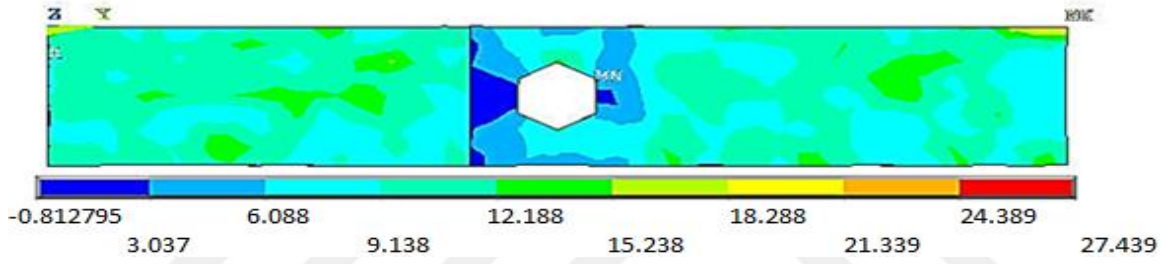
Şekil 5.24 ’de 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları verilmiştir.



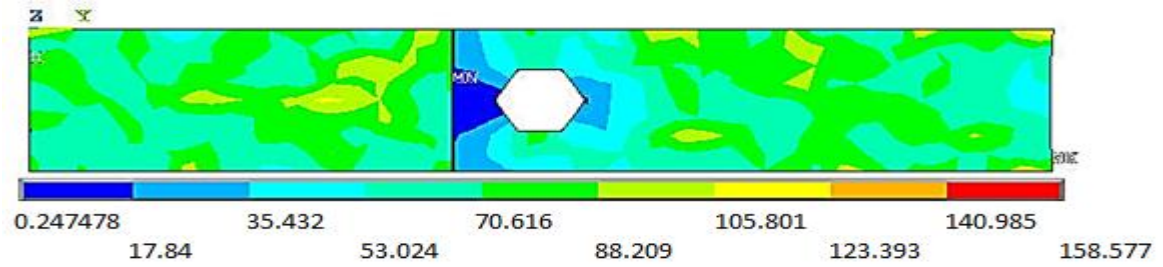
a)



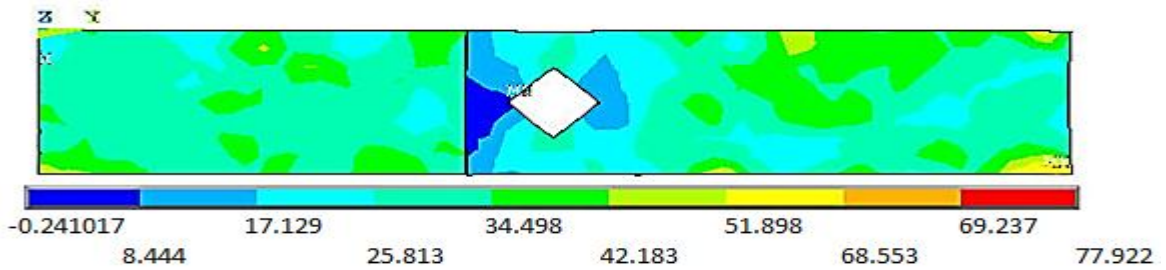
b)



c)



d)



e)

Şekil 5.24 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçları; a) Dairesel profil, b) Kare profil, c) Altıgen profil, d) 90° döndürülmüş altıgen profil, e) 45° döndürülmüş kare profil

Şekil 5.24’de görülen gerilme analizi sonuçlarında, gerilmelerin uniform bir şekilde dağıldığı görülmüştür. Maksimum gerilmeler ise yapıştırıcı üzerinde tespit edilmiştir.

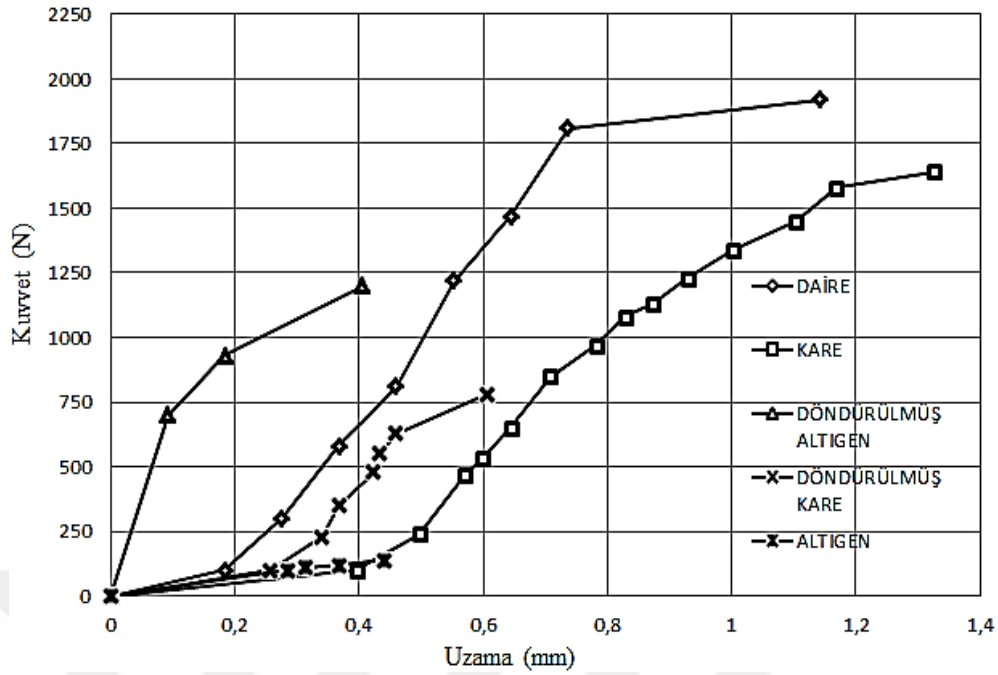
Tablo 5.12’de 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.12 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizlerinde tespit edilen maksimum ve minimum gerilmeler

Delik Şekilleri	Maksimum Gerilmeler (MPa)	Minimum Gerilmeler (MPa)
Dairesel	713.658	17.159
Kare	264.715	22.449
Altıgen	27.439	0.812795
Döndürülmüş Altıgen	158.577	0.247478
Döndürülmüş Kare	77.922	0.241017

Tablo 5.12’ ye göre, en büyük maksimum gerilme 713.658 MPa olarak daireysel profil bağlantısında görülürken, en küçük maksimum gerilme ise 27.439 MPa olarak altıgen profil bağlantısında görülmüştür.

Şekil 5.25’de, 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit malzeme numunelerinin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 5.25 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı cam fiber kompozit numunelerin gerilme analizi sonuçlarına göre oluşturulmuş kuvvet- uzama grafiği

Şekil 5.25’de görüldüğü gibi mukavemeti en yüksek olan dairesel profilde 1920 N’da 1.1408 mm uzama belirlenirken, mukavemeti en düşük olan altıgen profilde ise 140 N’da 0.4416 mm uzama tespit edilmiştir.

Deneysel çalışmalardan elde edilen kopma kuvvetleri kullanılarak oluşturulan cam fiber kompozit malzemelerin gerilme analizi sonuçlarına göre, cıvatalı bağlantılarda maksimum gerilmelerin delik çevresinde gerçekleştiği belirlenirken, yapıştırırmalı bağlantılarda ise, cam fiber kompozit malzemeler üzerinde hasara neden olacak maksimum gerilmeler tespit edilmemiştir.

Tablo 5.13’ de cam fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler verilmiştir.

Tablo 5.13 Cam fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilmeler

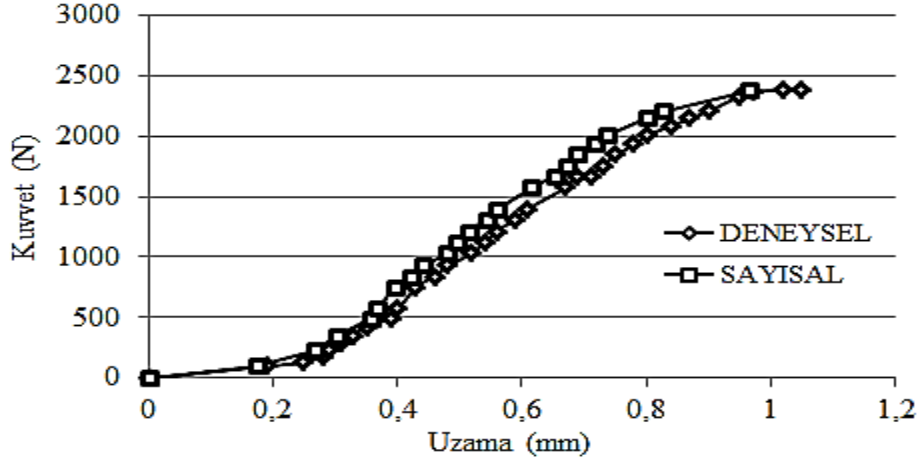
Delik Şekilleri	Bağlantı Şekillerinde Meydana Gelen Maksimum Gerilmeler (MPa)			
	Yapıştırırmalı Bağlantılar		Civatalı Bağlantılar	
	8 mm	10 mm	M8	M10
Kare Profil	918.919	264.715	65.18	67.747
Dairesel Profil	1051	713.658	184.669	158.399
Altıgen Profil	61.765	27.439	151.738	151.004
45° Döndürülmüş Kare Profil	120.279	77.922	126.125	117.656
90° Döndürülmüş Altıgen Profil	200.486	152.065	138.654	134.418

Tablo 5.13’ de görüldüğü gibi, 8 mm ve 10 mm delik çaplarına sahip yapıştırma bağlantıları kıyaslandığında maksimum gerilmenin en büyük olduğu profilin daireseel profil olduğu, maksimum gerilmenin en küçük olduğu profilin ise altıgen profil olduğu tespit edilmiştir. 8 mm ve 10 mm delik çaplarına sahip civatalı bağlantılar kıyaslandığında ise maksimum gerilmenin en büyük olduğu profilin daireseel profil olduğu, maksimum gerilmenin en küçük olduğu profilin ise kare profil olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 5.8 ve tablo 5.13’teki veriler incelendiğinde karbon fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilme değerlerinin, cam fiber kompozit malzeme bağlantılarında meydana gelen maksimum gerilme değerlerinden fazla olduğu tespit edilmiştir.

6. DENEYSEL VE SAYISAL ÇALIŞMA SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

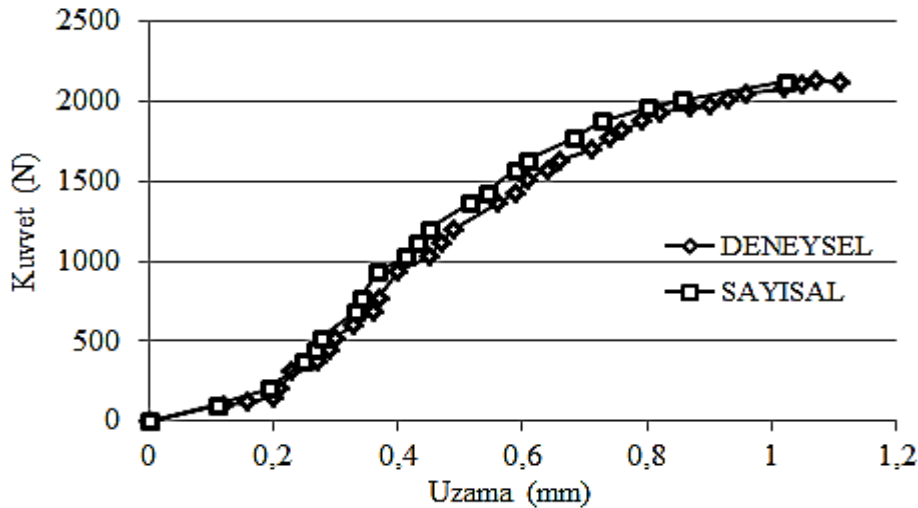
Şekil 6.1’de 8 mm çaplı dairesel profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.1 8 mm çaplı dairesel profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.1’deki grafiğe göre, uygulanan 2380 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.05 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.966 mm olarak tespit edilmiştir.

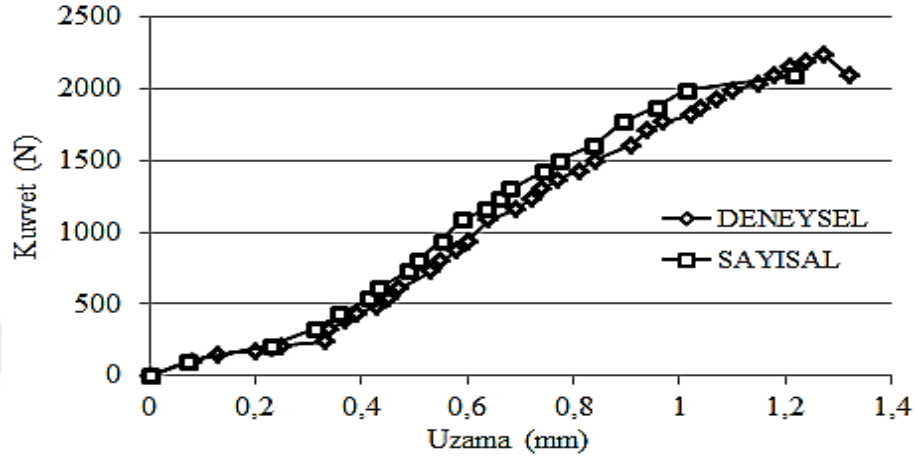
Şekil 6.2’de 10 mm çaplı dairesel profil karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.2 10 mm çaplı dairesel profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.2'deki grafiğe göre, uygulanan 2120 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.11 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.0212 mm olarak tespit edilmiştir.

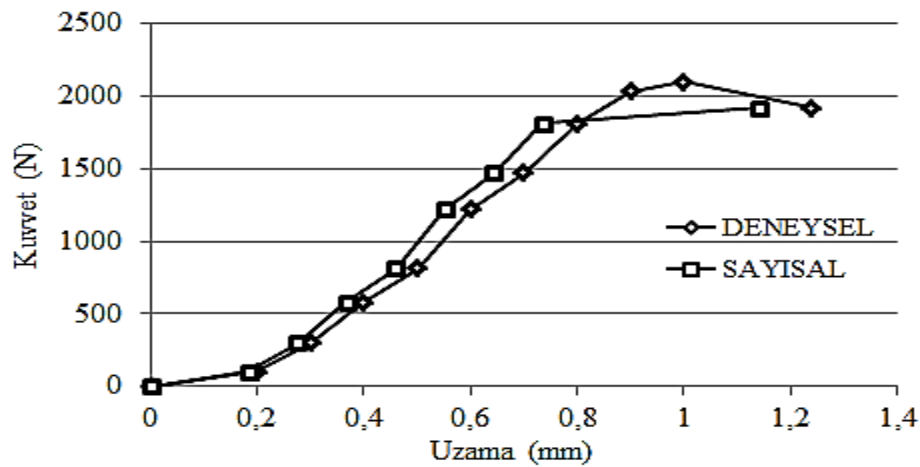
Şekil 6.3'de 8 mm çaplı dairesel profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.3 8 mm çaplı dairesel profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.3'deki grafiğe göre, uygulanan 2090 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.32 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.2144 mm olarak tespit edilmiştir.

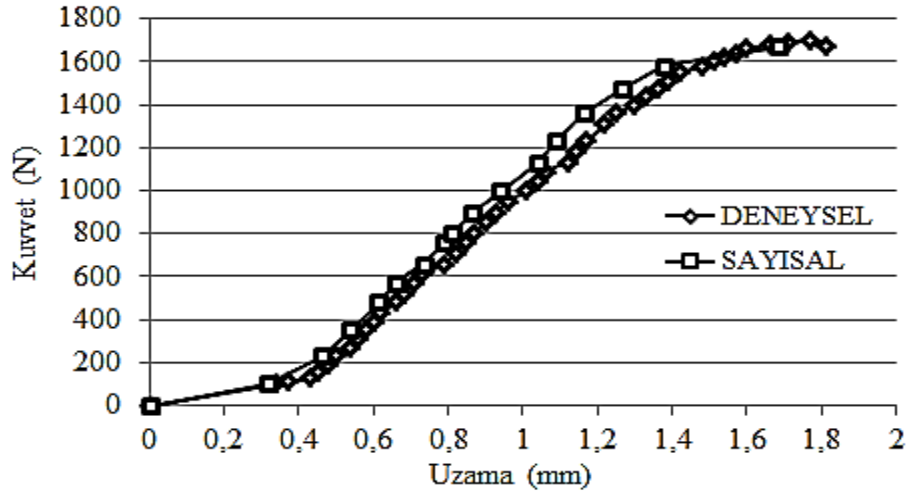
Şekil 6.4'de 10 mm çaplı dairesel profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.4 10 mm çaplı dairesel profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.4'deki grafiğe göre, uygulanan 1920 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.24 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.1408 mm olarak tespit edilmiştir.

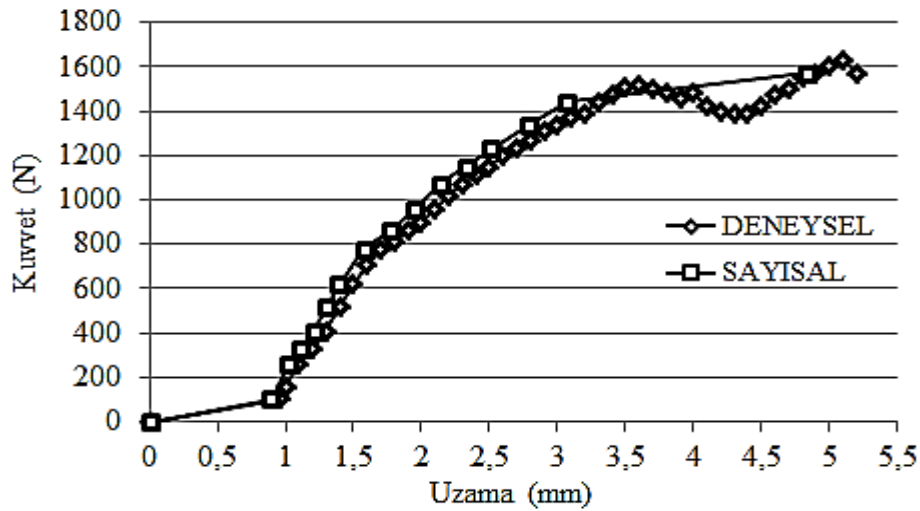
Şekil 6.5'de M8 dairesel profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.5 M8 dairesel profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.5'deki grafiğe göre, uygulanan 1670 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.81 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.6833 mm olarak tespit edilmiştir.

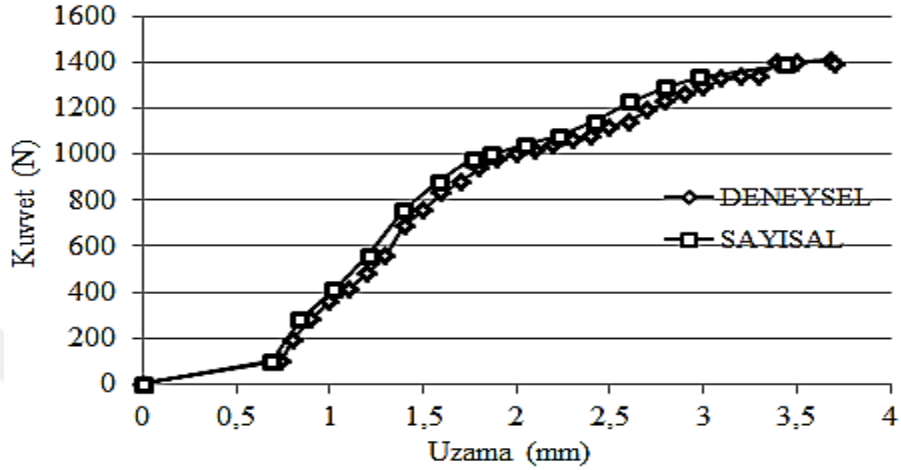
Şekil 6.6'da M10 dairesel profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.6 M10 dairesel profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.6'daki grafiğe göre, uygulanan 1570 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 5.2 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 4.836 mm olarak tespit edilmiştir.

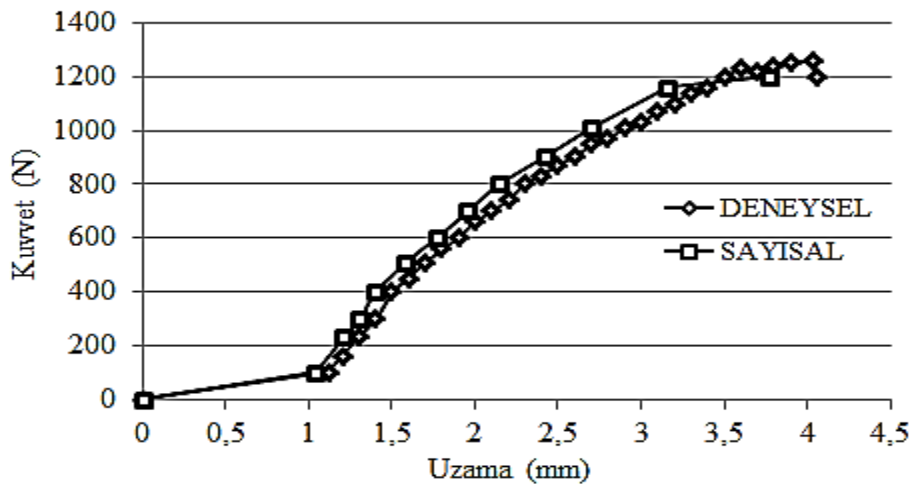
Şekil 6.7'de M8 dairesel profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.7 M8 dairesel profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.7'deki grafiğe göre, uygulanan 1390 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 3.70 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.441 mm olarak tespit edilmiştir.

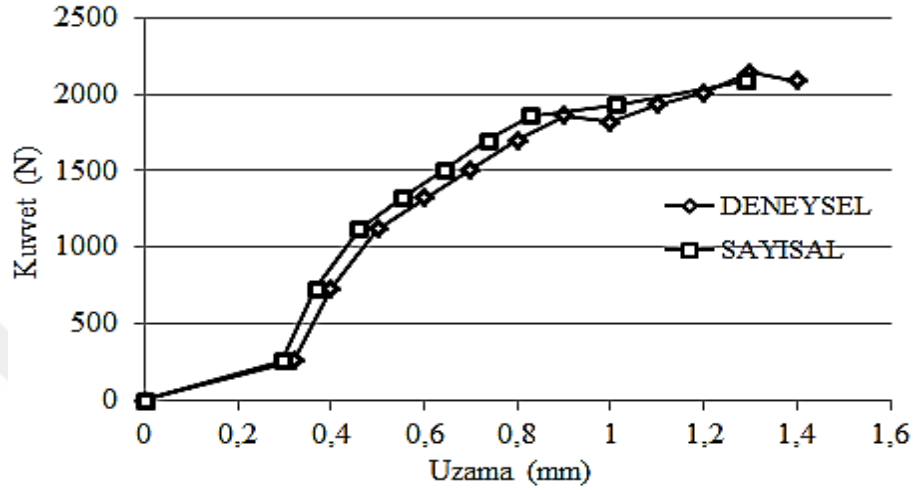
Şekil 6.8'de 10 mm çaplı dairesel profil yapılı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.8 10 mm çaplı dairesel profil yapılı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.8'deki grafiğe göre, uygulanan 1200 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.06 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.7758 mm olarak tespit edilmiştir.

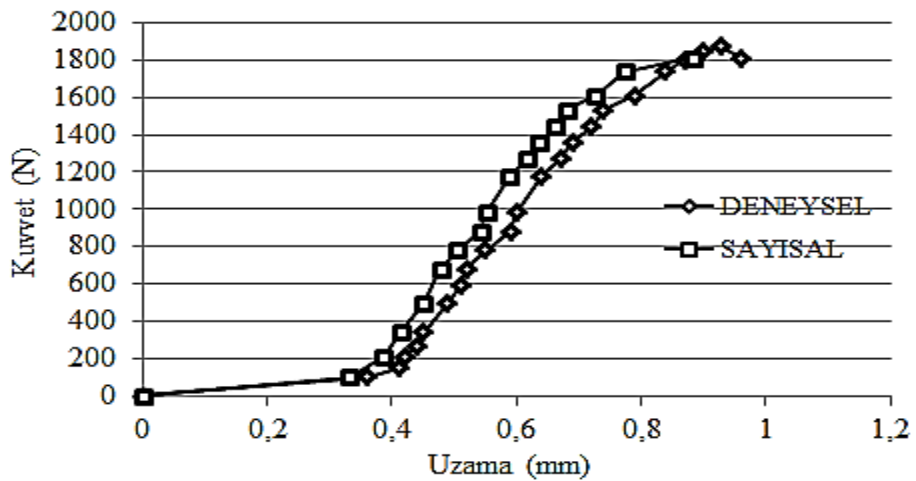
Şekil 6.9'da 8 mm çaplı kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.9 8 mm çaplı kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.9'daki grafiğe göre, uygulanan 2090 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.40 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.288 mm olarak tespit edilmiştir.

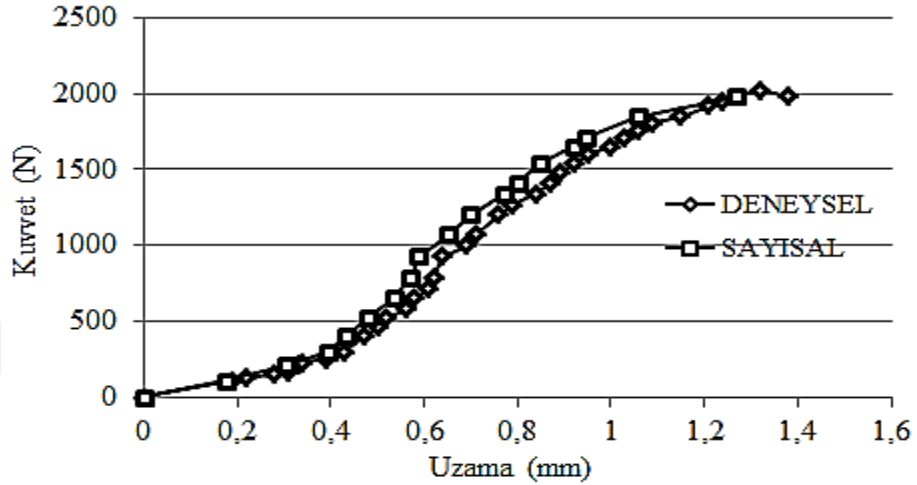
Şekil 6.10'da 10 mm çaplı kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.10 10 mm çaplı kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.10'daki grafiğe göre, uygulanan 1810 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.96 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.8832 mm olarak tespit edilmiştir.

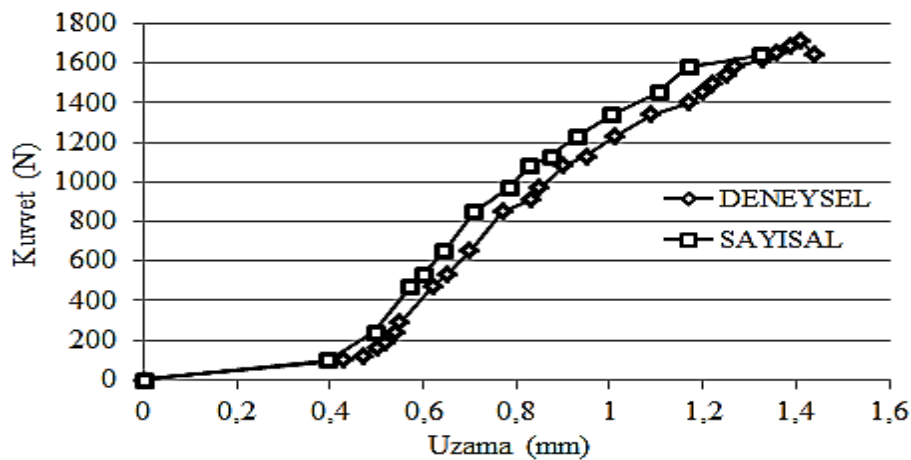
Şekil 6.11'de 8 mm çaplı kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.11 8 mm çaplı kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.11'deki grafiğe göre, uygulanan 1980 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.38 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.2696 mm olarak tespit edilmiştir.

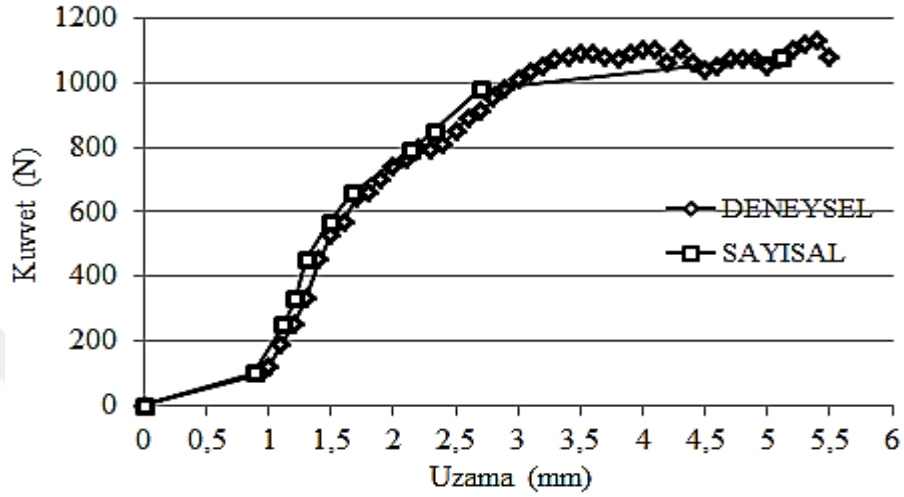
Şekil 6.12'de 10 mm çaplı kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.12 10 mm çaplı kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.12'deki grafiğe göre, uygulanan 1640 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.44 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.3248 mm olarak tespit edilmiştir.

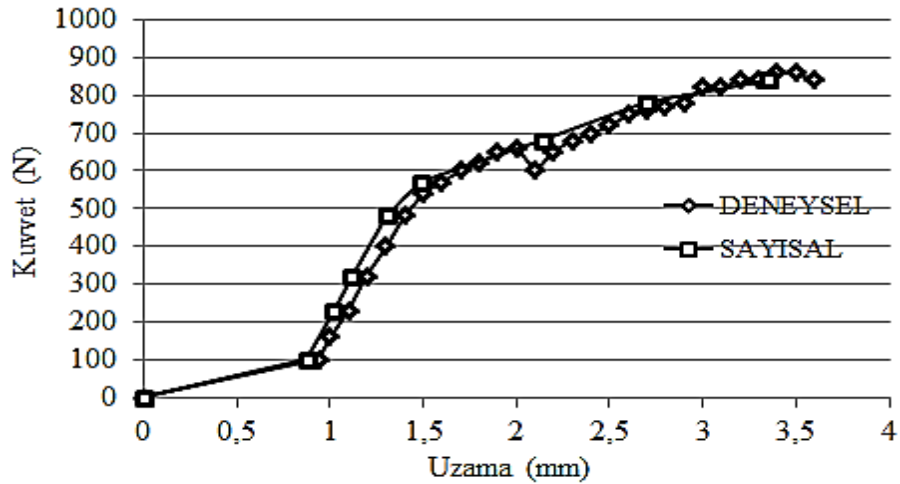
Şekil 6.13'de M8 kare profil yapıli karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.13 M8 kare profil yapıli karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.13'deki grafiğe göre, uygulanan 1080 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 5.50 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 5.115 mm olarak tespit edilmiştir.

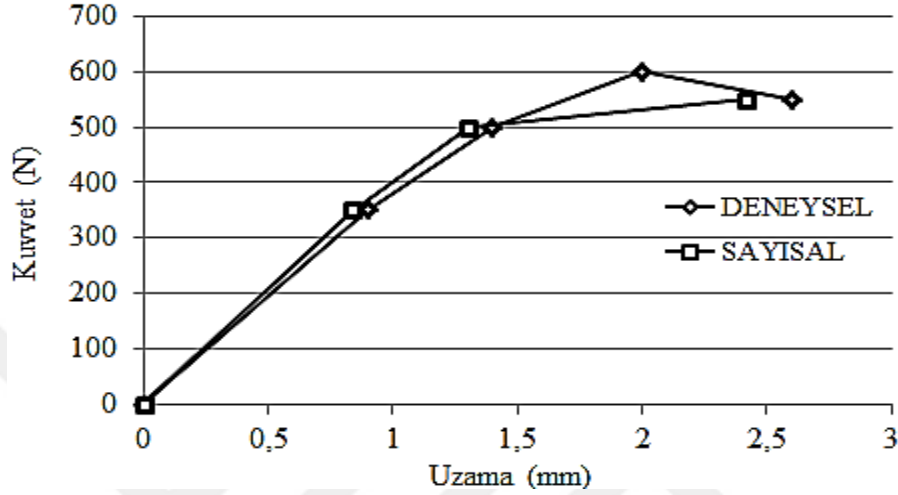
Şekil 6.14'de M10 kare profil yapıli karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.14 M10 kare profil yapıli karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.14'deki grafiğe göre, uygulanan 840 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 3.60 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.348 mm olarak tespit edilmiştir.

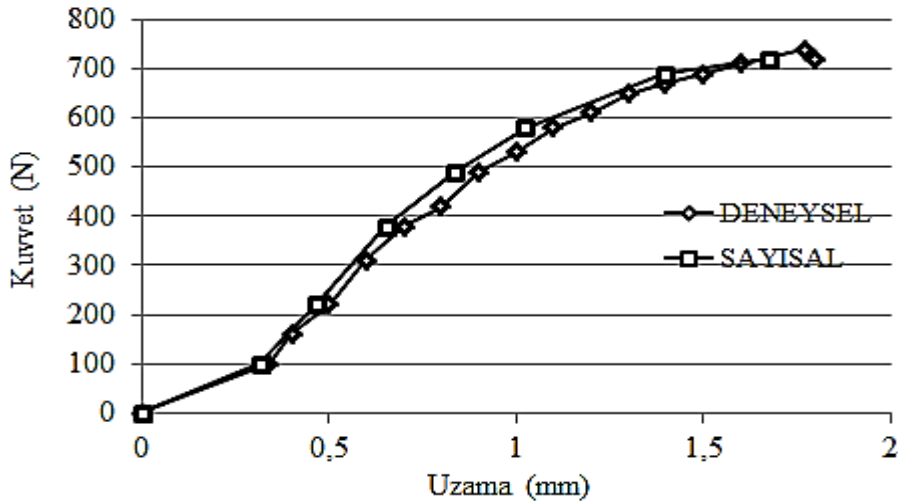
Şekil 6.15'de M8 kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.15 M8 kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.15'deki grafiğe göre, uygulanan 550 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 2.60 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 2.418 mm olarak tespit edilmiştir.

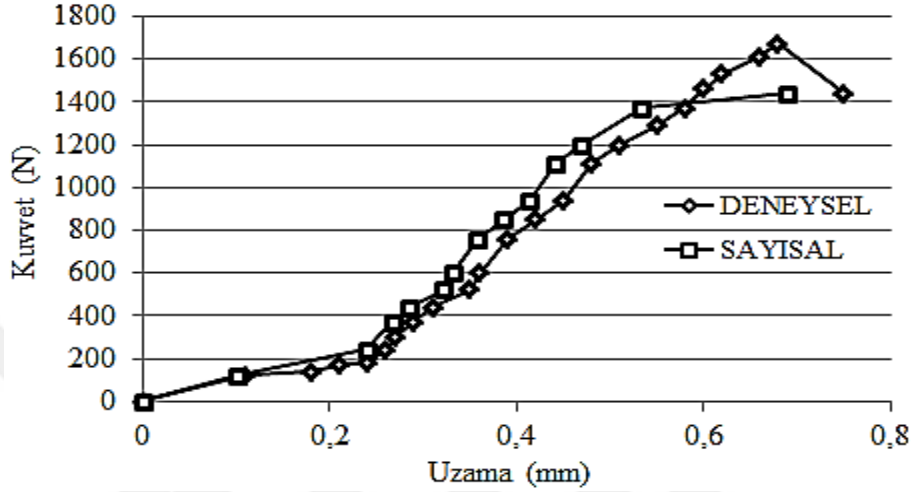
Şekil 6.16'da M10 çaplı kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.16 M10 kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.16'daki grafiğe göre, uygulanan 720 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.80 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.674 mm olarak tespit edilmiştir.

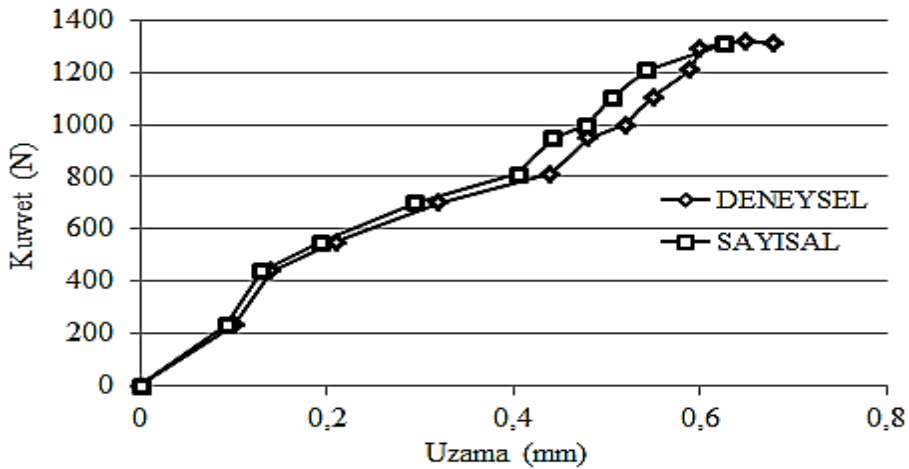
Şekil 6.17'de 8 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.17 8 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.17'deki grafiğe göre, uygulanan 1440 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.75 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.69 mm olarak tespit edilmiştir.

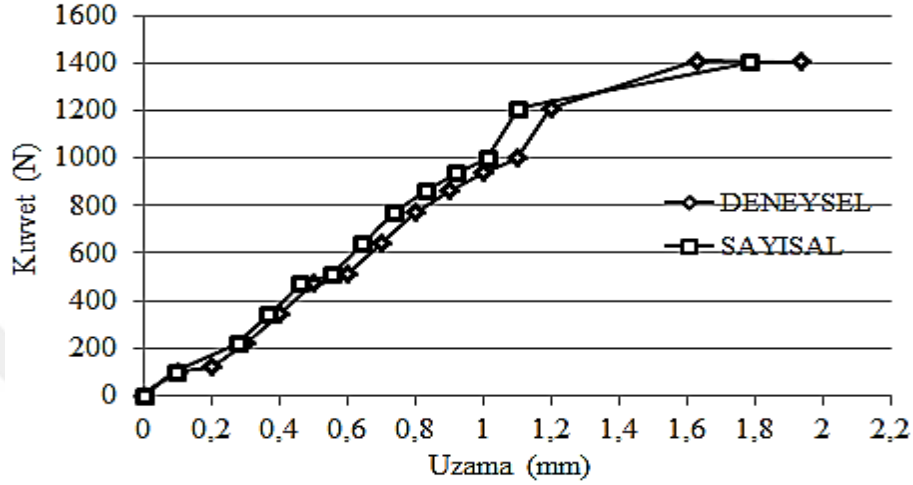
Şekil 6.18'de 10 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.18 10 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.18'deki grafiğe göre, uygulanan 1310 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.68 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.6256 mm olarak tespit edilmiştir.

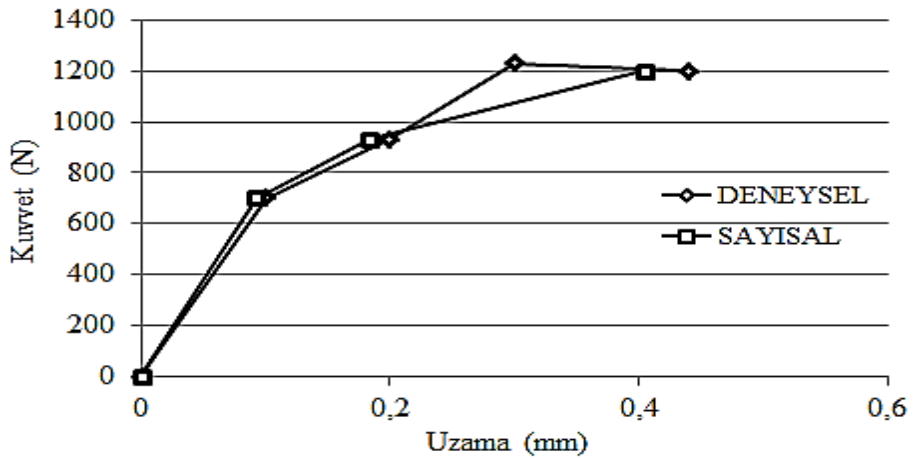
Şekil 6.19'da 8 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.19 8 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.19'daki grafiğe göre, uygulanan 1405 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 1.94 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 1.7848 mm olarak tespit edilmiştir.

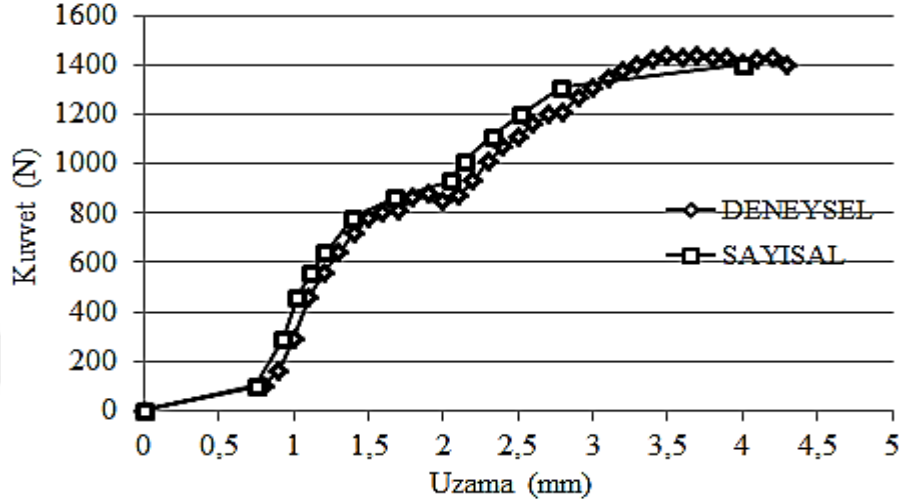
Şekil 6.20'de 10 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.20 10 mm çaplı 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.20'deki grafiğe göre, uygulanan 1200 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.44 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.4048 mm olarak tespit edilmiştir.

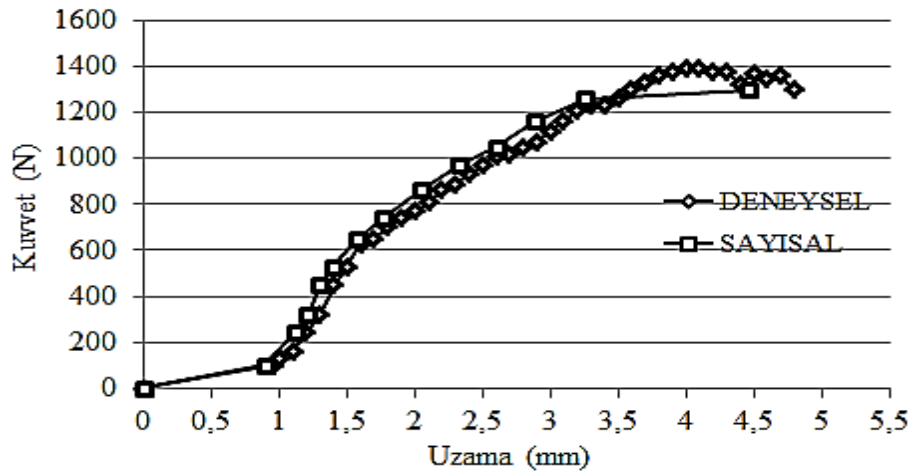
Şekil 6.21'de M8 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.21 M8 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.21'deki grafiğe göre, uygulanan 1400 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.30 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.999 mm olarak tespit edilmiştir.

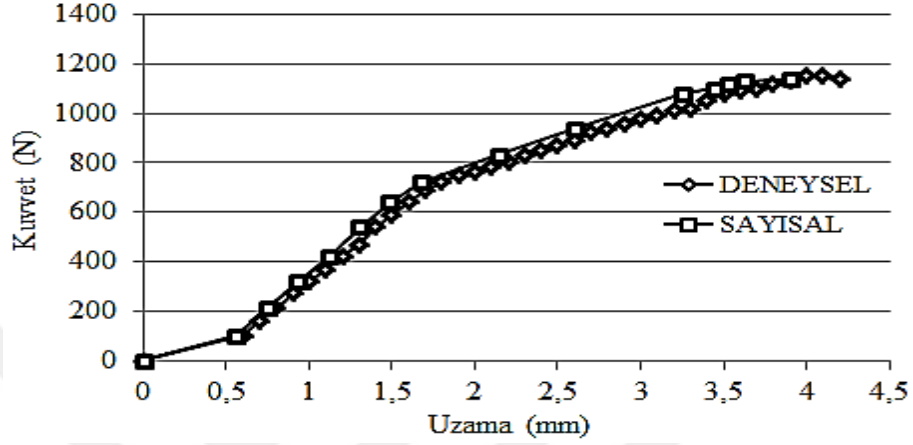
Şekil 6.22'de M10 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.22 M10 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.22'deki grafiğe göre, uygulanan 1300 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.80 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 4.464 mm olarak tespit edilmiştir.

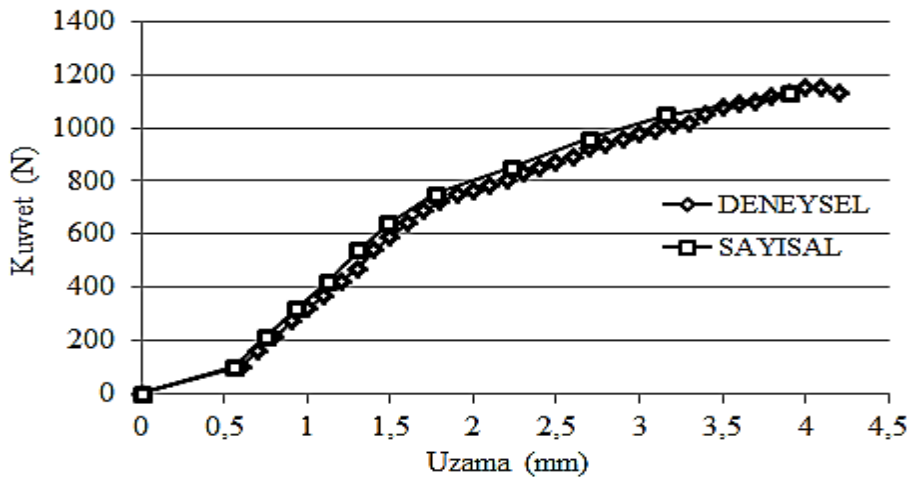
Şekil 6.23'de M8 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.23 M8 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.23'deki grafiğe göre, uygulanan 1140 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.20 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.906 mm olarak tespit edilmiştir.

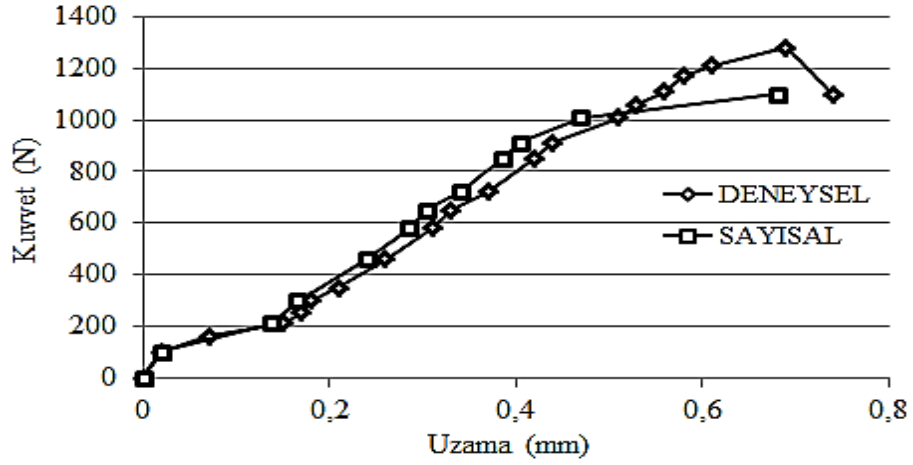
Şekil 6.24'de M10 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.24 M10 90° döndürülmüş altıgen profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.24'deki grafiğe göre, uygulanan 1130 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.20 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.906 mm olarak tespit edilmiştir.

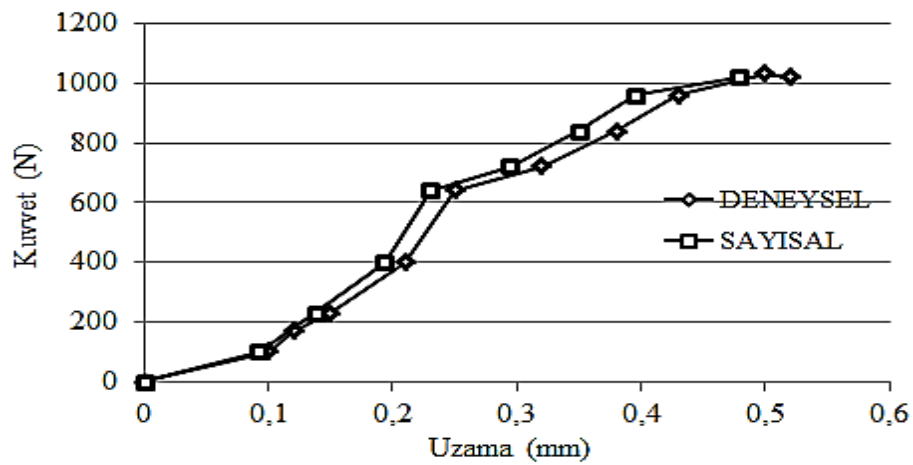
Şekil 6.25'de 8 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.25 8 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.25'deki grafiğe göre, uygulanan 1100 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.74 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.6808 mm olarak tespit edilmiştir.

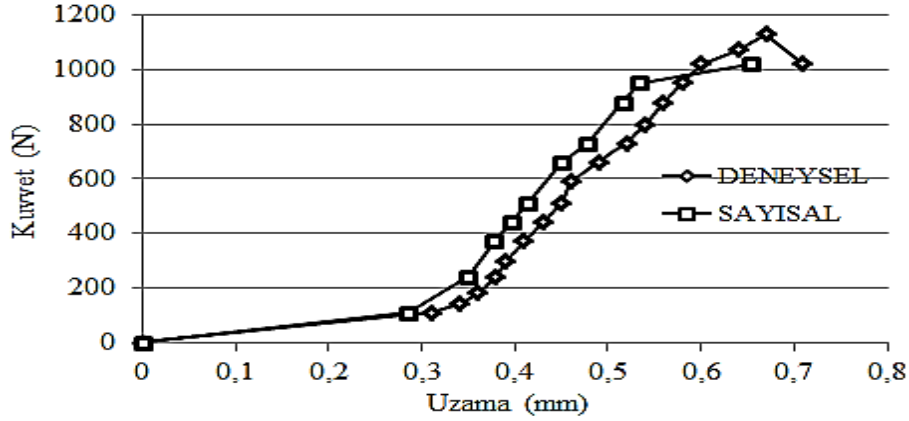
Şekil 6.26'da 10 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.26 10 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.26'daki grafiğe göre, uygulanan 1020 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.52 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.4784 mm olarak tespit edilmiştir.

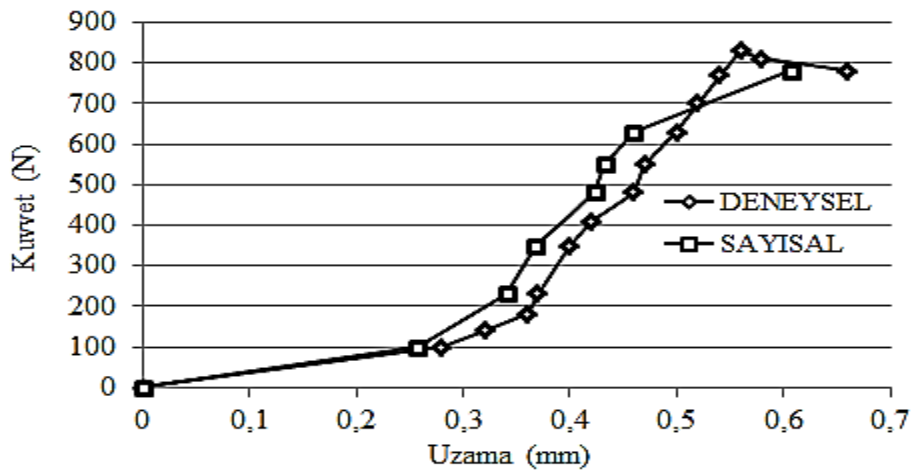
Şekil 6.27'de 8 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.27 8 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.27'deki grafiğe göre, uygulanan 1020 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.71 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.6532 mm olarak tespit edilmiştir.

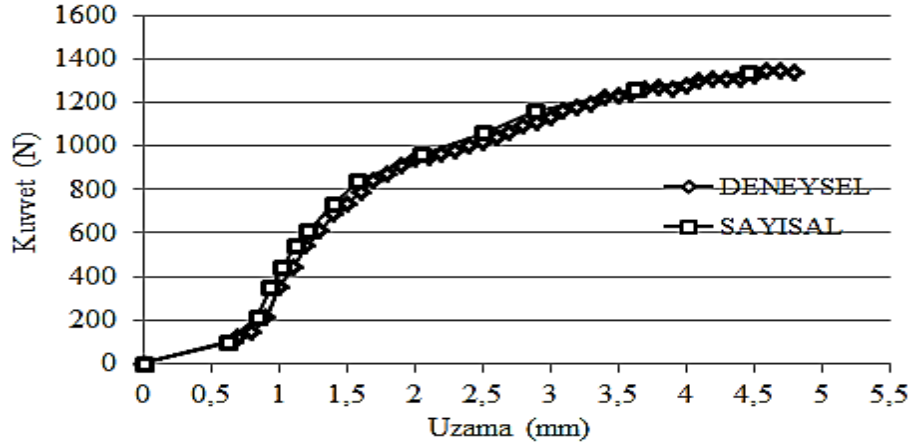
Şekil 6.28'de 10 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.28 10 mm çaplı 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.28'deki grafiğe göre, uygulanan 780 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.66 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.6072 mm olarak tespit edilmiştir.

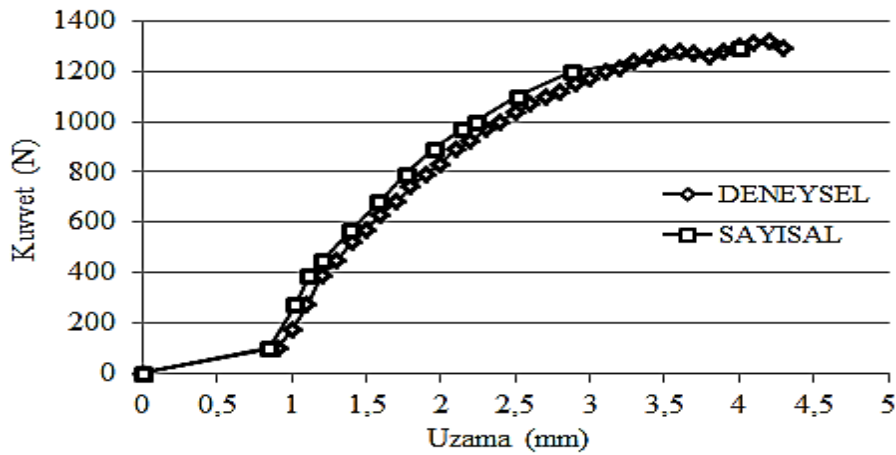
Şekil 6.29'da M8 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.29 M8 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.29'daki grafiğe göre, uygulanan 1340 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.80 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 4.464 mm olarak tespit edilmiştir.

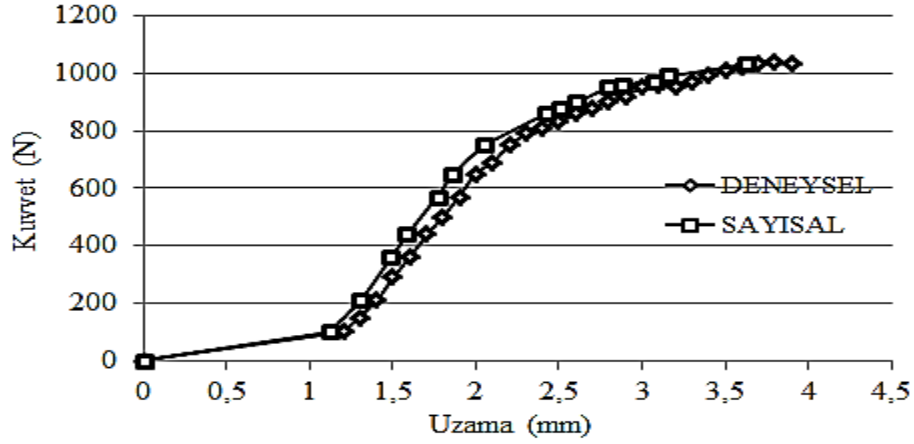
Şekil 6.30'da M10 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.30 M10 45° döndürülmüş kare profil yapıları karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.30'daki grafiğe göre, uygulanan 1290 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.30 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.999 mm olarak tespit edilmiştir.

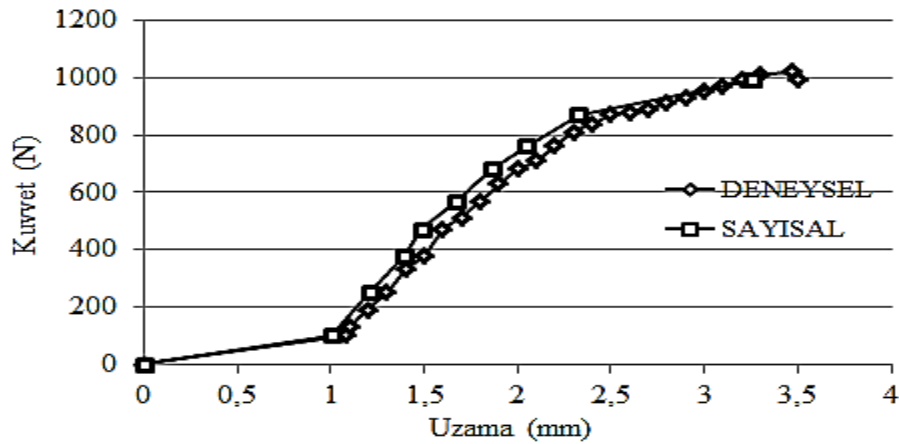
Şekil 6.31'de M8 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.31 M8 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.31'deki grafiğe göre, uygulanan 1030 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 3.90 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.627 mm olarak tespit edilmiştir.

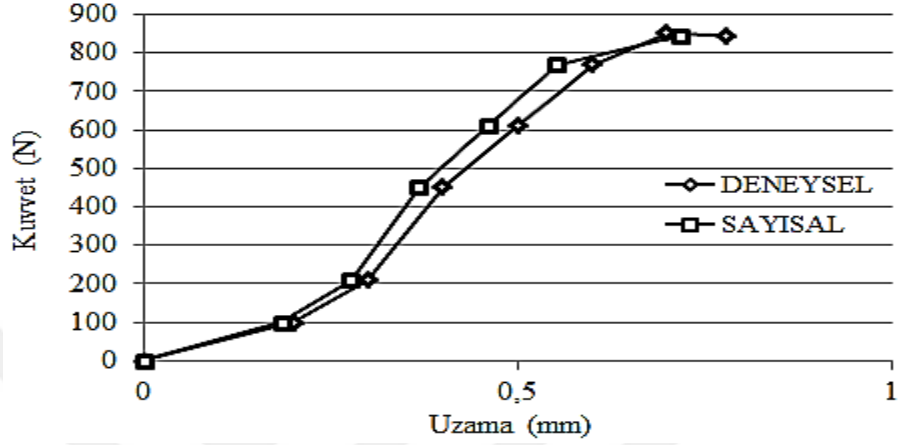
Şekil 6.32'de M10 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.32 M10 45° döndürülmüş kare profil yapıları cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.32'deki grafiğe göre, uygulanan 990 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 3.50 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.255 mm olarak tespit edilmiştir.

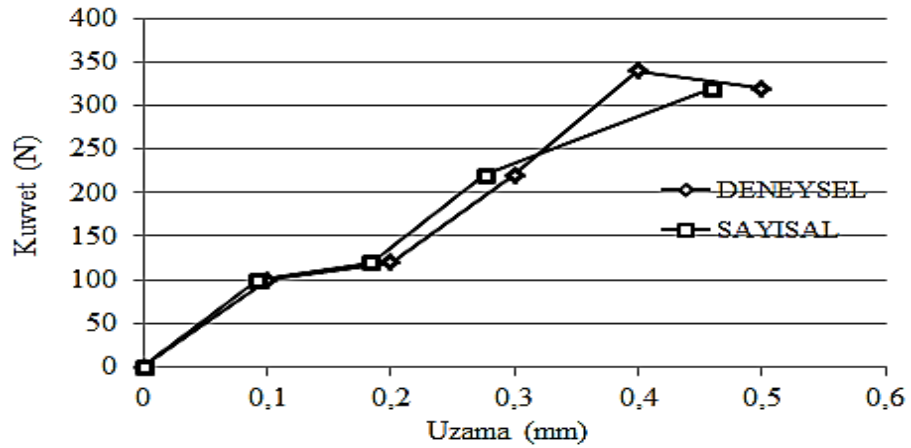
Şekil 6.33'de 8 mm çaplı altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.33 8 mm çaplı altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.33'deki grafiğe göre, uygulanan 845 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.78 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.7176 mm olarak tespit edilmiştir.

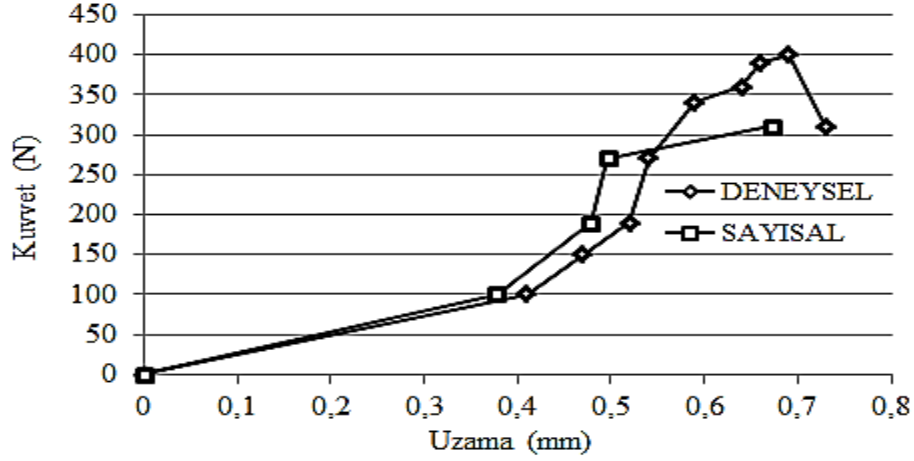
Şekil 6.34'de 10 mm çaplı altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.34 10 mm çaplı altıgen profil yapıları karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.34'deki grafiğe göre, uygulanan 320 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.50 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.46 mm olarak tespit edilmiştir.

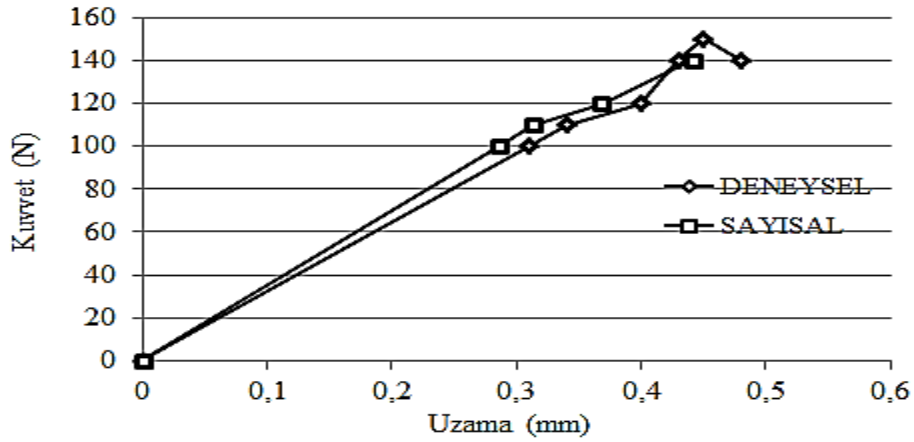
Şekil 6.35'de 8 mm çaplı altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.35 8 mm çaplı altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.35'deki grafiğe göre, uygulanan 310 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.73 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.6716 mm olarak tespit edilmiştir.

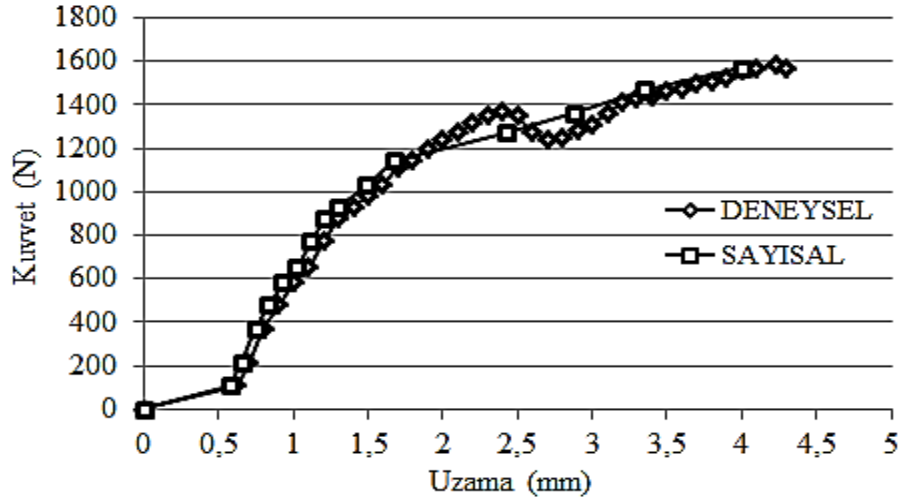
Şekil 6.36'da 10 mm çaplı altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.36 10 mm çaplı altıgen profil yapıları cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.36'daki grafiğe göre, uygulanan 140 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 0.48 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 0.4416 mm olarak tespit edilmiştir.

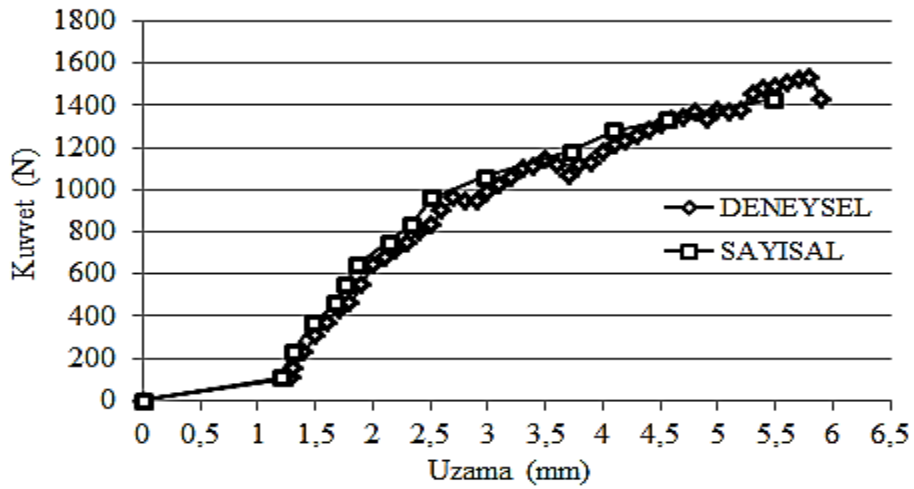
Şekil 6.37'de M8 altıgen profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.37 M8 altıgen profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.37'deki grafiğe göre, uygulanan 1570 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.30 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.999 mm olarak tespit edilmiştir.

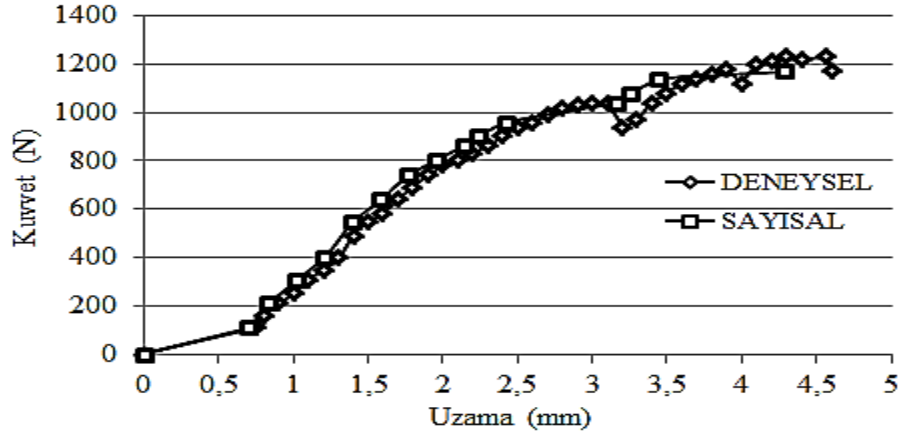
Şekil 6.38'de M10 altıgen profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.38 M10 altıgen profil yapılı karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.38'deki grafiğe göre, uygulanan 1430 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 5.90 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 5.487 mm olarak tespit edilmiştir.

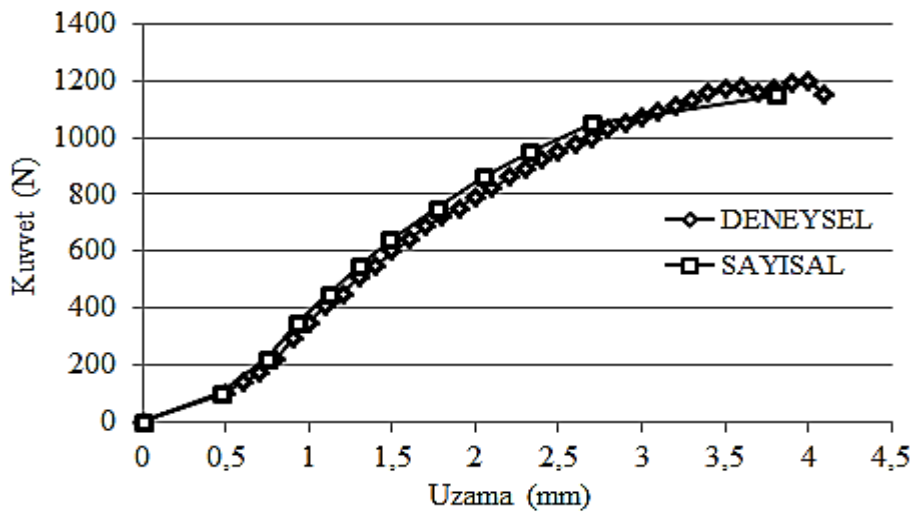
Şekil 6.39'da M8 altıgen profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.39 M8 altıgen profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.39'daki grafiğe göre, uygulanan 1230 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.60 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 4.278 mm olarak tespit edilmiştir.

Şekil 6.40'da M10 altıgen profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları verilmiştir.

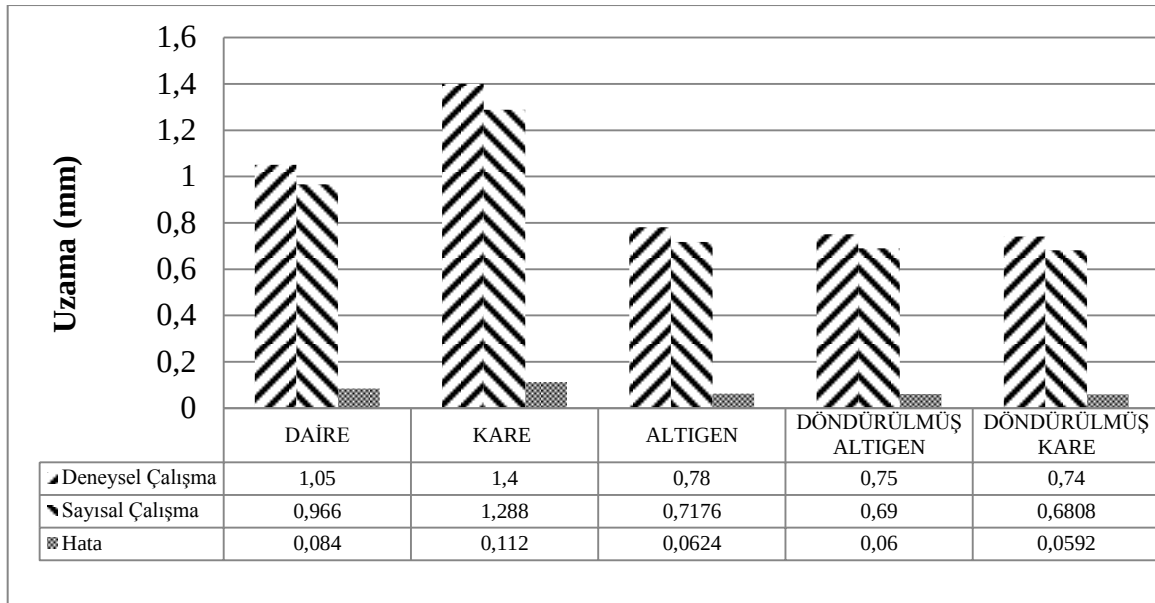


Şekil 6.40 M10 altıgen profil yapılı cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları

Şekil 6.40'daki grafiğe göre, uygulanan 1150 N kuvvete bağlı olarak meydana gelen uzama deneysel çalışma sonucunda 4.1 mm, sayısal çalışma sonucunda ise 3.813 mm olarak tespit edilmiştir.

Deneysel ve sayısal çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, deneysel çalışma sonuçlarında elde edilen grafiklerde çekme dayanımı noktaları tespit edilebilirken, sayısal çalışma sonuçlarında elde edilen grafiklerde, çekme dayanım noktaları tespit edilmeden doğrudan kopma noktasına ulaşılmıştır.

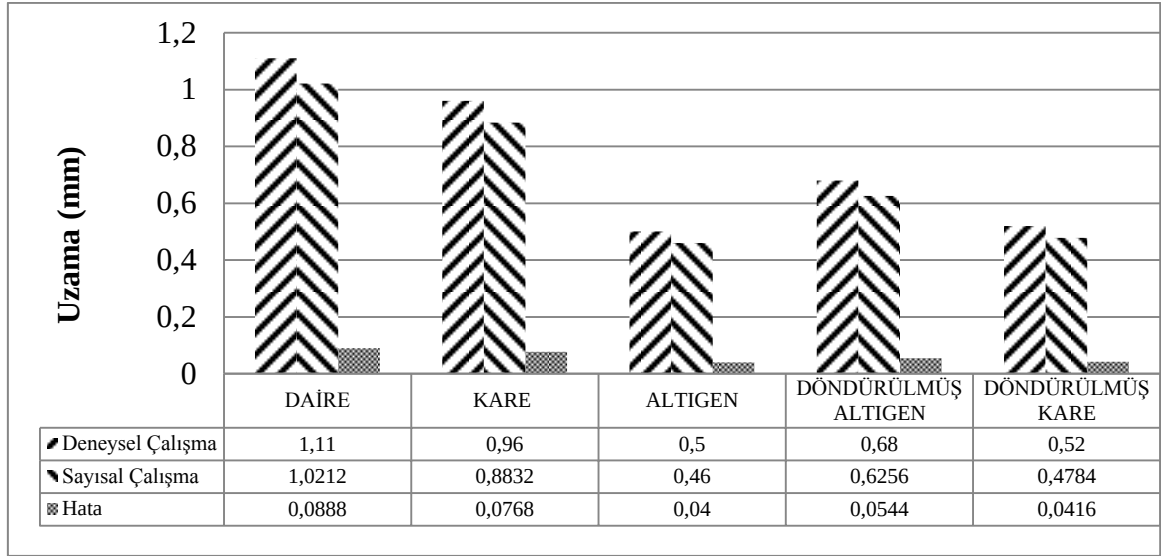
Şekil 6.41'de, 8 mm çaplı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.41 8 mm çaplı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları

Şekil 6.41'deki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,084 mm iken, mukavemeti en düşük olan altıgen bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,0624 mm olarak tespit edilmiştir.

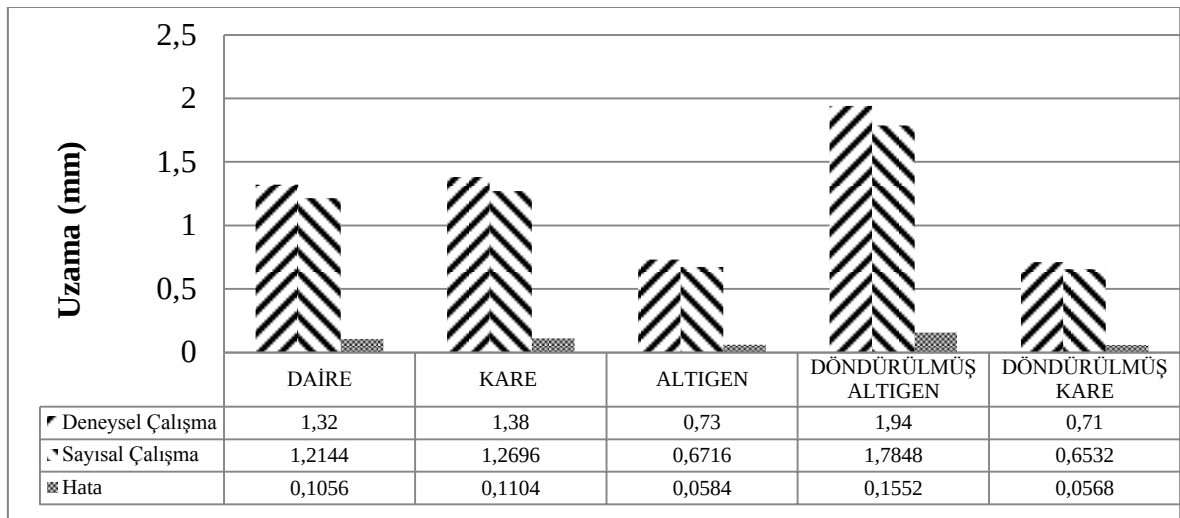
Şekil 6.42'de, 10 mm çaplı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.42 10 mm çaplı karbon fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları

Şekil 6.42’deki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0.0888 mm iken, mukavemeti en düşük olan altıgen bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0.04 mm olarak tespit edilmiştir.

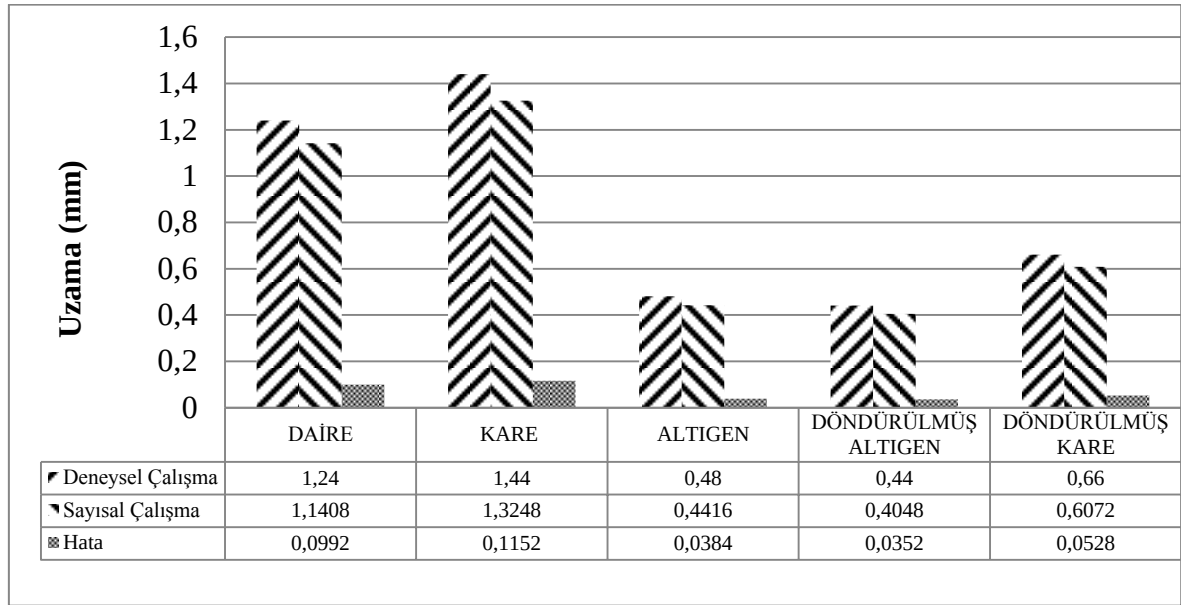
Şekil 6.43’de 8 mm çaplı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.43 8 mm çaplı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları

Şekil 6.43'deki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,1056 mm iken, mukavemeti en düşük olan altıgen bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,0584 mm olarak tespit edilmiştir.

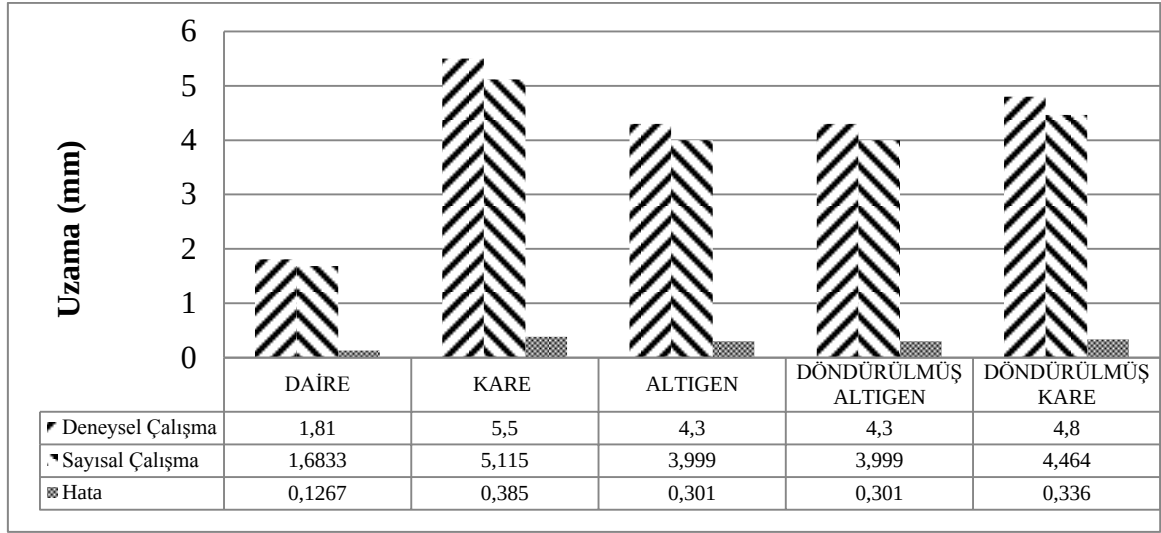
Şekil 6.44'de 10 mm çaplı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.44 10 mm çaplı cam fiber yapıştırma bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları

Şekil 6.44'deki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,0992 mm iken, mukavemeti en düşük olan altıgen bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,04 mm olarak tespit edilmiştir.

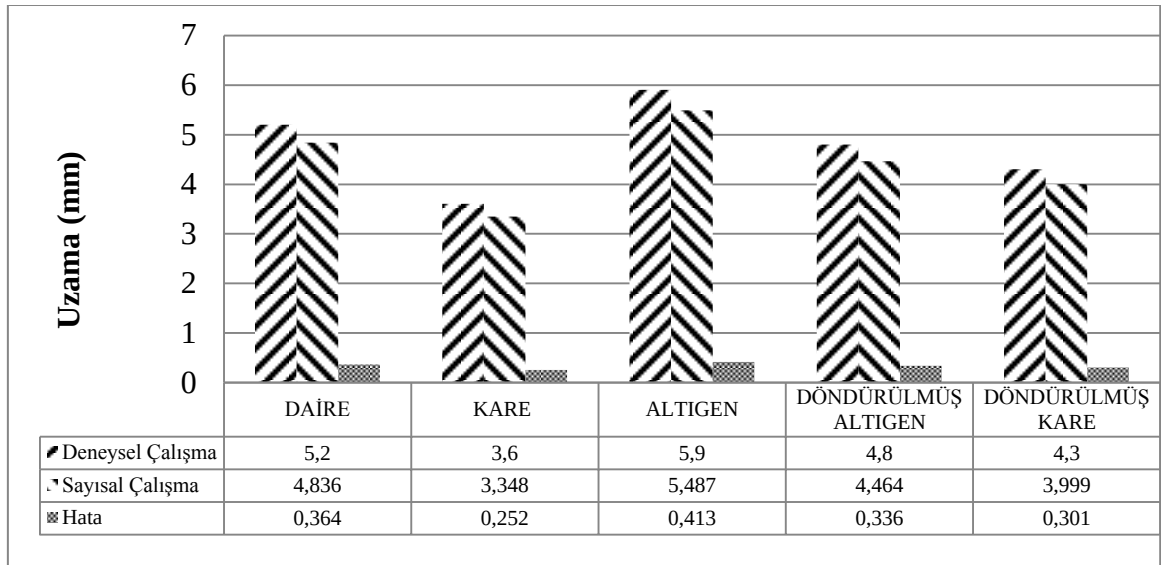
Şekil 6.45'de M8 karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.45 M8 karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları

Şekil 6.45’deki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,1267 mm iken, mukavemeti en düşük olan kare bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,385 mm olarak tespit edilmiştir.

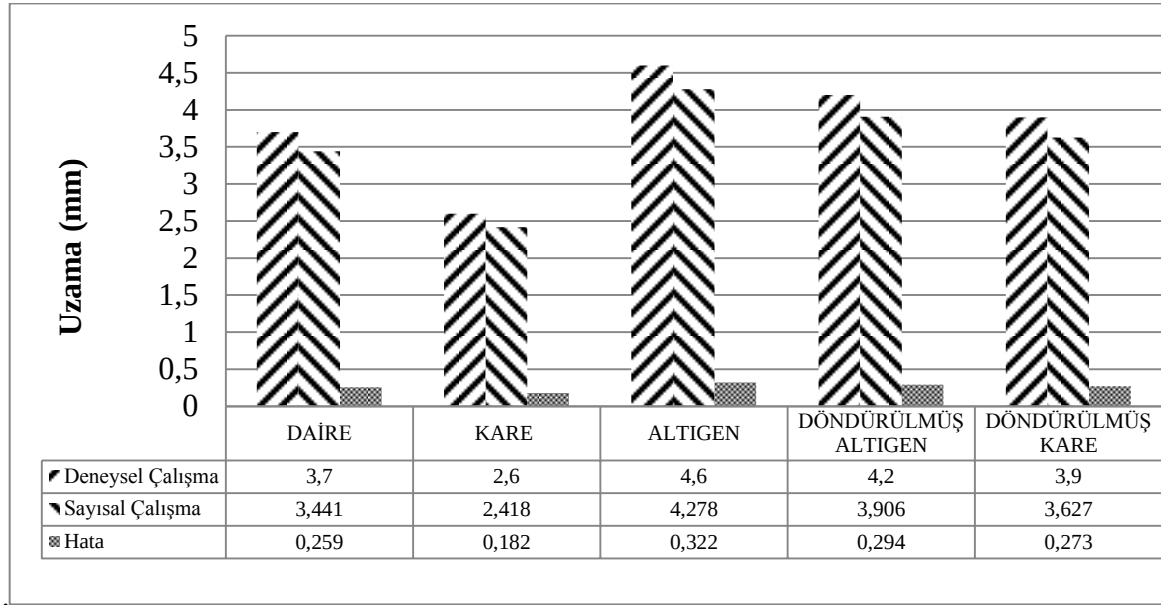
Şekil 6.46’da, M10 karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.46 M10 karbon fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları

Şekil 6.46'daki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,364 mm iken, mukavemeti en düşük olan kare bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,252 mm olarak tespit edilmiştir.

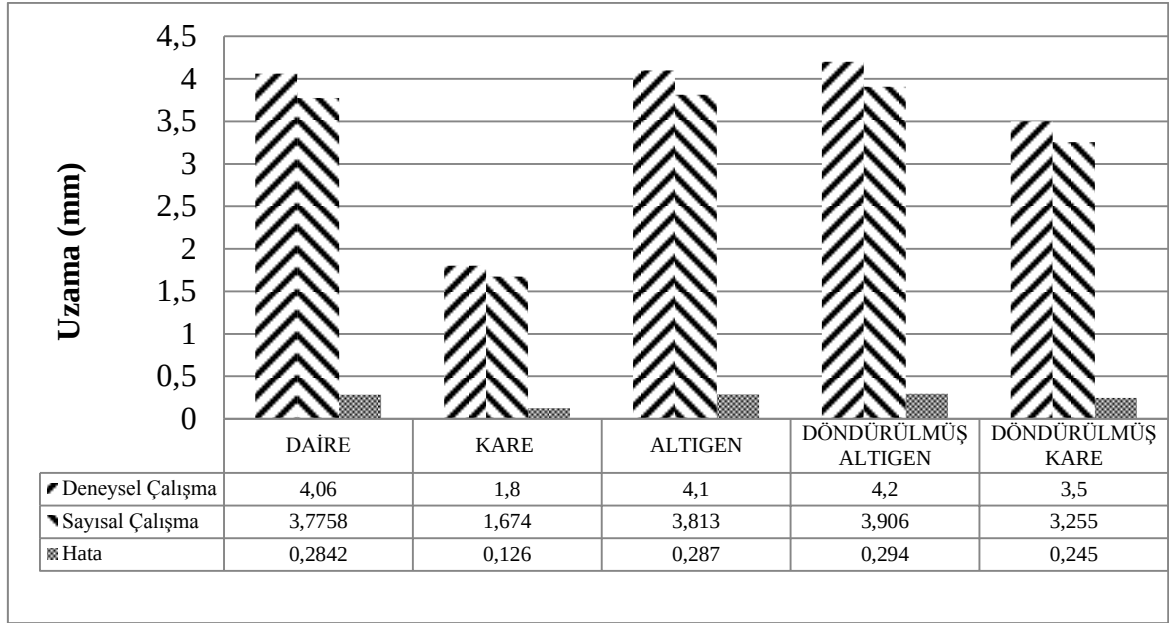
Şekil 6.47'de, M8 cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.47 M8 cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları

Şekil 6.47'deki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,259 mm iken, mukavemeti en düşük olan kare bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,182 mm olarak tespit edilmiştir.

Şekil 6.48'de, M10 cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama verileri ve hata miktarları verilmiştir.



Şekil 6.48 M10 cam fiber civata bağlantılarının deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasında kopma kuvvetleri için tespit edilen uzama ve hata miktarları

Şekil 6.48'deki grafiğe göre, mukavemeti en yüksek olan dairesel bağlantıda deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,2842 mm iken, mukavemeti en düşük olan kare bağlantıda ise deneysel ve sayısal çalışma sonuçları arasındaki hata 0,126 mm olarak tespit edilmiştir.

Deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda elde edilen veriler arasında, civatalı bağlantılarda yüzde 7'lik hata oranı tespit edilirken, yapıştırma bağlantılarında ise yüzde 8'lik hata oranı tespit edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda elde edilen uzama değerlerinin, sayısal çalışma sonucunda elde edilen uzama değerlerinden fazla olduğu belirlenmiştir.

7. SONUÇLAR

Bu tezde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda, karbon fiber ve cam fiber kompozit malzemelerin cıvatalı ve yapıştırma bağlantılarında dairesel profilin mukavemeti en yüksek yapı olduğu tespit edilmiştir. Mukavemeti en düşük yapılar ise cıvatalı bağlantılarda kare profil yapısı olurken yapıştırma bağlantılarda altıgen profil yapısı olarak belirlenmiştir.

Dairesel, kare ve döndürülmüş altıgen profil yapılarındaki yapıştırma bağlantılarının mukavemetlerinin, cıvatalar kullanılarak oluşturulan aynı profil yapılarındaki bağlantıların mukavemetlerinden yüksek olduğu tespit edilirken, cıvata bağlantılı döndürülmüş kare ve altıgen yapılı bağlantıların mukavemetleri, yapıştırma bağlantılı aynı profil yapılı bağlantıların mukavemetlerinden yüksek değerler vermiştir.

Genel olarak, Mukavemeti en yüksek bağlantı, 2380 N’da hasar gören, 8 mm çapında yapıştırma bağlantılı dairesel karbon fiber kompozit malzeme numunesi olarak tespit edilirken, mukavemeti en düşük bağlantı ise, 140 N’da hasar gören, 10 mm çapında yapıştırma bağlantılı altıgen cam fiber kompozit malzeme numunesi olarak tespit edilmiştir.

Sayısal çalışmada, maksimum çekme kuvvetleri için elde edilen gerilme dağılımlarında ve deneysel çalışma neticesinde numunelerde meydana gelen maksimum hasarlar, profil delikleri etrafında gözlenmiştir. Çalışma sonuçlarından elde edilen kuvvet-uzama eğrileri karşılaştırıldığında sayısal çalışma sonuçlarındaki uzama miktarları deneysel çalışmalara nazaran düşük çıkmıştır.

Delik çapının artmasıyla, bağlantı mukavemetinin düştüğü tespit edilmiştir.

8. ÖNERİLER

Deneyisel ve sayısal çalışma sonuçlarının birbirine daha yakın değerler vermesi için daha düşük hızlarda ölçüm yapabilen hassas dinamometreler kullanılabilir ve birleştirme işleminde kullanılan yapıştırıcı özellikleri optimize edilebilir.

Cıvatalı bağlantıların oluşturulmasında kullanılabilecek kare ve altıgen pimler imal edilerek daha uygun sonuçlar tespit edilebilir.

Sayısal çalışmalarda, gerilme analizleriyle hasar tespiti yerine hasar kriterleri kullanılabilir.

Kompozit malzemelerin mekanik özellikleri tespit edilirken, dijital kumpas yerine strain gauge sensörlerden yararlanılabilir.



9. KAYNAKLAR

- [1] Kılıç, E. , “ Kompozit Malzemelerden Yapılan Yaprak Yayların Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, (2006).
- [2] Aktas, A. , Demircioğlu, K.T., Arslan, M., Soutis, C., “Cıvata Bağlantılı Karbon/ Epoksi Kompozit Plakaların Kademeli Hasar Analizi”, 2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz kongresi, 11-12 Kasım 2010, Balıkesir.
- [3] Lessard, L., Shokrieh, M.M, “Two-Dimensional Modelling of Composite Pinned-Joint Failure”, Journal of Composite Materials, 29: 671-697, (1995).
- [4] Ayatollahi, M.R., Hashemi, R., “Mixed Mode Fracture in an Inclined Center Crack Repaired by Composite Patching”, Composite Structures, 81, 2, 264-273, (2007).
- [5] Belhouari, M., Bouiadjra, B.B., Megueni, A., Kaddouri, K., “Comparison of Double and Single Bonded Repairs to Symmetric Composite Structures: A Numrical Analysis”, Composite Structures, 65, 1, 47-53, (2004).
- [6] Bouiadjra, B.B., Belhouari, M., Serier, B., “Computation of The Stress Intensity Factors for Repaired Cracks With Bonded Composite Patch in Mod I and Mixed Mode”, Composite Structures, 56, 4, 401-406, (2002).
- [7] Seo, D.C., Lee, J.J, “Fatigue Crack Growth Behavior of Cracked Aluminum Plate Repaired With Copmosite Patch”, Composite Structures, 57, 1-4, 323-330, (2002).
- [8] Anduret, R.H. (1998). Special 2-D and 3-D geomtrically non-linear finite elements for analysis of adhesively bonded joints. Doktora Tezi, The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blackburg, Virginia, 135s.
- [9] Jones, R., Chiu, W.K., “Composite Repairs to Cracks in Thick Metallic Components”, Composite Structures, 44, 1, 17-29, (1999).
- [10] Aktas, A., Orhan, S., “Pimli Bağlantılarda Çatlak İlerleme Yönünün Sonlu Elemanlar Metodu ile Bulunması”, G.Ü. Fen Bilimleri Dergisi, 16, 4: 751- 757, (2003).
- [11] Liging, W., Bingzheng, G., Numerical Computation of Stress Intensty Factor for Bolt-hole Corner Crack in Mechanical Joints”, Chinese Journal of Aeronauties, 21, 411-416, (2008).
- [12] Fawaz, A.S., Anderson, B., “ Accurate Stress Intensity Factor Solutions for Corner Cracks at a Hole”, ScienceDirect, Engineering Fracture Mechanics, 71, 1235-1254, (2004).
- [13] Horng, L.T., Ju, H.S., “Behaviors of a Single Crack in Multiple Bolted Joints”, International Journal of Solids and Structures”, International Journal of Solids and Strucutres, 36, 4055-4070, (1999).
- [14] Pekbey, Y., “ Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Plakada Ön Gerilme Momenti ile Geometrik Parametre Değişiminin Hasar Analizine Etkisi”, 8. Uluslararası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı, 7-9 Kasım 2007.
- [15] Oudad, W., Bouiadjra, B.B., Belhouari, M., Touzain, S., Feaugas, X., “Analysis of the Plastic Zone Size ahead of Repaired Cracks with Bonded Composite Patch of Metallic Aircraft Structures”, Computational Materials Science, 46, 4, 950-954, (2011).
- [16] Albedah, A., Bouiadjra, B.B., Mhamdia, R., Benyahia, F., Es-Saheb, M., “Comparison Between Double and Single Sided Bonded Composite Repair With Circular Shape”, Materials and Desing, 32, 2, 996-1000, (2011).
- [17] Ouinas, D., Hebbar, A., Bouiadjra, B.B., Belhouari, M., Serier, B., “Numerical Analysis of The Stress Intensity Factors for Repaired Cracks From a Notch With

- Bonded Composite Semicircular Patch”, *Composites: Part B*, 40, 8, 804-810, (2009).
- [18] **Gu, L., Kasavajhala, A.R.M., Zhao, S.**, “Finite Element Analysis of Cracks in Aging Aircraft Structures with Bonded Composite-Patch Repairs”, *Composites: Part B*, 42, 3, 505-510, (2011).
- [19] **Ouinass, D., Bouiadjra, B.B., Achour, B., Benderdouche, N.**, “Modelling of a Cracked Aluminium Plate Repaired with Composite Octagonal Patch in Mod I and Mixed Mode”, *Materials and Desing*, 30, 3, 590-595, (2009).
- [20] **Bezzarouki, M., Bouiadjra, B.B., Ouinas, D.**, “SIF for Cracks Repaired with Single Composite Patch Having Two Adhesive Bands and Double Symmetric One in Aircraft Structures”, *Computational Materials Science*, 44, 2, 542-546, (2008).
- [21] **Madani, K., Touzain, S., Feaugas, X., Benguediab, M., Ratwani, M.**, “Numerical Analysis for The Determination of The Stress Intensity factors and Crack Opening Displacements in Plates Repaired with Single and Double Composite Patches”, *Computational Materials Science*, 42, 3, 385-393, (2008).
- [22] **Kaman, M. O., Gündüz, Y., Turan, K.**, “Kompozit Yama İle Tamir Edilmiş Pim Delikli Levhalarda Çatlak Problemi”, *I.Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, 17-19 Kasım 2011.
- [23] **Kinloch, A.J.** (1987). *Adhesion and Adhesives Science and Technology*. Chapman and Hall, London, 441p.
- [24] **Kinloch, A.J.** (1997). *Adhesives in Engineering*. *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, s307-335.
- [25] **Sawa, T., Liu, J., Nakano, K., Tanaka, J.** (2000). A Two Dimensional Stress Analysis of Single Lab Adhesive Joints of Dissimilar Adherents Subjected to Tensile Loads, *J. of Adhesion Science and Technology*, 14, 43-66.
- [26] **Özel, A., Kadioğlu, F., Sen, S., Sadeler, R.** (2003). Finite Element Analysis of Adhesive Joints in Four Point Bending Load, *Journal of Adhesion.*, 79, 683-697.
- [27] **Sawa, T., Higuchi, I., Suga, H.** (2002). Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Lap Adhesive Joints Under Impact Loads, *J. of Adhesion Sci. Technology*, 16, 1585-1601.
- [28] **Higuchi, I., Sawa, T., Okuno, H., Kato, S.** (2003). Three-Dimensional Finite Element Analysis of Stress Response in Adhesive Butt Joints Subjected to Impact Bending Moments. *The Journal of Adhesion.*, 79, 1017-1039.
- [29] **Higuchi, I., Sawa, T., Suga, H.** (2002). Three-Dimensional Finite Element Analysis of Single-Lap Adhesive Joints Subjected to Impact Bending Moments. *J. Of Adhesion Sci. Technology*, 16, 1327-1342.
- [30] **Mazumdar, S.K., Mallick, P.K.** (1998). Static and Fatigue Behaviour Of Adhesive Joints in SMC-SMC Composites. *Polymer Composites.*, 19, 139-146.
- [31] **Krenk, S., Jönsson, J., Hansen, L.P.** (1996). Fatigue Analysis and Testing of Adhesive Joints. *Engineering Fracture Mechanics.*, 53, 859-872.
- [32] **Aydın, M.D.** (2003). Yapıştırıcı ile birleştirilmiş tek tesirli bindirme bağlantısının mekanik özelliklerinin deneysel ve teorik incelenmesi. *Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum*, 180s.
- [33] **Pandey, P.C., Shankaragouda, H. Singh, A.K.** (1999). Non-Linear Analysis of Adhesively Bonded Lap Joints Considering Visco-Plasticity in Adhesives, *Computers and Structures.*, 70, 387-413.
- [34] **Romanos, G.** (1999). Strength Evaluation of Axisymmetric Bonded Joints Using Anaerobic Adhesives. *Int. J. of Materials and Product Technology*, 14, 430-443.

- [35] **Pfeiffer, P., Shakal, M.** (1998). Effect of Bonded Metal Substrate Area and its Thickness on the Strength and Durability of Adhesively Bonded Joints, *J. Of Adhesion Sci. Technology*, 12, 339-348.
- [36] **Ciba.** (1999). Ciba User's Guide to Adhesive, Surface Preparation and Pretreatment. Ciba Specialty Chemicals, Switzerland, 40s.
- [37] **Liu, J., Sawa, T.** (2000). Stress Analysis and Strength Evaluation of Single Lap Band Adhesive of Dissimilar Adherends Subjected to External Bending Moment. *J. Of Adhesion Science and Technology.*, 14, 67-92.
- [38] **Lee, W.S., Lee, D.G.** (1997). Static and Dynamic Torque Characteristics of Composite Cured Single Lap Joints, *Journal of Composite Materials.*, 31, 2188- 2201.
- [39] **George, B., Touyeras, F., Grohens, Y., Vebrel, J.** (1998). Analysis of Curing Mode and Mechanical Properties of an Anaerobic Adhesive. *Eur. Polym. J.*, 34, 399-404.
- [40] **Baghari, R., & Marouf, B.T.** (2007). Fracture Behavior of Multi-Layered Composites Under Impact Loading. *Materials Science and Engineering.*, 448, 20-24.
- [41] **Yadong Zhou, Qingguo Fei, Jiayue Tao.** , 2016. Profile design of loaded pins in composite single lap joints: From circular to non-circular, 6, 471- 480.
- [42] **Şahin, Y.**, “Kompozit Malzemelere Giriş”, Seçkin yayıncılık, Ankara (2006).
- [43] **Şahin, Y.** (2006). Kompozit malzemelere giriş (2. Baskı). Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- [44] **Peters, S.** (1998). Handbook of composites (second edition). California: Published by Chapman & Hall
- [45] **Okutan, B.**, “Stres and failure analysis of laminated composite pinned joints”, Degree of Doctor of Philosophy, Graduate School of Natural and Applied Sciences of Dokuz Eylül University, İzmir, (2001).
- [46] **Mathews, F., L.**, Design with advanced composite materials. In L. N. Philips, “Joining of composites”, London: The design Council, (1989).
- [47] **Baker, A.**, Composites engineering handbook, In P.K. Mallick (Eds.), “Joining and repair of aircraft composite structure”, New York: Marcel Dekker, (1997).
- [48] **Eckold, G.**, “Design and manufacture of composite structures”, New York: McGraw-Hill, Inc., 172-175, (2001).
- [49] **Lim, T.S., Kim, B.C., Lee, D.G.**, “Fatigue characteristics of the bolted joints for unidirectional composite laminates”, *Composite Structures*, 72, 58-68, (2006).
- [50] **Topçu M. ve Taşgetiren S.** (1998). Mühendisler için Sonlu Elemanlar Metodu. Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli.
- [51] **Sonia Braiek , Redouane Zitoun , Ated Ben Khalifa , Mondher Zidi,** 2017. Experimental and numerical study of adhesively bonded $\pm 55^\circ$ filament wound tubular specimens under uniaxial tensile loading, 172, 297- 310.
- [52] **Aktaş, A.** (2005). Bearing strength of carbon epoxy laminates under static and dynamic loading, *Composite Structures*, 67, 485-489.

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Murat AŞAN, 1991 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Elazığ'da tamamlayıp, 2009 yılında başladığı, Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği bölümünden 2013 yılında mezun oldu. Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenimini sürdürürken, Fırat Üniversitesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde çift anadal eğitimini devam ettirdi. Elektrik – Elektronik Mühendisliği'nden 2015 yılında mezun oldu. 2015 yılında Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konstrüksiyon ve İmalat Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı.

