



**YAPIŖTIRMA VE PİMLİ BAĞLANTILI KOMPOZİT
LEVHALARDA GERİLME VE HASAR ANALİZİ**

Mak. Müh. Esin ERHAN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

EYLÜL-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YAPIŞTIRMA VE PİMLİ BAĞLANTILI KOMPOZİT LEVHALARDA GERİLME
VE HASAR ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esin ERHAN

101120103

Ana Bilim Dalı: Makine Mühendisliği

Programı: Mekanik

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 21 Eylül 2017

EYLÜL-2017

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YAPIŞTIRMA VE PİMLİ BAĞLANTILI KOMPOZİT LEVHALARDA GERİLME
VE HASAR ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esin ERHAN

101120103

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 21 Eylül 2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 21 Eylül 2017

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ (İ.Ü)

Doç. Dr. Mete Onur KAMAN (F.Ü)



EYLÜL-2017

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmamın gerçekleşmesi sürecinde tezimin planlanıp yürütülmesinde büyük bir titizlik, sabır ve özveriyle bana destek olan, yakın ilgi ve **yardımlarını** gördüğüm, beni araştırmaya yönelten ve hiçbir yardımını benden esirgemeyen kıymetli danışman hocam, Sayın Yrd. Doç. Dr. Mustafa GÜR’e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans ders dönemim boyunca kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum, tez çalışmamda yardım ve desteklerinden dolayı Mekanik Anabilim Dalı Öğretim Başkanı Sayın Doç. Dr. Mete Onur KAMAN’ a ve Mekanik Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ’ a teşekkür ederim.

Yüksek lisans ders dönemim boyunca kendilerinden ders alma fırsatı bulduğum, bilgi ve deneyimlerinden yararlanarak fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Aydın TURGUT’a, çalışmalarım sürecinde fikir alışverişinde bulunduğum kıymetli hocalarım Prof. Dr. Şemsettin TEMİZ ve Yrd. Doç. Dr. Gurbet ÖRÇEN’ e saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca bana yüksek lisans döneminde yardım ve desteklerini esirgemeyen Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. İhsan DAĞTEKİN’e Fırat Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünün Değerli Öğretim Elemanları ve personeline, projemi destekleyen FÜBAP birimine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca çalışmam sırasında bana destek olan ve sabır gösteren aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Esin ERHAN

Makine Mühendisi

ELAZIĞ – 2017

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
ABSTRACT	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	XVI
KISALTMALAR.....	XVII
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Araştırması.....	2
1.2. Kompozit Malzemeler	5
1.3. Yapı Bileşenlerinin Şekillerine Göre Kompozitler.....	7
1.3.1. Partikül Esaslı Kompozitler	7
1.3.2. Lamel Esaslı Kompozitler	7
1.3.3. Fiber Esaslı Kompozitler	7
1.3.4. Dolgulu (veya kafes) Kompozitler	8
1.4. Kompozit Malzemelerin Özellikleri	10
1.4. Matris Malzemeler.....	11
1.5.1. Metal Matrisler	11
1.5.2. Seramik Matrisler	12
1.5.3. Polimer Matrisler	12
1.6. Takviye Ürünleri.....	13
1.6.1. Cam Elyaf	14
1.6.2. Karbon/Grafit Lifler.....	15
1.6.3. Aramid (kevlar) Lif.....	16
1.6.4. Hibrit Fiberler	17
1.7. Kompozit Yapılarda Bağlantılar.....	17
1.8. Kompozit Malzemelerin Mekanîği.....	22
1.8.1. Kompozit Malzemelerin Gerilme Analizi	23
1.8.1.1. Anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları	23
1.8.1.2. Ortotropik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları.....	25
1.8.1.3. Fiber takviye açısının gerilme – şekil değiştirme bağıntılarına etkisi	29
1.8.1.4. Tabakalı kompozit malzemelerde gerilme analizi	31
1.8.2. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri.....	36

1.8.2.1	Maksimum gerilme teorisi.....	37
1.8.2.2.	Maksimum şekil değıştirme teorisi.....	37
1.8.2.3.	Tsai-Hill hasar kriteri.....	38
1.8.2.4.	Tsai-Wu hasar kriteri	38
1.9.	Kompozit Bir Tabakada Fiber Matriks Gerilme Analizi	39
1.10.	Kompozit Yapıdaki Gerilmeler	40
2.	MATERYAL ve METOT	43
2.1.	Hibrit Kompozit Levha Üretimi	43
2.2.	Problemin Tanımlanması.....	49
2.4.	Deney Numunelerinin Hazırlanma Aşamaları.....	51
3.	SONUÇLAR.....	52
3.1.	Tek ve Çift Pim Bağlantılı Hibrit Kompozit Plakalar	52
3.1.1.	G/G/G/G Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka.....	52
3.1.2.	C/C/C/C Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka.....	55
3.1.3.	A/A/A/A Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka.....	58
3.1.4.	H/H/H/H Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka İçin Deney Sonucu	61
3.1.5.	A/G/A/G Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka.....	64
3.1.6.	A/A/G/G Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka.....	67
3.1.7.	A/G/G/A Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka.....	70
3.1.8.	G/A/A/G Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka.....	73
3.1.9.	A/H/A/H Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka.....	76
3.1.10.	H/H/A/A Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka.....	79
3.1.11.	A/H/H/A Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka.....	82
3.1.12.	H/A/A/H Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka.....	85
3.1.13.	A/C/A/C Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	89
3.1.14.	A/A/C/C Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	92
3.1.15.	A/C/C/A Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	94
3.1.16.	C/A/A/C Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	97
3.1.17.	C/G/C/G Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	100
3.1.18.	G/G/C/C Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	103
3.1.19.	C/G/G/C Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	106
3.1.20.	G/C/C/G Diziliimli Hibrit Kompozit Plaka	109
3.1.21.	C/H/C/H Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka	112
3.1.22.	C/C/H/H Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka	115
3.1.23.	C/H/H/C Diziliimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka	118

3.1.24.	H/C/C/H Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka	121
3.1.25.	H/G/H/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka.....	124
3.1.26.	H/H/G/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka.....	127
3.1.27.	H/G/G/H Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka İçin Deney Sonucu	130
3.1.28.	G/H/H/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka.....	133
3.1.29.	G/G/G/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka.....	136
3.1.30.	C/C/C/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka.....	138
3.1.31.	A/A/A/A Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka.....	140
3.1.32.	H/H/H/H Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka İçin Deney Sonucu	142
4.	TARTIŞMA VE ÖNERİLER.....	183
	KAYNAKLAR	186
	ÖZGEÇMİŞ	191

ÖZET

Bu çalışmada, farklı yapılarıdaki örgü kompozit kumaşlardan tabakalı hibrit kompozit plakalar üretilmiştir. Üretilen plakalardan kesilen deney numuneleri pimsiz tek parça halinde, tek pimli, çift pimli ve pimli-yapıştırırmalı olarak birleştirilip çekme testine tabi tutulmuştur. Pimli bağlantıların, kompozit kumaşların dizilimlerinin, hasar yükleri ve hasar tipleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar tablolar ve Şekiller halinde sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kompozit malzeme, hasar tipleri, tabakalı hibrit kompozit, yapıştırıcı, pim bağlantısı.

ABSTRACT

Stress and Failure Analyzes of Adhesively Bonding and Pin Jointed Composite Plates

In this study, laminated hybrid composite plates were produced from composite woven fabrics for different textures. Test samples cut from the produced plates were subjected to tensile test as single-piece without pin, with single pin, with double pin and pin joint adhesively bonding together. The effects of pin joint and adhesive, for different composite fabric layout on failure loads and failure types were examined. The obtained results are presented in tables and graphics.

Keywords: Composite material, failure types, laminated hybrid composite, adhesive, pin joint.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Kompozit malzeme türleri.....	7
Şekil 1.2.	Değişik tipte fiber kompozitler.	8
Şekil 1.3.	Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler.	11
Şekil 1.4.	Takviye ürünleri.	13
Şekil 1.5.	Cam fiber kumaş.	14
Şekil 1.6.	Carbon Fiber.....	15
Şekil 1.7.	PAN esaslı üretim şeması.....	16
Şekil 1.8.	Aramid kumaş.	16
Şekil 1.9.	Karbon-aramid (hibrit) kumaş.....	17
Şekil 1.10.	Simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi.	18
Şekil 1.11.	Tabakalı kompozit malzemelerin bağlantı şekilleri..	19
Şekil 1.12.	Çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda görülmesi muhtemel hasar tipleri	21
Şekil 1.13.	Tek yönlü takviyeli plaka.	27
Şekil 1.14.	Tabakalarda koordinat sisteminin gösterimi.	30
Şekil 1.15.	Plaka koordinat sistemi.	32
Şekil 1.16.	xz düzlemindeki deformasyonun geometrisi.....	32
Şekil 1.17.	Düzlem plakaya etki eden kuvvetler	34
Şekil 1.18.	Düzlem plakaya etki eden momentler	35
Şekil 1.19.	N tabakalı plakanın geometrisi.....	35
Şekil 2.1.	Basınç ve sıcaklığı ayarlanabilir rezistanslı pres ünitesi.	45
Şekil 2.2.	150-250 mm ebatlarında kesilen örgülü aramid elyaf kumaş.	45
Şekil 2.3.	Kalıp temizleme mendili ile metal kalıbın temizleme işlemi.	46
Şekil 2.4.	Kalıp ayırıcının kalıba uygulama işlemi.	46
Şekil 2.5.	Kullanılacak kumaş ağırlığının hassas tartı ile ölçümü.....	47
Şekil 2.6.	Reçine ve sertleştirici tartılması işlemi.	47
Şekil 2.7.	Kumaşa reçine-sertleştirici karışımının rulo yardımıyla yedirilmesi.	48
Şekil 2.8.	Kompozit plakayı kesebilecek ince uçlu testere.	49
Şekil 2.9.	Tek ve iki pim delikli kompozit plakanın geometrisi.	49
Şekil 2.10.	Tek ve iki pim delikli kompozit plakanın geometrisi.	50
Şekil 2.11.	Fiber takviyeli dokuma kumaşlar.	50

Şekil 2.12.	Universal Test Cihazı	51
Şekil 3.1.	G/G/G/G deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.....	53
Şekil 3.2.	G/G/G/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	53
Şekil 3.3.	G/G/G/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	54
Şekil 3.4.	G/G/G/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	54
Şekil 3.5.	G/G/G/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	55
Şekil 3.6.	C/C/C/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.....	55
Şekil 3.7.	C/C/C/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.....	56
Şekil 3.8.	C/C/C/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	56
Şekil 3.9.	C/C/C/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	57
Şekil 3.10.	C/C/C/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	57
Şekil 3.11.	A/A/A/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.....	58
Şekil 3.12.	A/A/A/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.....	59
Şekil 3.13.	A/A/A/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	59
Şekil 3.14.	A/A/A/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	60
Şekil 3.15.	A/A/A/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	60
Şekil 3.16.	H/H/H/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.....	61
Şekil 3.17.	H/H/H/H tek pim bağlantılı kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.....	62
Şekil 3.18.	H/H/H/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	62
Şekil 3.19.	H/H/H/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	63
Şekil 3.20.	H/H/H/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	63
Şekil 3.21.	A/G/A/G deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.....	64
Şekil 3.22.	A/G/A/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.....	65
Şekil 3.23.	A/G/A/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	65
Şekil 3.24.	A/G/A/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	66
Şekil 3.25.	A/G/A/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	66
Şekil 3.26.	A/A/G/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.....	67
Şekil 3.27.	A/A/G/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.....	68
Şekil 3.28.	A/A/G/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	68
Şekil 3.29.	A/A/G/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	69
Şekil 3.30.	A/A/G/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	69
Şekil 3.31.	A/G/G/A deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.....	70
Şekil 3.32.	A/G/G/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.....	71

Şekil 3.33.	A/G/G/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	71
Şekil 3.34.	A/G/G/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	72
Şekil 3.35.	A/G/G/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	72
Şekil 3.36.	G/A/A/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	73
Şekil 3.37.	G/A/A/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	74
Şekil 3.38.	G/A/A/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	74
Şekil 3.39.	G/A/A/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	75
Şekil 3.40.	G/A/A/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	75
Şekil 3.41.	A/H/A/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	76
Şekil 3.42.	A/H/A/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	77
Şekil 3.43.	A/H/A/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	77
Şekil 3.44.	A/H/A/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	78
Şekil 3.45.	A/H/A/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	78
Şekil 3.46.	H/H/A/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	79
Şekil 3.47.	H/H/A/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	80
Şekil 3.48.	H/H/A/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	80
Şekil 3.49.	H/H/A/A çift pim bağlantılı numunede hasar yükü-uzama grafiği.	81
Şekil 3.50.	H/H/A/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	81
Şekil 3.51.	A/H/H/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	82
Şekil 3.52.	A/H/H/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	83
Şekil 3.53.	A/H/H/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	83
Şekil 3.54.	A/H/H/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	84
Şekil 3.55.	A/H/H/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	84
Şekil 3.56.	H/A/A/H tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi.	85
Şekil 3.57.	H/A/A/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	86
Şekil 3.58.	H/A/A/H tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi.	86
Şekil 3.59.	H/A/A/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	87
Şekil 3.60.	H/A/A/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	87
Şekil 3.61.	H/A/A/H çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi.	88
Şekil 3.62.	H/A/A/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	88
Şekil 3.63.	H/A/A/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	89
Şekil 3.64.	A/C/A/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	89
Şekil 3.65.	A/C/A/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	90

Şekil 3.66.	A/C/A/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	90
Şekil 3.67.	A/C/A/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	91
Şekil 3.68.	A/C/A/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	91
Şekil 3.69.	A/A/C/C deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.	92
Şekil 3.70.	A/A/C/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	92
Şekil 3.71.	A/A/C/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	93
Şekil 3.72.	A/A/C/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	93
Şekil 3.73.	A/A/C/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	94
Şekil 3.74.	A/C/C/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	94
Şekil 3.75.	A/C/C/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	95
Şekil 3.76.	A/C/C/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	95
Şekil 3.77.	A/C/C/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	96
Şekil 3.78.	A/C/C/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	96
Şekil 3.79.	C/A/A/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	97
Şekil 3.80.	C/A/A/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	98
Şekil 3.81.	C/A/A/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	98
Şekil 3.82.	C/A/A/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	99
Şekil 3.83.	C/A/A/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	99
Şekil 3.84.	C/G/C/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	100
Şekil 3.85.	C/G/C/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	101
Şekil 3.86.	C/G/C/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	101
Şekil 3.87.	C/G/C/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	102
Şekil 3.88.	C/G/C/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	102
Şekil 3.89.	G/G/C/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	103
Şekil 3.90.	G/G/C/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	104
Şekil 3.91.	G/G/C/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	104
Şekil 3.92.	G/G/C/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	105
Şekil 3.93.	G/G/C/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	105
Şekil 3.94.	C/G/G/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	106
Şekil 3.95.	C/G/G/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	107
Şekil 3.96.	C/G/G/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	107
Şekil 3.97.	C/G/G/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	108
Şekil 3.98.	C/G/G/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	108

Şekil 3.99. G/C/C/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet- uzama grafiği.	109
Şekil 3.100. G/C/C/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	110
Şekil 3.101. G/C/C/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	110
Şekil 3.102. G/C/C/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	111
Şekil 3.103. G/C/C/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	111
Şekil 3.104. C/H/C/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	112
Şekil 3.105. C/H/C/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	113
Şekil 3.106. C/H/C/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	113
Şekil 3.107. C/H/C/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	114
Şekil 3.108. C/H/C/H çift delik numunenin hasar görüntüsü.	114
Şekil 3.109. C/C/H/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	115
Şekil 3.110. C/C/H/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	116
Şekil 3.111. C/C/H/H tek delikli numunenin hasar görüntüsü.	116
Şekil 3.112. C/C/H/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	117
Şekil 3.113. C/C/H/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	117
Şekil 3.114. C/H/H/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	118
Şekil 3.115. C/H/H/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	119
Şekil 3.116. C/H/H/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	119
Şekil 3.117. H/C/C/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	120
Şekil 3.118. C/H/H/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	120
Şekil 3.119. H/C/C/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	121
Şekil 3.120. H/C/C/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	122
Şekil 3.121. H/C/C/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	122
Şekil 3.122. H/C/C/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	123
Şekil 3.123. H/C/C/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	123
Şekil 3.124. H/G/H/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	124
Şekil 3.125. H/G/H/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	125
Şekil 3.126. H/G/H/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	125
Şekil 3.127. H/G/H/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	126
Şekil 3.128. H/G/H/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	126
Şekil 3.129. H/H/G/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	127
Şekil 3.130. H/H/G/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	128
Şekil 3.131. H/H/G/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	128

Şekil 3.132. H/H/G/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	129
Şekil 3.133. H/H/G/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	129
Şekil 3.134. H/G/G/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	130
Şekil 3.135. H/G/G/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	131
Şekil 3.136. H/G/G/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	131
Şekil 3.137. H/G/G/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	132
Şekil 3.138. H/G/G/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	132
Şekil 3.139. G/H/H/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.	133
Şekil 3.140. G/H/H/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	134
Şekil 3.141. G/H/H/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	134
Şekil 3.142. G/H/H/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	135
Şekil 3.143. G/H/H/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	135
Şekil 3.144. G/G/G/G yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	136
Şekil 3.145. G/G/G/G yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü. ...	136
Şekil 3.146. G/G/G/G yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	137
Şekil 3.147. G/G/G/G yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü. ...	137
Şekil 3.148. C/C/C/C yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	138
Şekil 3.149. C/C/C/C yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	139
Şekil 3.150. C/C/C/C yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	139
Şekil 3.151. C/C/C/C yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	140
Şekil 3.152. A/A/A/A yapıştırırmalı tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	140
Şekil 3.153. A/A/A/A yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.	141
Şekil 3.154. A/A/A/A yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	141
Şekil 3.155. A/A/A/A yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü. ...	142
Şekil 3.156. H/H/H/H yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin kuvvet-uzama grafiği.	142
Şekil 3.157. H/H/H/H yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü. ...	143

Şekil 3.158. H/H/H/H yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.	143
Şekil 3.159. H/H/H/H yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü. ...	144
Şekil 3.160. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.	145
Şekil 3.161. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	145
Şekil 3.162. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	146
Şekil 3.163. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	146
Şekil 3.164. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	147
Şekil 3.165. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	147
Şekil 3.166. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.	148
Şekil 3.167. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	148
Şekil 3.168. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	149
Şekil 3.169. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.	150
Şekil 3.170. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	151
Şekil 3.171. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	151
Şekil 3.172. Tabakalı hibrit kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	152
Şekil 3.173. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	152
Şekil 3.174. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	153
Şekil 3.175. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.	153
Şekil 3.176. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	154
Şekil 3.177. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	154
Şekil 3.178. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.	155
Şekil 3.179. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	156
Şekil 3.180. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	156
Şekil 3.181. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	157
Şekil 3.182. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	157
Şekil 3.183. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	158
Şekil 3.184. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.	158
Şekil 3.185. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	159
Şekil 3.186. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	159
Şekil 3.187. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.	160
Şekil 3.188. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	161
Şekil 3.189. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	161

Şekil 3.190. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	162
Şekil 3.191. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	162
Şekil 3.192. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	163
Şekil 3.193. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.....	163
Şekil 3.194. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	164
Şekil 3.195. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	164
Şekil 3.196. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.	165
Şekil 3.197. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	166
Şekil 3.198. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	166
Şekil 3.199. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	167
Şekil 3.200. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	167
Şekil 3.201. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	168
Şekil 3.202. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.....	168
Şekil 3.203. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	169
Şekil 3.204. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	169
Şekil 3.205. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.	170
Şekil 3.206. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	171
Şekil 3.207. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	171
Şekil 3.208. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	172
Şekil 3.209. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	172
Şekil 3.210. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	173
Şekil 3.211. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.....	173
Şekil 3.212. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	174
Şekil 3.213. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	174
Şekil 3.214. Yapıştırılmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	175
Şekil 3.215. Yapıştırılmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.	176
Şekil 3.216. Yapıştırılmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	176
Şekil 3.217. Yapıştırılmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.	177
Şekil 3.218. Yapıştırılmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	177

Şekil 3.219. Yapıştırılmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.....	178
Şekil 3.220. Tek pim ve yapıştırılmalı-tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.....	179
Şekil 3.221. Tek pim ve yapıştırılmalı-tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.....	179
Şekil 3.222. Tek pim ve yapıştırılmalı-tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.	180
Şekil 3.223. Çift pim ve yapıştırılmalı-çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.....	181
Şekil 3.224. Çift pim ve yapıştırılmalı-çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.....	181
Şekil 3.225. Çift pim ve yapıştırılmalı-çift pim bağlantılı kompozit numunede şekil değiştirme oranları.....	182

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 1.1	Cam tipine göre elyaf özellikleri.	15
Tablo 3.1.	G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için hasar yükleri ve tipleri.....	144
Tablo 3.2.	A/G/A/G, A/A/G/G, A/G/G/A ve G/A/A/G tabaka için hasar yükleri ve tipleri.....	150
Tablo 3.3.	A/H/A/H, H/H/A/A, A/H/H/A ve H/A/A/H tabaka için hasar yükleri ve tipleri.....	155
Tablo 3.4.	A/C/A/C, A/A/C/C, A/C/C/A ve C/A/A/C tabaka için hasar yükleri ve tipleri.....	160
Tablo 3.5.	G/C/G/C, G/G/C/C, C/G/G/C ve G/C/C/G tabaka için hasar yükleri ve tipleri.....	165
Tablo 3.6.	H/G/H/G, H/H/G/G, H/G/G/H ve G/H/H/G tabaka için hasar yükleri ve tipleri.....	170
Tablo 3.7.	G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için yapıştırılmalı ve pim bağlantılı numunelerde hasar yükleri ve tipleri.	175
Tablo 3.8.	G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için yapıştırılmalı ve tek pim bağlantılı numunelerde maksimum hasar yükleri ve tipleri.	179
Tablo 3.9.	G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için yapıştırma ve çift pim bağlantılı numunelerde hasar yükleri ve tipleri.	181

KISALTMALAR

A	: Aramid kompozit örgü kumaş
C	: Carbon kompozit örgü kumaş
G	: Glass (Cam) kompozit örgü kumaş
H	: Hibrit (carbon-aramid dokuma) kompozit örgü kumaş
PMC	: Polimer matris kompozitler
MMC	: Metal Matris Kompozitler
CMC	: Seramik Matris Kompozitler
FEM	: Yapıştırıcı ile birleştirilmiş veya pimli bağlantıların analizinde kullanılan sonlu elemanlar metodu
PAN	: Poliakrilonitril

1. GİRİŞ

Kimyasal bileşenleri farklı, birbirleri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemeyi, kullanım şartlarına uygun duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli oranlarda fiziksel olarak birleştirilerek oluşturulan malzemeler kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır [1].

Havacılık, uzay, savunma, otomotiv, deniz araçları ve birçok mühendislik uygulamaları gibi endüstrilerde hızlı teknolojik gelişim ve artan rekabet, yüksek performanslı ürünlerin tasarlanmasında, hafif ve mukavemeti yüksek malzemelere ihtiyacı gerekli kılmıştır [2]. Kompozitler, özgül ağırlıklarının düşük olması, rijitlik, yüksek mekanik özellikler, yüksek kimyasal direnç, korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik izolasyonu gibi özellikleri nedeniyle metal malzemelerin yerine tercih edilmektedir. Özellikle havacılık ve uzay sanayinde kullanılmak üzere, metallerden daha hafif ve daha yüksek mukavemeti olan kompozit malzemeler tasarlanmakta ve üretilmektedir.

Uygulamalarda kompozit yapıların veya yapıları oluşturan kompozit bileşenlerinin yük transferini iyi bir şekilde iletmesi önemlidir. Bu amaçla kompozit yapılar yapıştırma ve mekanik bağlantı şekli ile bir araya getirilmektedirler. Mekanik bağlanma elemanlarından biri pim olup, pim bağlantılarının yapıştırma bağlantısına göre çeşitli avantajları vardır. Pim bağlantılı birleştirmelerde yapıyı oluşturan elemanlar kolaylıkla değiştirilebilir, ancak bu durum yapıştırma bağlantısı için oldukça zordur. Pim bağlantılı yapılarda; bağlantı için pim deliği açılması işlemi, deliklerin etrafında gerilme yığılmalarına sebep olmaktadır. Bu gerilme yığılmaları kompozit yapının mukavemetini önemli ölçüde zayıflatmaktadır. Malzeme üzerine uygulanan yükleme arttırıldıkça gerilme yığılmalarının neden olduğu çatlaklar levhanın kenarlarına doğru hızla ilerleyerek hasara sebep olmaktadır. Bu hasarlar yırtılma kopma (net-tension), ezilme yataklama (bearing), kesme kayma (shear-out) hasarları olarak ortaya çıkmaktadır. Bu hasarların ortaya çıkmasında birçok parametre etkilidir [3].

1.1. Literatür Araştırması

Günümüzde sanayinin gelişimiyle birlikte malzeme gereksinimleri de değişmektedir. Yapılan araştırmalar ile bilim adamları ve mühendisler malzemelerin birlikte kullanımının tek başlarına kullanımına göre çok daha üstün özellikler sunduğunu fark etmişlerdir. Bu tarz malzemelerin en önemli örneklerinden birisi temel bir yapısal malzemenin matris malzemesiyle birleştirilmesiyle oluşan kompozit yapılardır. Bu yapılar genelde fiberle güçlendirilmiş polimer yapılardır. Hafiflikleri ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle araçlarda ve spor ekipmanlarında kullanılmaktadır. Farklı malzemelerin bazı özellikleri diğerlerine göre ağır basmaktadır. Zayıf özellikler iki veya üç malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulan hibrit malzemelerle telafi edilebilmektedir. Hibrit malzemeler birden fazla görevi yerine getirmek amacıyla tasarlandığından tercih edilmektedir. Kompozit malzemeler hassas olup düşük hızlardaki çarpışmalara bile duyarlıdır. Bu yüzden kompozit malzemelerin dayanımını arttırmak için kompozitlerde hibritleşme yöntemi önem kazanmıştır. Kompozitler içinde hibrit kompozit malzemeler günümüzde önemini artırmaktadır ve yeni birçok alanda bilim adamları tarafından araştırmalar için kullanılmaya başlanmıştır. Sadece aynı fiber malzeme kullanmak yerine hibrit kompozit malzeme kullanılarak ağırlık, dayanım ve maliyet gibi tasarım ve üretim için önemli başlıklar optimize edilebilmektedir. Hibrit kompozit malzemeler sayesinde farklı kompozit kumaşların avantajlarının kombine edilmesiyle yüksek dayanımda ve çok daha hafif bir malzeme elde edilebilmektedir. Hibrit malzemelerin, kırılma ve çentiğe duyarlılığın arttırılması, daha uzun yorulma ömrü elde edilmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi gibi birçok avantajları bulunabilir. Bu avantajlar göz önünde bulundurulduğunda hibrit malzemeler özellikle hafifliğin ve yorulmanın çok önemli olduğu uzay sanayinde, dayanımın hayati öneme sahip olduğu askeri alanlarda hibrit kompozit malzeme uygulamaları artırılabilir.

Hafif, korozyona dayanımlı, yüksek kimyasal direnç, yüksek mekanik ve mukavemet özellikli olan kompozit malzemelerin konstrüksiyonlarında birleştirme şekilleri uygun bir biçimde olmalıdır. Uygulamalarda kompozit yapıların veya elemanların yükü emniyetli bir şekilde iletmeleri için birleştirmelerde yapıştırma ve pimli bağlantılar kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bindirme bağlantısının lazer nokta kaynağı esnasında meydana gelen sıcaklık dağılımı ve ısıl gerilmelerin değişimi Sen [4] tarafından incelenmiştir. Palancioğlu vd Yapıştırma Bağlantıları ve Uygulama Usulleri konusunda araştırmalarda bulunmuşlardır. Derewonko vd [5] tarafından yapıştırırmalı bağlantıların mukavemeti konusunda incelemelerde bulunulmuştur. Yapıştırıcı bağlantılarında kullanılan yapıştırıcının ve yapıştırılan malzemelerin farklı mekanik ve termal özelliklerinden dolayı yüksek gerilmeler ve bağlantı üzerindeki bazı bölgelerde gerilme yığılmalarının olduğu bilinmektedir. Birçok uygulamada, yapıştırıcı bağlantılarının sadece mekanik yüklemeler altında değil, bununla birlikte ısıl yüklere de maruz kaldığı görülmüştür. Bir örnek vermek gerekirse, süpersonik bir hava taşıtında kullanılan yapıştırıcı bağlantısının, taşıtın uçuş esnasındaki rakım değişimlerinden kaynaklanan ve genellikle -55 C^0 ile 200 C^0 arasında değişen veya daha fazla miktarda oluşan sıcaklık değişimlerine dayanmasının arzu edilmesidir [6]. Yapıştırırmalı bağlantılarda, büyük bir termik ve mekanik zorlama olmadan bağlantının yapılabilmesi, diğer bağlantı yöntemlerine nazaran önemli bir avantajdır. Böylece; birleştirilecek parçaların özellikleri değişmez [7]. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş veya pimli bağlantıların analizinde sonlu elemanlar metodundan (FEM) yararlanılmaktadır. Çünkü yapısal, katı ve akışkanlar mekaniği ile ilgili problemlerin analizlerinin yapılmasında, FEM yaklaşık olarak son kırk yıldır çok geniş bir uygulama alanı bulan bir metot haline gelmiştir [8]. Bağlantılarda karma bağlantının tercih edilmesinin nedeni pim bağlantısı ve yapıştırıcı bağlantısının avantajlarından birlikte yararlanılması ve tek başlarına kullanıldıklarında meydana gelen dezavantajlarının önlenmek istenmesidir. Örneğin yapıştırıcı bağlantısı ile gerilmenin tüm yüzeye yayılması, pim bağlantısında delik civarında meydana gelen gerilme yığılmalarının azaltılmak istenmesidir. Ayrıca, iki metal plaka arasını dolduran yapıştırıcının, iki metal plaka arasındaki aşınma ve korozyonu önleyici etkisi de çok önemlidir. Özellikle mekanik birleştiriciler ile birleştirilmiş metal plakalarda korozyon pili oluşumu sıkça karşılaşılan bir sorundur.

Sen vd. [9] tarafından yapılan deneysel çalışmada, pim ve civata bağlantısı yapılmış bağlantılarda hasar analizini incelemişlerdir. Çalışmada tek pim bağlantısı kullanılmış ve pim ile delik arasında bir boşluk bırakılarak, boşluğun hasar davranışını gözlemlemek amacıyla testler yapılmıştır. Pakdil ve Sen yaptıkları çalışmada cam lifleri ile takviye edilmiş epoksi matrise sahip kompozit levhalarda pim bağlantıları neticesinde oluşan hasar davranışını incelemişlerdir. Deneysel olarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre, tek pim bağlantılı kompozit plaklarda, yatak mukavemetleri ve hasar tipleri hem geometrik parametrelerden hem de tabaka dizilişlerinden kesinlikle etkilenmektedir [9]. Apalak vd.

yapıştırılmış ve nokta kaynağı yapılmış bağlantılarda sıcaklık dağılımı ve sıcaklık tesiriyle meydana gelen ısı gerilmeleri incelemiştir. Sıcaklık dağılımını geliştirdikleri Fortran programını kullanarak, ısı gerilmeleri ise ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, alüminyum, titanyum ve çelik ince levhaların ısı gerilme analizi elasto-plastik olarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, zaman bağlı çözüm gerçekleştirmişlerdir. Çift örtü kullanılarak yapıştırılmış metal levhalarda sıcaklık etkisiyle oluşan ısı gerilmeleri incelemiştir. Çözümde sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır.

Aldas vd. [10] epoksi türü bir yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmış ince metal levhalara uygulanmış çift bindirme bağlantısında meydana gelen ısı gerilmeleri incelemiştir. Isıl yük olarak, üniform sıcaklık uygulanmıştır. Analiz, sonlu elemanlar metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aldas yapmış olduğu çalışmada, üniform sıcaklık yükü altındaki kompozit plaklarda meydana gelen ısı gerilme dağılımını sonlu elemanlar metodunu kullanarak hesaplamıştır. Termoplastik kompozit plakanın orta kısmına, delik modellenmiş ve ısı gerilmeler üzerine, delik etkisi incelenmiştir. Yapmış olduğu bir başka çalışmada üzerinde çok sayıda delik kompozit bulunan bir diskin ısı analizini gerçekleştirmiştir. Analiz elastik-plastik olarak yapılmış ve sonlu elemanlar metodu kullanılmıştır. Kısaca özetlemek gerekirse, daha önceki yapılan çalışmalarda genel olarak ya pim bağlantısı ya da yapıştırıcı bağlantısı incelenmiştir. Analiz edilen bağlantılar değişik geometrilere sahip olmakla birlikte, bağlantılara etki ettirilen yüklerin de ya çekme yükü ya da sadece ısı yükü olduğu anlaşılmaktadır. Sen ve Aldas tarafından yapılan başka bir çalışmada sıcaklık değişiminin yapıştırıcı ve pimli alüminyum plakalardaki gerilmeler üzerine etkisi sonlu elemanlar metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Çalışmada, karma bağlantı uygulanmış, sadece alüminyum malzemeden üretilmiş ince plakaların farklı üniform sıcaklıklar altındaki ısı gerilmeleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada, ilk defa iki farklı metal plaka aynı anda hem bir pim bağlantısı ve aynı zamanda bir yapıştırıcı bağlantısı ile birleştirilmiştir. Böylece, karma bir bağlantı elde edilmiştir. Ayrıca, bu karma bağlantı üzerine hem çekme yükü hem de üniform sıcaklık yükü aynı anda uygulanmıştır.

Ju ve Horng [11], birden fazla cıvata bağlantılarında tek bir çatlağın davranışını incelemişler ve yük oranlarının malzeme özelliklerine duyarlı olmadığını göstermişlerdir.

Pekbey [12], pim bağlantılı kompozit plakalarda hasar yükü ve modunu deneysel olarak incelemiştir. Ön gerilme momenti (M), plakanın bir kenarından delik merkezine olan mesafesinin delik çapına oranı (E/D) ve kompozit plaka genişliğinin delik çapına oranı (W/D) gibi parametrelerin, hasara olan etkileri incelenmiştir. Yapılan deneylerle, numuneler

üzerindeki hasar tipleri ve maksimum hasar yükleri tespit edilmiştir. Tüm numunelerde, E/D ve W/D oranlarına bağlı olarak yatak, kayma, net çeki ve bunların kombinasyonları olan hasar tipleri oluşmuştur. Ayrıca, ön gerilme momentinin, yatak mukavemetini arttırıcı bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Gören ve Sayman [14], ön gerilme altında kompozit plakaların nem ve sıcaklığın etkisi ile civatalı bağlantılardaki hasar analizini araştırmışlar. Çalışma, ön yüklemeli momentler altında civatalı cam fiber takviyeli tabakalardaki deneysel araştırmaları içermektedir. Kompozit tabakalar $[90^0/0^0/45^0/-30^0]$ olarak seçilmiş. Gerilmeler ve hasar modları üzerinde öngerilme momentlerinin etkisini karşılaştırmak için, ön gerilme momentleri 2, 4, 6 Nm olarak seçilmiş. Bazı numuneler 7 gün için 70^0C ' de saf sıcak suyun içerisine konulmuş ve öngerilme momentleri altında dayanım kuvvetleri ölçülmüştür. Sıcak su içerisinde bekletilen numunelerin dayanım gerilmelerinin kuru şartlardaki numunelerinden %5,4 'ten daha küçük olduğu tespit edilmiş.

Karakuzu ve arkadaşları [15], tarafından dört pim tarafından yüklenmiş cam-epoksi plakalarda hasar davranışlarını belirlemek için deneysel çalışma yapılmıştır. $[0/90/^+45]_s$ dizilimli plakada geometrik parametre olarak $E/D=2, 3, 4$, $F/D=2, 4, 6$ ve $G/D=2, 4, 6, 8$ olarak seçilmiştir. $E/D=2$ hariç diğer numunelerdeki hasar yük ve tiplerinin benzer olduğu belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında, farklı iki yapıya sahip örgü kompozit hibrit malzemeler ile plakalar üretilmiştir. Üretilen plakalar deney numune ebatlarında kesilerek tek ve çift olmak üzere delikler açılarak pim ile birleştirilmiştir. Yapıştırılmalı ve pimli bağlantılı numuneler hazırlanıp çekme etkisine tabi tutularak hasar analizi gerçekleştirilmiştir.

1.2. Kompozit Malzemeler

İstenilen amaç için tek başlarına uygun olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi, istenilen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak, makro yapıda bir araya getirilerek elde edilen malzemelerdir [1].

Kompozit malzemelerde güçlendirme amacı ile kullanılan bir takviye elemanın çevresinde hacimsel olarak çoğunluğu oluşturan bir matris malzeme vardır. Bu iki malzeme grubundan, takviye malzeme kompozit malzemenin mukavemet ve yük taşıma özelliğini, matris malzeme ise plastik deformasyona geçişte oluşabilecek çatlak ilerlemelerini önleyici rol oynamakta ve kompozit malzemenin kopmasını geciktirmektedir. Matris olarak kullanılan malzemenin bir

amacı da takviye elamanını yük altında bir arada tutabilmek ve yükü homojen olarak dağıtmaktır [16].

İçyapıları mikroskopik muayene ile incelendiğinde yapı bileşenlerinin seçilip ayırt edilmesi mümkündür. Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler, kimyasal olarak inert davranırlar. Ancak özellikle metalik sistemlerde düşük oranlarda bile olsa, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilir. Bu ara yüzey fazı yapının tüm özelliklerini etkileyebildiği için bu yüzeyi üçüncü bir faz olarak incelemek gerekir [17].

Matris (birincil) Faz; Sürekli ve ana fazdır. Takviye fazını bir arada tutar ve yükü paylaşmasını sağlar. Takviye (ikincil) Fazı; Matrisin dayanımını artırır. Ara yüzey (üçüncü bileşen); Matris ile takviye malzemesi arasında oluşan fazdır.

Kompozit malzemelerin mühendislikte bu kadar önemli bir yer edinmesinin sebebi; yapıyı oluşturan her iki malzemenin de özelliklerini taşıması nedeniyle çok daha gelişmiş malzemeler elde edilebilmesidir [28-29-30].

Takviye ve matris olarak kullanılabilen malzemeler amaca uygun olarak çok çeşitli olabilmektedirler. Matris malzeme olarak polimer, seramik ya da metal kullanılabilirken, takviye elamanı olarak elde edilmek istenen özelliklere göre birçok farklı takviye elamanı mevcuttur. Bu yüzden Kompozit malzemeler sınıflandırılırken iki farklı yöntem kullanılır [29].

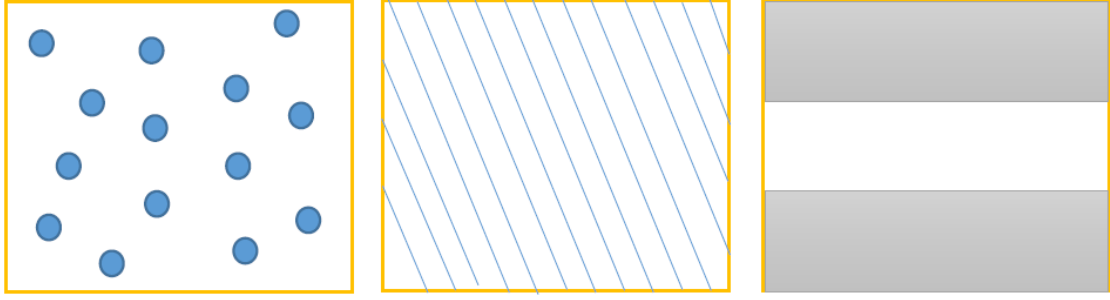
1. Matris sistemine göre sınıflandırma

- PMC – Polimer Matris Kompozitler
- MMC – Metal Matris Kompozitler
- CMC – Seramik Matris Kompozitler

2. Takviye sistemine göre sınıflandırma

- Elyaf Takviyeli Kompozitler
- Parçacık Takviyeli Kompozitler
- Tabakalı Kompozit Malzemeler
- Karma Kompozitler

Parçacık takviyeli kompozit Fiber takviyeli kompozit Tabakalı Kompozit



Şekil 1.1. Kompozit malzeme türleri.

1.3. Yapı Bileşenlerinin Şekillerine Göre Kompozitler

1.3.1. Partikül Esaslı Kompozitler

Rijitlik ve mukavemette artış sağlayan küçük granül dolgu maddesi ilavesiyle şekillendirilirler. Partikül kompozitler, bir veya iki boyutlu makroskobik partiküllerin veya sıfır boyutlu olarak kabul edilen çok küçük mikroskobik partiküllerin matris fazı ile oluşturdukları malzemelerdir. Makroskobik veya mikroskobik boyutlu partiküller kompozit malzeme özelliklerini farklı şekilde etkilerler. Partikül takviyeli kompozitleri fiber ve pul kompozitlerden ayırt eden karakteristik özellikleri, partiküllerin matris içinde tamamen rastgele dağılması ve bu nedenle malzemenin izotropik özellik göstermemesidir. Partikül esaslı kompozitlerin maliyeti düşük ve rijitliği de oldukça iyidir [18].

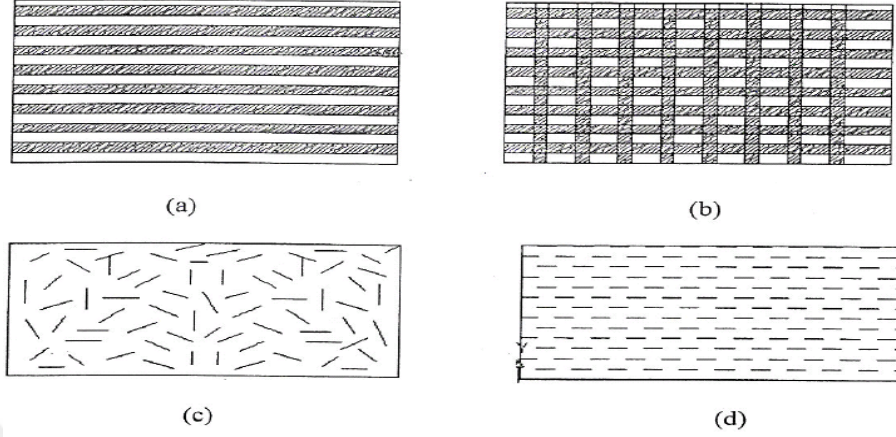
1.3.2. Lamel Esaslı Kompozitler

Yüksek yük taşıma kabiliyeti olan büyük uzunluk / çap oranında dolgu maddesi ilave edilerek üretilir. Matris içinde yer alan pulların konsantrasyonu düşük olabileceği gibi birbiri ile temas etmelerini sağlayacak derecede yüksek değerlerde olabilir. Pul esaslı sistemin maliyeti biraz daha fazla, ancak mukavemet özellikleri iyidir.

1.3.3. Fiber Esaslı Kompozitler

Birçok özelliklerde artış sağlayan, yüksek etkinliği olan liflerin ilavesiyle elde edilir. Mühendislikte kullanılan malzemelerin pek çoğu fiber şeklinde üretildiklerinde mukavemet ve rijitlikleri kütle hallerindeki değerlerinden çok üstünde olabilmektedir. Örneğin karbon fiberlerin çekme mukavemeti kütle halindeki grafitten 50 kat, rijitliği 3 kat daha yüksektir.

Fiberlerin bu özelliğinin fark edilmesiyle fiber kompozitlerin üretilmesi süreci başlamıştır. Günümüzde düşük performanslı ev eşyalarından roket motorlarına değin kullanım alanı bulan malzemeler olmuşlardır [16].



Şekil 1.2. Değişik tipte fiber kompozitler.

- a) Tek yönlü pekiştirilmiş sürekli fiber kompozit
- b) Örgü formunda fiberlerle pekiştirilmiş kompozitler
- c) Rasgele yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit
- d) Yönlendirilmiş süreksiz fiber kompozit

Fiberler yapı içerisinde kesintisiz uzayan sürekli fiberler veya uzun fiberlerin kesilmesiyle elde edilen süreksiz fiberler veya elyaflar şeklinde olabilirler. Fiber-matris kompozitlerinin mühendislik performansını etkileyen en önemli faktörler fiberlerin şekli, uzunluğu, yönlendirilmesi, matrisin mekanik özellikleri ve fiber-matris ara yüzey özellikleridir. Fiberler dairesel olduğu gibi daha nadiren dikdörtgen, hegzagonal, poligonal ve içi boş dairesel kesitli olabilir. Bu kesitlerin bazı artı özellikleri olmakla birlikte (paketleme, yüksek mukavemet vs.) dairesel kesitler maliyeti ve kullanım kolaylığı ile üstünlük sağlar. Sürekli fiberlerle çalışmak genelde daha kolay olmakla beraber tasarım serbestliği süreksizlere göre çok daha sınırlıdır. Sürekli fiberler süreksizlerden daha iyi yönlendirme göstermelerine karşılık süreksiz fiberlerin kullanılması daha pratik sonuçlar vermektedir [16].

1.3.4. Dolgulu (veya kafes) Kompozitler

Üç boyutlu sürekli bir matris malzemesinin yine üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile oluşan malzemelerdir. Matris çeşitli geometrik şekillere sahip bir iskelet veya şebeke yapısındadır. Düzgün petekler, hücreler veya süngere benzeyen gözenekli yapılar

arasında metalik, organik veya seramik esaslı dolgu maddeleri yer alabilir. Optimum özelliklere sahip kompozitlerin üretimi için birbiri içinde çözünmeyen, kimyasal reaksiyon vermeyen bileşenlerin seçilmesi gerekir.

1.3.5. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler, değişik özelliklere sahip birden çok malzemenin bir yapıştırıcı vasıtasıyla bir araya getirilmesiyle oluşur. Bu tür kompozitler “Lamine Kompozit Malzeme” diye de adlandırılırlar.

Tabakalı kompozitler genelde levha malzeme niteliğindedir. Çeşitli tabakaların birbirlerine yapıştırılması şeklindeki üretimin bir sonucu olarak, yapısal nitelikleri bakımından diğer kompozit malzeme türlerinden farklılık göstermektedirler [13].

Tabakalı kompozitlerin üretiminde genel olarak tabaka niteliğindeki her türlü malzeme kullanılmaktadır. Burada önemli olan, birbirlerinin özelliklerini takviye edecek kompozisyonun oluşturulmasıdır. Örneğin, yangına dayanıklı olması öngörülen bir malzemede, yanmayı geciktirici ve ısı iletimini kısıtlayıcı alçı tabakasının oluşturulması gibi uygulamalar yapılabilir.

Tabakalı kompozitlerin üretimde aynı veya farklı türden malzeme kullanılmaktadır. Üretimde kullanılan malzeme türlerinden hareketle,

- Farklı malzemelerden oluşan tabakalı kompozitler,
- Tek tür malzemedan oluşan kompozit malzemeler,

şeklinde iki ana grupta toplamak mümkündür. Tabakalı kompozit malzeme üretiminde kullanılan başlıca malzemeler;

- Metal tabakalı kompozit malzeme,
- Cam tabakalı kompozit malzeme,
- Polimer esaslı kompozit malzeme,
- Ahşap tabakalı kompozit malzeme,
- Tabakalı lifli kompozit malzemelerdir [13].

1.4 . Kompozit Malzemelerin Özellikleri

Kompozit malzemelerin özellikleri için kesin bir sıralama yapmak mümkün değildir. İstenilen her özellik için malzeme geliştirilebilir ve farklı değerlerde karakteristik özellik sağlanabilir [40]. Sağladığı avantajlardan dolayı bazı özellikleri;

- Hafiflik
- Yüksek mukavemet; Çekme, darbe dayanımları matris malzemeye göre yüksektir.
- Kolay şekillendirebilme.
- Elektriksel özellikler; İsteğe göre elektriksel özellik ayarlanabilir.
- Korozyon ve kimyasal etkilere karşı mukavemet; Birçok asit, alkil ve çözücüye karşı dirençleri vardır ve atmosfer şartlarında uzun süre bozulmadan durabilirler.
- Isıya ve ateşe dayanıklılık
- Kalıcı renklendirme
- Titreşim sönümlendirme

Bütün bu olumlu yanların dışında kompozit malzemelerin olumsuzlukları da şu şekilde sıralanabilir;

- Kompozit malzemelerdeki hava zerrecikleri malzemenin yorulma özelliklerini olumsuz etkilemektedir.
- Kompozit malzemeler değişik doğrultularda değişik mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.

Bir kompozit malzemenin özelliklerini belirleyen unsurlar vardır. Bunlar;

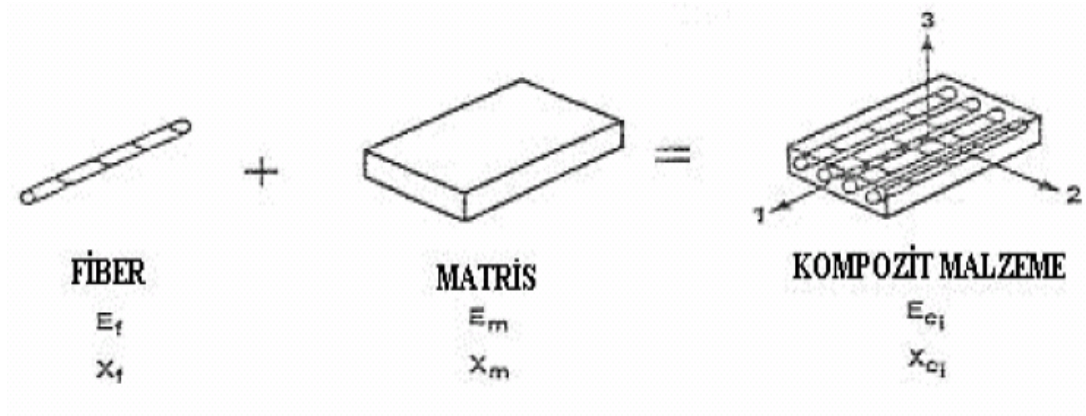
1. Takviye elemanının (fiber) özellikleri
2. Matris malzemenin özellikleri
3. Fiber-matris ara yüzeyindeki yapışma kabiliyeti
4. Fiber/matris oranı (hacimsel yoğunluk, elyaf hacim etkisi)
5. Takviye elemanının geometrisi ve matris içindeki yönlenmesi (oryantasyonu)

1.4. Matris Malzemeler

Kompozit yapıda bir matris malzemesinin temel fonksiyonları:

- Matris fiberleri bir arada tutarak fiberlere yük aktarımında köprü görevi görür. Yapıya rijitlik ve şekil verir.
- Matris fiberleri birbirinden izole eder. Böylece fiberler birbirlerinden bir yönü ile bağımsız davranırlar. Bu durum, örneğin, çatlak ilerlemesini durdurur ve yavaşlatır.
- Matris iyi yüzey kalitesi
- Matris, aşınma gibi mekanik hasarlara ve çeşitli kimyasal etkilere karşı takviye malzemelerini korur.
- Seçilen matris malzemenin özelliklerine bağlı olarak, kompozitin süneklik, darbe direnci gibi performans karakteristikleri de etkilenir. Daha sünek bir matris yapının kırılma tokluğunu arttırabilir.
- Kullanılan matrisin özellikleri ve fiberle uygunluğu, meydana gelen hasar modlarını (mekanizmaları) önemli ölçüde etkiler.

Bundan dolayı bir kompozit malzeme üretiminde kullanılan bir reçineden yüksek mekanik özellikler, iyi yapışma kabiliyeti, yüksek tokluk özellikleri ve çevresel etkilere dirençli olması beklenir.



Şekil 1.3. Kompozit malzemeyi oluşturan bileşenler.

1.5.1. Metal Matrisler

Hafif metaller, kompozitler için matris malzemesi olarak çok cazip olmaktadır. Bunlar plastiklerden daha yüksek elastik modül, dayanım ve tokluğa sahip olup yüksek sıcaklıklarda özellikleri de daha iyidir. Ancak metal matrisli kompozit üretimi daha zordur. Bunlar her

elyafla iyi ara yüzey bağı oluşturmazlar. Metallerle en kolay bağ oluşturan silisyum karbür ile kaplanmış boron elyaftır. Fakat bunlar pahalı olması sebebiyle tercih edilmemektedir.

MMC 'lerde çok yaygın olarak kullanılan matris malzemesi, düşük yoğunluklu, iyi tokluk ve mekanik özelliklere sahip olan hafif metaller ve alaşımlarıdır [16].

Atmosfere karşı korozyon dayanımının da çok yüksek olması diğer karakteristik özelliklerinden biridir. Genellikle Al, Ti, Mg, Ni, Cu, ve Zn matris malzemesi olarak kullanılır ayrıca Al ve alaşımları, Ti ve Mg yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

1.5.2. Seramik Matrisler

Seramikler, metal ve metal olmayan elemanlardan meydana gelen inorganik bileşikler olup doğada kayaların dış etkilere karşı parçalanması sonucu oluşan kaolen, kil vb. maddelerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilen malzemelerdir. Farklı şekilde silikatlar, alüminatlar ile birlikte metal oksitlerinden oluşurlar. Genelde ya iyonik veya iyonik+kovalent bağ karışımına sahip oldukları için çok karardır. Bu nedenle de çok sert, gevrek ve yüksek sıcaklığa dayanıklıdır.

Seramikler, gevrek olduklarından mikro yapısal kusurları çentikler ve mikro-çatlaklar gerilme yığılmasına yol açtıklarından çekme dayanımı düşüktür. Basma dayanımları ise çok yüksektir. Ancak mikro-yapısal kusurları azaltacak şekilde çok ince çaplı elyaflar üretilerek daha dayanıklı kompozit üretmek mümkün olmaktadır.

Bu malzemelerde kayma direnci çok yüksek olduğundan plastik şekil verme olmaksızın gevrek tarzda kırılırlar. Bununla beraber çok sert olduğundan dolayı bazıları Al_2O_3 ve SiC gibi aşındırıcı malzeme olarak kullanılır.

1.5.3. Polimer Matrisler

Kompozit malzemelerin %90'a yakın kısmını polimer esaslı matrisler oluşturmaktadır. Polimerler, monomer denilen kimyasal ünitelerden meydana gelir. Bir monomer polimerizasyon yoluyla başka monomer molekülleri ile birleşerek tekrarlanan ünitelerden oluşan çok uzun zincir şeklinde bir makro-molekül meydana getirilir.

Polimerlerin yapısı karışık yapılı zincirlerden oluştuğundan komşuları ile uyum sağlayıp düzenli yapı oluşturmaları çok zordur. Bir lineer polimerin yapısı pişmiş makarnayı andırır, zincirleri birbiri ile dolaşmış halde bulunur [16].

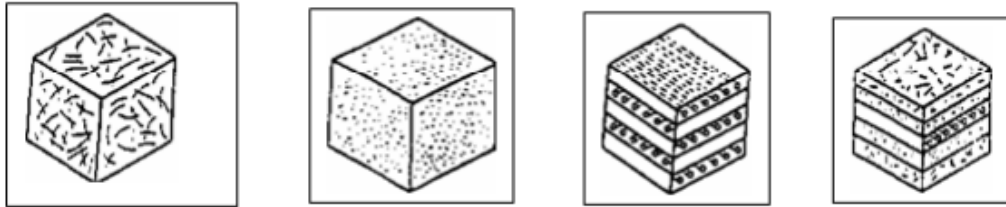
Polimerler hafif olması ve kolay işlenebilmelerinden dolayı geniş bir uygulama alanına sahiptir. Karışık geometriye sahip şekiller bile kolaylıkla bir kalıba enjekte etmek suretiyle üretilmektedir. Bu nedenle reçine olarak kullanılmaya çok müsait yapılardır. Üretim teknikleri diğer yapılara göre daha kolaydır.

1.6. Takviye Ürünleri

Kompozit malzemelerde takviye elemanı partikül, lif, tabaka yada bunların karışımı şeklinde bulunabilir. Partikül olarak bulunan takviye elemanları genellikle seramik ya da metal tozları şeklindedir. Takviye ürünleri genellikle nihai üründe istenilen özellikler belirlenerek seçilir.

- Üretim tekniği
- Takviye elemanının ıslanabilirliği
- Yönlendirilebilme

seçim yaparken dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerdir.



Elyaf Takviyeli

Parçacık takviyeli

Tabakalı

Karma

Şekil 1.4. Takviye ürünleri.

Takviye ürünleri her bir uygulama alanı için farklı olsa da en çok lifsi yapılar kullanılmaktadır. Lifsi yapılar içerisinde en önemli olanlar, cam elyaf(fiber glass), karbon elyaf (karbon fiber) ve aramid (kevlar) yapılarıdır. Bunlara ek olarak boron, alüminyum oksit, silisyum karbür, organik moleküller vb. kullanılan diğer önemli takviye malzemeleridir.

Üretim tekniğinde yıllardır yaygın olarak elle yatırma yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemin avantajları ve dezavantajları şu şekilde özetlenebilir:

Avantajları;

- Öğrenilmesi ve uygulanmasının kolay olması,
- Özellikle oda sıcaklığında kullanılan reçinelerin düşük maliyeti,
- Yönteme uygun malzeme temininde sıkıntı yaşanmaması,
- Spreylemeye oranla daha fazla fiber yoğunluğu ve sürekli (uzun) lif kullanımına uygun olmasıdır.

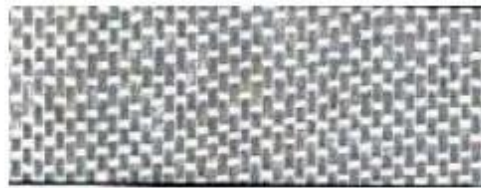
Dezavantajları;

- Yöntem tabakalama yapan kişinin el becerisine çok bağlıdır
- Yüksek “Fiber Hacimsel Yoğunluğu” na ulaşmak çok zordur.
- Reçine oranı düşük tutulmak istendiğinde yüksek oranda hava boşlukları ve ıslanmayan bölgeler meydana gelebilir
- Bu yöntemde kullanılan reçinelerin yoğunluğu ve viskozitesi düşüktür. Bu tür reçineler ağır moleküllü reçinelere oranla insan üstlüğüne daha zararlıdır.
- Pahalı havalandırma sistemleri olmaksızın, polyester ve vinilester için havaya karışan styrene konsantrasyonunu yasal sınırlarda tutmak zordur.

Bu yöntemle üretilen kompozitler, rüzgar türbin kanatları, plakalar, tekne, mimari amaçlı kalıplamalar vb. ürünlerin imalatında kullanılmaktadırlar.

1.6.1. Cam Elyaf

En ucuz olan ve en çok kullanılan takviye elemanıdır. Sıcak ve soğuk havaya karşı direnç, nem direnci, elektriksel yalıtım, düşük yoğunluk ve yüksek dayanım nedeni ile tercih edilen kompozit malzemedir.



Şekil 1.5. Cam fiber kumaş.

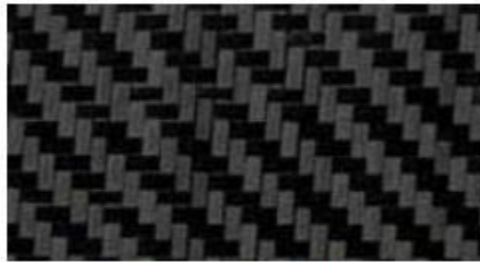
Cam elyafın esasını silis-kum (SiO_2) meydana getirmektedir. Diğer bileşenler ise sodyum (Na), kalsiyum (Ca), magnezyum (Mg), alüminyum (Al), baryum (Ba) ve demir (Fe) gibi elementlerin oksitlerinden oluşur. Eriyik haline getirilmiş hammaddeler lifler halinde yüksek hızlarla çekilir. (20-70 m/s) Sonuç olarak 5-20 mikron kalınlığında lifler elde edilir. Bu lifler demet haline getirilmeden önce bağlayıcı adı verilen bir kimyasal bileşim ile kaplanır. Bağlayıcı cinsi, kompozit malzeme içinde cam elyafının performansını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir.

Tablo 1.1 Cam tipine göre elyaf özellikleri.

CAM TİPİ	ÖZELLİKLERİ
A-camı	Yüksek alkali oranı-düşük maliyet
C-camı	Kimyasal dayanım (yüzey tülleri)
E-camı	Elektriksel özellikler
L-camı	Radyasyona karşı kurşun içerir
M-camı	Yüksek elastik modül
S-2 camı	Yüksek çekme dayanımı
W-2 camı	Paneller için yarı şeffaf
AR- camı	Alkali dayanım
R- camı	Yüksek çekme dayanımı

1.6.2. Karbon/Grafit Lifler

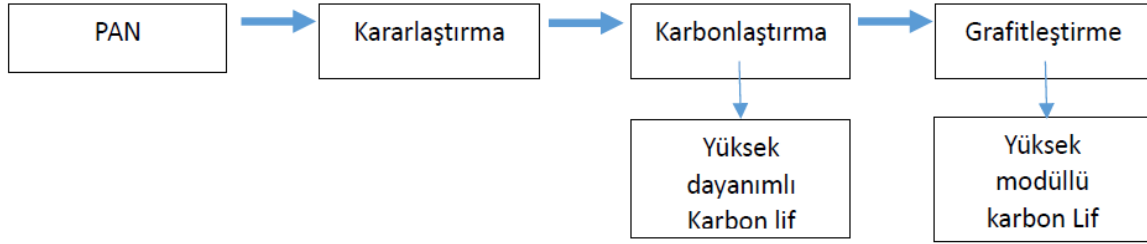
Yüksek teknoloji ürünü olarak kompozit pazarının geniş bir kısmı, karbon veya grafit elyaf ürünlerinden yararlanmaktadır. Karbon elyafının diğer takviye liflerine göre daha farklı avantajları vardır. Nispeten düşük elyaf yoğunluğu, yüksek mukavemet ve yüksek modül özelliklerini bir araya getirerek üstün bir kombinasyon özelliği sunmaktadır. Aynı zamanda yüksek ısılarda özelliğini koruma ve yorulma dayanımı özelliklerine sahiptir. Karbon ve grafit elyaflar organik maddelerden üretildikleri için organik fiberler olarak da adlandırılırlar [16].



Şekil 1.6. Carbon Fiber.

Ham madde olarak poliakrilonitril (polyacrylonitrile, PAN), Selüloz (Rayon) ve Zift (Pitch) kullanılır. PAN, tekstil kaynaklı bir polimer fiberdir. Zift fiberler arıtılmış petrolden veya katran şeklindeki kömür ziftinden eğrilerek elde edilir. Karbon fiber/elyaf üretiminde günümüzde daha çok PAN-esaslı fiberlerden (ham lif= precursor) yararlanılmaktadır. Zift-esaslı fiberler daha direngen ve gevrek bir karaktere sahiptirler [16].

PAN esaslı bir üretim şeması aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 1.7. PAN esaslı üretim şeması.

1.6.3. Aramid (kevlar) Lif

Geçen yirmi yıl boyunca, yüksek teknoloji ürünleri olarak bilinen aramid elyafı önemli bir mesafe kat etmiş olup uzay, denizcilik, spor ürünleri, eğlence, otomotiv ve silah endüstrisi gibi klasik kompozit pazarlarına hitap etmiştir. Yüksek düzeyde yönlendirilmiş olan bu polimer, düşük yoğunluk ile yüksek modül ve yüksek düzeyde yapışma özelliği ile yüksek mukavemet/ağırlık oranını üründe bir araya getirmektedir. Mukavemet ve modül değerleri yanı sıra, liflerin kolaylıkla ıslatılabilmesi ve üründe darbe dayanımı özellikleri dolayısıyla yaygın olarak kullanılan reçinelerin çoğunluğu ile kullanılabilir.



Şekil 1.8. Aramid kumaş.

Aramid elyafı piyasada daha çok ticari isimleri kevlar (DuPont) ve twaron (Akzo Nobel) olarak bilinmektedir. Farklı uygulamaların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok farklı özelliklerde aramid elyafı üretilmektedir. Kevlar 29 ürünü, düşük yoğunluk ve yüksek dayanımı ile çelik yelek, ip ve kablo yapımında kullanılmaktadır. Kevlar 49, düşük yoğunluk

ve yüksek dayanım yanı sıra yüksek modüle sahiptir ve havacılık-uzay sanayi, denizcilik, otomobil gibi birçok sanayi alanında kullanılmaktadır.

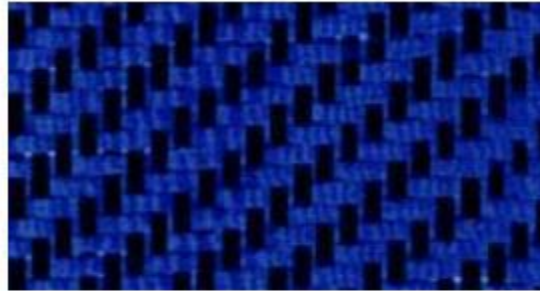
Aramid elyafı, fiyat/performans değerlerini sağlamak üzere tasarlanmış cam ve karbon elyafının kombinasyonu şeklinde olan hibrid ürünler halinde de mevcuttur.

Önemli özellikleri;

- Genellikle rengi sarıdır
- Düşük yoğunluk
- Yüksek dayanıklılık
- Yüksek darbe dayanımı
- Yüksek aşınma dayanımı
- Yüksek yorulma dayanımı
- Yüksek kimyasal dayanımı
- Kevlar elyafı kompozitler cam elyafı kompozitlere göre %35 daha hafiftir
- Cam türü elyaflara yakın basınç dayanıklılığı

1.6.4.Hibrit Fiberler

Birden fazla takviye malzemesinin bir arada kullanılarak oluşturulan takviye ürünleridir.



Şekil 1.9. Karbon-aramid (hibrit) kumaş.

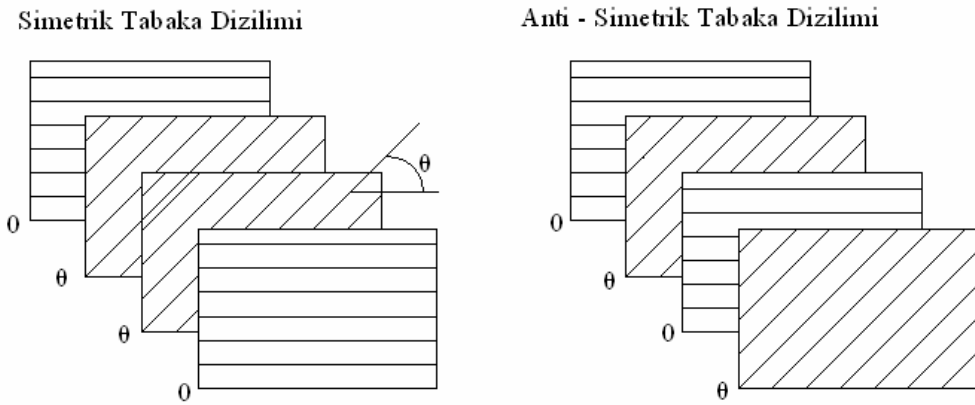
1.7. Kompozit Yapılarda Bağlantılar

Kimyasal bileşenleri farklı olan birbiri içerisinde pratik olarak çözünmeyen iki veya daha fazla malzemeyi, kullanım alanına uygun duruma getirmek için belirli şartlar ve belirli miktarlarda fiziksel olarak birleştirilerek oluşturulan malzemelere kompozit malzemeler denir.

Kompozit malzemeler genel olarak bir takviye malzemesi ve daha az mukavemetli matris (dolgu) malzemesi kullanılarak oluşturulmaktadır. Fiberler ile takviye edilmiş kompozit

malzemelere fiber takviyeli kompozit malzemeler adı verilmektedir. Fiber olarak çeşitli metalik malzemelerin yanı sıra cam elyafı, kevlar ve karbon gibi metalik olmayan malzemelerde kullanılmaktadır. Takviye malzemesinin kimyasal yapısına uygun olarak matris malzemesi seçilebilir. Kompozit malzemeler yüksek mukavemet, hafiflik, yüksek korozyon direnci, elektrik, ısı ve ses yalıtımı gibi özelliklere sahiptirler.

Farklı fiber takviye açılarına veya farklı özelliklere sahip kompozit tabakaların belirli bir sayıda ve sırada bir araya getirilmesi ile tabakalı kompozit malzemeler oluşturulmaktadır. Her bir tabakasinda sahip oldukları farklı özelliklerinden dolayı tabakalı kompozit yapılar havacılık, uzay, konstrüksiyon vb. alanlarda sıklıkla tercih edilen yapılardır. Kompozit malzemelerin sahip oldukları özellikleri farklı katmanlarında bulundurdıkları için tabakalı kompozitler, aynı zamanda birçok özelliği bünyesinde bulundurabilirler [35]. Örneğin aynı anda yüksek korozyon direncine, yüksek mukavemete ve elektrik yalıtımına sahip olabilirler. Fiber takviye açısının değişimi ile bir araya getirilmiş olan tabakaların simetrik veya anti simetrik tabaka dizilimi mümkündür.



Şekil 1.10. Simetrik ve anti simetrik tabaka dizilimi.

Tabakalı kompozit malzemelerin, metalik malzemelere göre avantajları şu şekilde sıralanabilir:

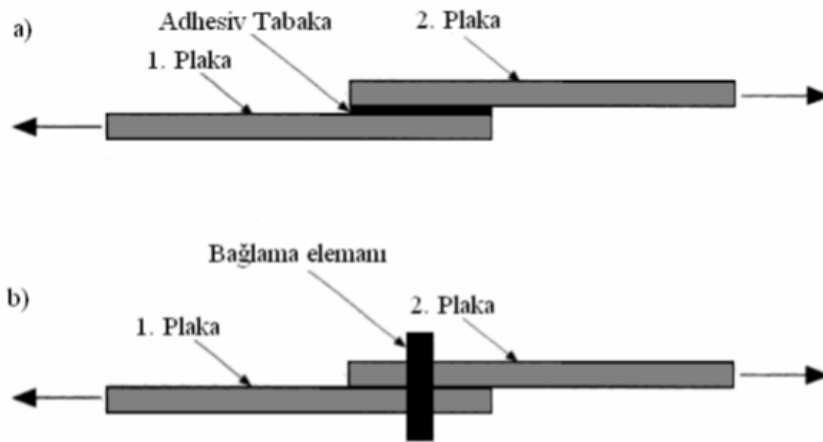
- Tabakalı kompozit malzeme üzerine etki eden yükleri farklı katmanlarında sahip olduğu farklı takviye açılarından dolayı daha kolay taşır.
- Bağıl olarak düşük bir tokluk değerine sahiptirler.
- Farklı tabaka dizilimleri ile gerilme yığılmalarına karşı oldukça mukavemetlidirler.
- Korozyona karşı dayanıklıdır.
- Isı, elektrik ve ses yalıtımı için uygun malzemelerdir.
- Isı iletim katsayıları düşüktür.

Kompozit malzemelerin yapılarda kullanılması için yapıyı oluşturan elemanlar ile birbirlerine bağlanmaları gereklidir [34]. Kompozit malzemelerin birleştirilmesi terimi genellikle iki kompozit bileşenin birbiri ile ya da kompozit olmayan başka herhangi bir malzeme ile birleştirilmesi işlemidir [47]. Kompozit malzemelerin birleştirilmesi alışılmış metalik malzemelerin birleştirilmesinden mekanik davranışlarındaki farklılıklarından dolayı zor bir işlemdir. Tüm birleştirme işlemleri kompozitler için potansiyel birer zayıf nokta teşkil ederler. Sonuç olarak istenmeyen bir durum olan gerilme yığılmalarının kompozitlerin birleştirildikleri noktalarda ortaya çıkıyor olması kompozit malzemelerin birleştirilme probleminin önemini göstermektedir.

Temel olarak kompozit malzemelerin birleştirilmesinde iki farklı yöntem kullanılmaktadır.

1. Çözülebilir (mekanik) birleştirmeler.
2. Adhesiv yapıştırıcılar ile (çözülemeyen) birleştirmeler.

Şekil 1.11’ de kompozit malzemelerin farklı birleştirilme şekilleri temsil edilmiştir. Tabakalı kompozit yapılarda hasar modellemesi malzemenin sahip olduğu farklı mekanik davranışlardan dolayı oldukça zordur [32-33]. Bunun yanı sıra çözülebilir bağlantılar ile bir araya getirilmiş tabakalı kompozit malzemelerde bağlama elemanlarının montajında için gerekli olan delikler açıldığı için gerilme yığılmaları ortaya çıkmaktadır. Kompozit malzemelerin bağlanması işlemi yapıldığı zaman yapıya gelen yükler bağlama elemanları aracılığı ile bir plakadan diğerine aktarılırlar. Bu nedenle bağlantının yapılmış olduğu noktada meydana gelen gerilme yığılmaları karmaşık bir gerilme durumu olarak ortaya çıkmaktadır [27].



Şekil 1.11. Tabakalı kompozit malzemelerin bağlantı şekilleri. a) çözülemeyen (yapıştırırmalı) bağlantı, b) tek tesirli çözülebilir bağlantı.

Her iki birleştirme tipinin kendi içerisinde çeşitli avantaj ve dezavantajları vardır. Çözülebilir bağlantıların avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- Mekanik bağlantılar tamirat gerektiren yerlerde birleştirilmiş parçaları yerinden sökmek gerektiği durumlarda kolayca çözülürken yapıştırma bağlantıları genellikle bağlanan parçaya zarar vermektedir.
- Çözülebilir bağlantılar ortam koşullarındaki yüksek verimli kimyasal bir ortamdan çok fazla etkilenmezken, yapıştırma bağlantıları genelde yapıştırıcılar kimyasal içerikli malzemeler olduğu için çözülebilirler.
- Çözülebilir bağlantılar ortam sıcaklığının aşırı yükselmesinden veya düşmesinden çok fazla etkilenmezken, yapıştırıcılar genellikle sıcaklığa duyarlı malzemelerdir.
- Çözülebilir bağlantıların yüksek yorulma ömürleri vardır.
- Birleştirilecek parçalarda kalınlık sınırı yoktur.
- Birleştirme işlemi hızlı olarak ve çok fazla teknik bilgi gerektirmeden yapılabilir.
- İşçiliği ve uygulama malzemeleri oldukça ucuz ve yaygındır.

Çözülebilir birleştirmelerin dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

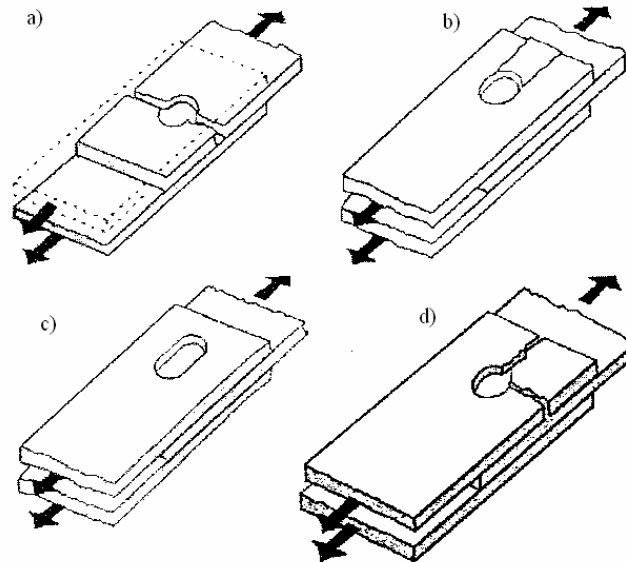
- Çözülebilir birleştirmelerin yapılabilmesi için kullanılan bağlantı elemanı sisteme fazladan yük getirir.
- Bağlantı yapılabilmesi için gerekli olan delik açma işlemi kesitte zayıflamaya ve gerilme yığılmalarına sebep olur.
- Ulaşılması güç olan tamirat gerektirmeyecek yerlerde kullanılması maliyet yükseltmektedir.
- Aşırı titreşimli sistemlerde yapıştırma bağlantılarının kullanılması çözülme riskine karşı daha emniyetlidir.

Bağlantı türü gerekli emniyet hesaplamaları yapılarak seçilmektedir. Çözülebilir bağlantılarda tek tesirli ve çift tesirli olmak üzere iki şekilde yapılabilmektedir. Çift tesirli bağlantılarda tabakalı kompozit yapıda çekme gerilmeleri ile birlikte eksantriklikten dolayı eğilme momenti de etki etmektedir. Bu nedenle tek tesirli çözülebilir bağlantıların mukavemeti çift tesirli bağlantılara göre % 20 daha düşüktür. Bu nedenle tek tesirli mekanik bağlantılarda birden çok bağlama elemanı kullanılması gerekmektedir [28].

Çözülebilir bağlantılarda kompozit plakaya uygulanan yük bağlama elemanı aracılığı ile diğer plakaya veya plakalara aktarılmaktadır. Bağlama elemanı olarak pim, perçin veya cıvata

kullanılmaktadır [29]. Her üç bağlama elemanının ortak özelliği, birleştirme işlemi için kompozit plaka üzerine açılmış olan deliğin iç kısmına basınç uygulamalarıdır. Bu nedenle de en genel bağlantı türü olarak pim bağlantıları çözülebilir bağlantılı kompozit plakaların mekanik davranışlarının analizinde araştırma konusu olmaktadır [30]. Şekil 1.12’de çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda oluşması muhtemel hasar tipleri görülmektedir [31]. Bu hasar tipleri çeşitli parametrelere bağlı olarak açıklanabilmektedir.

- a. Kompozit malzeme bileşenlerinin etkisi: Takviye malzemesinin türü ve yapısı (tekyönlü, örgülü, kırılmış, rastgele dağılımlı vb.), matriks malzemesi (reçine esaslı, plastik esaslı vb.)
- b. Kompozit malzeme türünün etkisi: Tabakalı kompozit malzeme (simetrik veya anti simetrik dizilime sahip olması, farklı fiber takviye açılarına sahip tabakaların olması vb.), termoplastik, toz malzemelerden sıkıştırılmış vb.
- c. Bağlantı geometrisinin etkisi: Bağlantı elemanının montajının yapılacağı deliğin plakanın kısa kenarına olan mesafesinin oranı, plaka genişliğinin delik çapına oranı, plaka uzunluğu ve plaka kalınlığı.
- d. Bağlantı tasarım tipinin etkisi: Tek tesirli veya çift tesirli bağlantının olması, farklı bağlantı elemanları kullanılmış olması (civata, perçin veya pim), çekme, basma veya kayma zorlanmaları, yayılı yükleme, moment etkisi gibi konstrüktif zorunluluklardan kaynaklanan etkiler.



Şekil 1.12. Çözülebilir bağlantılı kompozit plakalarda görülmeleri muhtemel hasar tipleri, (a- yırtılma hasarı, b- kesme hasarı, c- ezilme hasarı, d- yırtılma + kesme hasarı).

Hasar tipleri incelendiği zaman meydana gelen hasar için iki farklı durum vardır. Birincisi delik kenarında kalan kesit yükleme için fazla küçüktür, ikincisi ise tek yönde takviyeli kompozit yapılarda fiber takviye açısının yükleme doğrultusuna tam dik olması halinde bu hasar tipi görülebilir. Yırtılma hasarı durumu için hasara neden olan gerilmeler aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$(\sigma_y)_{max} = \frac{P_{max}}{(W-D).t} \quad (1.1)$$

Şekil 1.12.b’ de görülen kesme hasarı durumu genellikle (E/D) oranının bir veya bire yaklaştığı durumlarda görülmektedir. Kesme hasarına neden olan gerilmeler aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilmektedir.

$$(\sigma_e)_{max} = \frac{P_{max}}{D.t} \quad (1.2)$$

Şekil 1.12.c’deki ezilme hasarı görülmesi durumu emniyetli çalışma açısından uygun olan ve özellikle izotrop malzemelerde görülen bir hasar türü olmasına karşın fiber takviyeli tabakalı kompozitlerde delik içerisindeki gerilmelerden dolayı ezilmiş olan matriks malzemesi içerisinde yer alan ve hasara uğramayan fiberlerin ezilerek bağlama elemanının önünde bir yatak vazifesi görmesi ile yüklemelerin artmasına rağmen kopma türünde bir hasarın görülmemesi halidir. Hasar yükleri hesaplanırken 1.2 bağıntısı kullanılmaktadır.

1.1 ve 1.2 numaralı bağıntılarda; $(\sigma_y)_{max}$ (MPa); yırtılma hasarına neden olan maksimum gerilmeyi, $(\sigma_e)_{max}$ (MPa); Kesme veya yırtılma hasarına neden olan maksimum gerilmeyi, P_{max} (N); plakaya uygulanan yükü, W (mm); plaka genişliğini, D (mm) ; plaka üzerine açılmış delik çapını, t (mm); plakanın kalınlığını göstermektedir.

Şekil 1.12.d’de ise kesme ve yırtılma hasarının aynı anda gerçekleşmiş olması yüklemelerin eksantrikliğinden, iki eksen den farklı yükleme durumundan veya fiber takviye açısından dolayı ortaya çıkmaktadır.

1.8. Kompozit Malzemelerin Mekanik

Kompozit yapıların mukavemetlerinin belirlenmesi ve gerilme analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle kompozit malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntısının incelenmesi gerekmektedir. Tabakalı kompozitlerin mekanik davranışlarının bilinmesi, fiber-takviyeli tabakaların anlaşılması açısından da önemlidir. Bu anlamda

izotropik malzemeler kadar anizotropik ve ortotropik malzemeler içinde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları önemlidir.

1.8.1. Kompozit Malzemelerin Gerilme Analizi

1.8.1.1. Anizotropik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme bağıntıları

Bütün doğrultulardaki özellikleri birbirinden farklı olan malzemeler anizotropik malzemeler olarak bilinir. Bu malzemelerin en genel halidir. Anizotropik malzemeler için genelleştirilmiş Hooke Kanunu gerilme-şekil değiştirme bağıntısı;

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (1.3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada σ_i gerilme bileşeni, C_{ij} rijitlik matrisi ve ε_j ise şekil değiştirme tansörüdür.

Normal ve açılmal şekil değiştirme bileşenleri;

$$\varepsilon_1 = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_2 = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_3 = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (1.4)$$

$$\gamma_{23} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{31} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \gamma_{12} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \quad (1.5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada u, v, w fonksiyonları sırası ile x, y, z doğrultusundaki deplasmanlardır. 36 bağımsız elemana (sabite) sahip olan Rijitlik matrisi elastik malzemeler için birbirinden bağımsız otuzaltıdan daha az sabit ile ifade edilebilir. Bunun için şekil değiştirme enerji yoğunluğu fonksiyonunu ele almak gerekir. Elastik potansiyeli mevcut elastik malzemelerde $d\varepsilon_i$ kadar şekil değişikliği meydana getirdiğinde, bu şekil değişimi elastik malzemenin birim hacim elemanı içinde dW kadar bir şekil değiştirme enerjisinin meydana gelmesine sebep olur.

$$dW = \sigma_i d\varepsilon_i \quad (1.6)$$

$$dW = C_{ij} \varepsilon_j d\varepsilon_i \quad (1.7)$$

Birim hacim elemanı için şekil değiştirme enerjisi bulunur. Bu ifadenin integrali alındığında ;

$$W = \frac{1}{2} C_{ji} \varepsilon_i \varepsilon_j \text{ elde edilir. (Burada } C_{ij}=C_{ji} \text{ 'dir)} \quad (1.8)$$

Genelleştirilmiş Hooke kanunu üç boyutlu bir cisim için şu şekilde yazılabilir;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{14} & C_{24} & C_{34} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{15} & C_{25} & C_{35} & C_{45} & C_{55} & C_{56} \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & C_{46} & C_{56} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.9)$$

Triklinik malzemeler için elastiklik matrisi 21 bağımsız sabit içerir.

Tek bir simetri düzlemine sahip (x_1 ve x_2)olan malzemelerde rijitlik matrisi 13 bağımsız elemanla ifade edilebilir. Bu tür malzemeler “mono klinik malzemeler” adı ile anılırlar. Monoklinik malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ifadesi (1.9) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.10)$$

Tek yönlü elyaf takviyeli kompozit tabakalarda tüm elyafların birbirine paralel olduğu kabul edilirse, bu tür malzemelerin ortotropik malzeme olduğu söylenebilir. Ortotropik malzemelerde birbirlerine dik doğrultuda üç eksenle simetrik malzeme özelliği mevcuttur. 9 bağımsız eleman ile tanımlanırlar. Bu malzemeler için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi şu şekilde ifade edilmektedir [20, 22].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.11)$$

(1.11) nolu eşitlikte $[C]$ rijitlik matrisini ifade etmektedir. x, y simetri düzlemine sahip bir malzemede rijitlik matrisi 5 bağımsız sabit içerir. Bu malzemeye “transversely izotropik” malzeme denir ve (1.12) nolu eşitlik ile ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.12)$$

Eğer malzemede sonsuz sayıda simetri düzlemi mevcut ise rijitlik matrisi, iki bağımsız sabitle ifade edilebilir. Bu duruma uyan malzemelere ise “izotropik malzemeler” denir ve (1.13) nolu eşitlik ile tanımlanır [20].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (C_{11} - C_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.13)$$

1.8.1.2. Ortotropik malzemelerde gerilme-şekil değiştirme bağıntıları

Ortotropik elastik malzemede mühendislik sabitlerinin bulunabilmesi için; bilinen bir yük veya gerilme yardımıyla gerçekleştirilen basit çekme ve kayma deneyleri yapılır. Yapılan deneylerin sonuçları değerlendirildiğinde malzemenin “E” elastisite modülü ile “G” kayma modülü tespit edilebilir. Ayrıca deney sonuçları “ S_{ij} ” elastiklik matrisinin ve “ C_{ij} ” rijitlik matrisinin elemanlarının E ve G’ ler cinsinden tanımlanmasını sağlar.

Ortotropik bir malzeme için elastiklik matrisi;

$$\{S_{ij}\} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{31}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

şeklinde ifade edilir. Buradaki $[S_{ij}]$ elastiklik matrisi, $[C_{ij}]$ rijitlik matrisinin tersidir. Ortotropik bir malzeme için rijitlik matrisi elemanları mühendislik sabitleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta}, & C_{12} &= \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta} \\ C_{13} &= \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta}, & C_{22} &= \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} \\ C_{23} &= \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta}, & C_{33} &= \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta} \\ C_{44} &= G_{23}, & C_{55} &= G_{31}, & C_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (1.15)$$

Burada Δ ;

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{31}\nu_{13} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3} \quad (1.16)$$

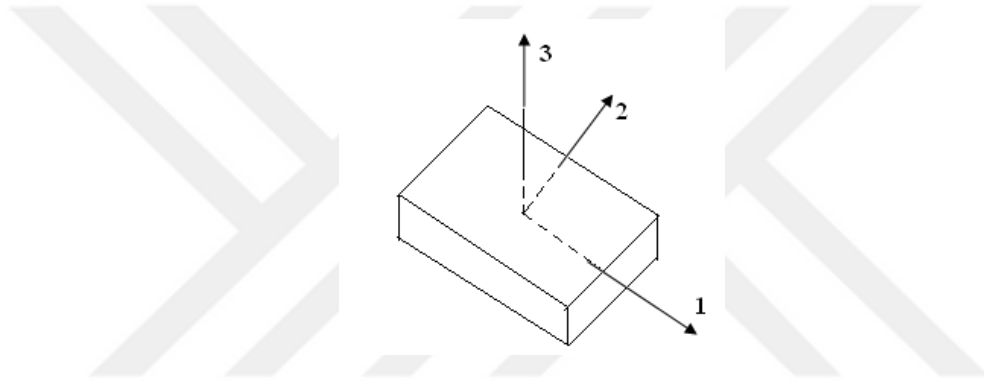
eşitliği ile ifade edilir.

Herhangi bir elastik malzemede düzlem halini ifade etmek için üç eksenli gerilme hali ile ilgili tanımlarda ve denklemlerde üçüncü düzlemle ilgili gerilmelerin sıfır alınması gerekli ve yeterlidir.

İnce cidarlı ortotropik kompozit levhalarda eğer düzlem dışında kuvvet uygulanmıyorsa, düzlemsel gerilme durumu söz konusudur. Şekil 1.13’ de görüldüğü gibi 1-2 düzlemi ile düzlem gerilme durumu tanımlanabilir ve yukarıdaki bağıntılarda;

$$\sigma_3 = 0, \quad \tau_{23} = 0, \quad \tau_{31} = 0 \quad (1.17)$$

değerleri göz önüne alınırsa, ortotropik kompozit malzemelerde düzlem gerilme hali için gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şöyle yazılabilir.



Şekil 1.13. Tek yönlü takviyeli plaka.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.18)$$

Elastiklik matrisi elemanları mühendislik sabitleri cinsinden ifade edilirse;

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_1} \\ S_{12} &= -\frac{\nu_{12}}{E_1} = -\frac{\nu_{21}}{E_2} \\ S_{22} &= \frac{1}{E_2} \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Bağıntı (1.18)' deki şekil değiştirme-gerilme ifadesine benzer şekilde, gerilme-şekil değiştirme ifadesi ise Q_{ij} matrisi kullanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.20)$$

Burada Q_{ij} rijitlik matrisidir. Rijitlik matrisi elemanları, elastik matrisi $[S_{ij}]$ elemanları cinsinden,

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{S_{22}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{12} &= -\frac{S_{12}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{22} &= \frac{S_{11}}{S_{11}S_{22} - S_{12}^2} \\ Q_{66} &= \frac{1}{S_{66}} \end{aligned} \quad (1.21)$$

şeklinde yazılabilir. Bu rijitlik matrisi elemanları ayrıca, mühendislik sabitleri cinsinden ise aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{12} &= \frac{\nu_{12}E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{22} &= \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \\ Q_{66} &= G_{12} \end{aligned} \quad (1.22)$$

Rijitlik matrisi elemanları ortotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için dört bağımsız mühendislik sabiti ile ifade edilir. İzotropik malzemelerde düzlem gerilme hali için şekil değiştirme –gerilme bağıntısı,

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{11} & 0 \\ 0 & 0 & 2(S_{11} - S_{12}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.23)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E} \\ S_{12} &= -\frac{\nu}{E} \end{aligned} \quad (1.24)$$

şeklindedir.

Gerilme-şekil değiştirme bağıntısı ise;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.25)$$

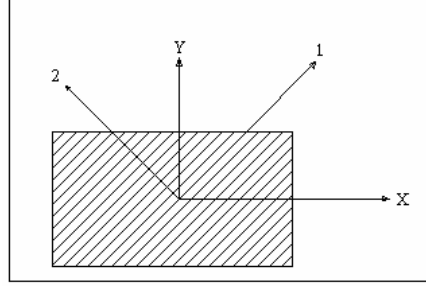
şeklinde yazılır. Burada matris elemanları Q_{ij} 'ler;

$$\begin{aligned} Q_{11} &= \frac{E}{1-\nu^2} \\ Q_{12} &= \frac{\nu E}{1-\nu^2} \\ Q_{66} &= \frac{E}{2(1+\nu)} = G \end{aligned} \quad (1.26)$$

şeklinde ifade edilir [20].

1.8.1.3. Fiber takviye açısının gerilme – şekil değiştirme bağıntılarına etkisi

Tabakalarda kullanılan koordinat sisteminde 1 nolu yön takviye elemanının (elyaf) yönünü, 2 nolu yön ise takviye elemanına dik olan yönü gösterir. x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi açılı tabakalarda çakışmaz.



Şekil 1.14. Tabakalarda koordinat sisteminin gösterimi.

Bu durumda x-y koordinat sistemi ile 1-2 koordinat sistemi arasındaki bağıntı dönüşüm matrisi ile aşağıda belirtildiği gibi sağlanır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.27)$$

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.28)$$

Burada $[T]$ dönüşüm matrisi şu şekilde ifade edilmektedir.

$$[T] = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2nm \\ n^2 & m^2 & -2nm \\ -nm & nm & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (1.29)$$

$$[T]^{-1} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2nm \\ n^2 & m^2 & 2nm \\ nm & -nm & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (1.30)$$

Burada m ve n değerleri, $m; \cos\theta$, $n; \sin\theta$ şeklinde tanımlıdır.

$$[R] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (1.31)$$

Reuter matrisi $[R]$ dikkate alındığında şekil değıştirme bileşenleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \frac{\gamma_{12}}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.32)$$

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [R] \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \end{Bmatrix} \quad (1.33)$$

İzotrop malzemeler için gerilme-şekil değıştirme bağıntısı (1.25) nolu eşitliği ile;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.25)$$

tanımlanmıştı. Rijitlik matrisi için $[Q]$ notasyonu kullanılırsa, yukarıdaki eşitlik,

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [Q] \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (1.35)$$

Şeklinde yazılabilir. x-y koordinat eksen takımında gerilme-şekil değıştirme bağıntısı ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir [20].

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = [T]^{-1} [Q] [R] [T] [R]^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.36)$$

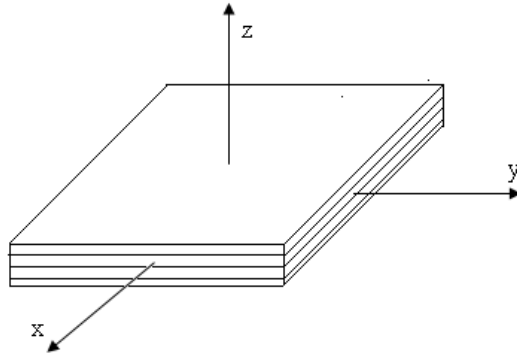
1.8.1.4. Tabakalı kompozit malzemelerde gerilme analizi

Tabakalı kompozit malzemelerin gerilme analizleri izotrop malzemeler için yazılmış olan klasik tabaka teorisi kullanılarak gerekli eşitliklerin kompozit malzemelere uyarlanması

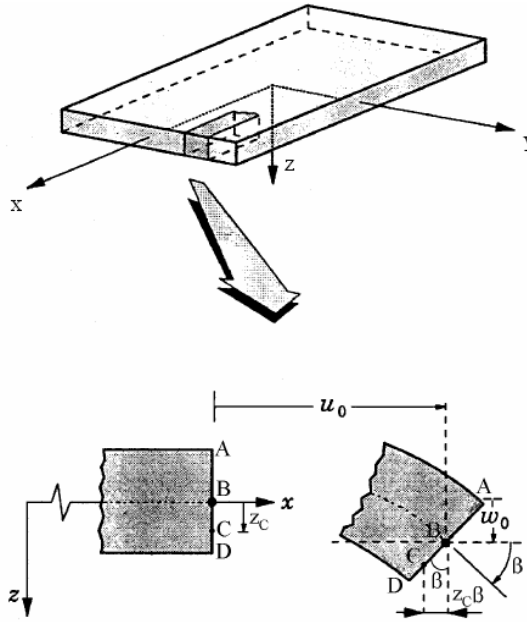
ile yapılmaktadır. Belirli veya keyfi oryantasyona göre dizilmiş tabakaların birleşimiyle bir plaka oluşmaktadır. Her bir tabakanın asal malzeme eksenleri 1,2, 3, x, y ve z eksenine göre keyfi olarak herhangi bir açı değerinde seçilebilir (Şekil 1.15). Kalınlık doğrultusundaki kayma şekil değiştirme bileşenleri;

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \text{ 'dır.} \quad (1.37)$$

Bunun yanı sıra şekil değiştirmelerden ε_z ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Sonuç olarak; plakada Kirchoff deformasyon hipotezinin tanımlanmış olduğu görülmektedir. Bu hipoteze göre orta düzleme dik olan doğrultular deformasyon sonrasında da bu düzleme dik olarak kalmaktadır [20, 23].



Şekil 1.15. Plaka koordinat sistemi.



Şekil 1.16. xz düzlemindeki deformasyonun geometrisi [67].

Şekil 1.15' den de görüldüğü gibi Kirchoff hipotezine göre tabakanın kesit alanı x-z düzleminde. Bu durumda B noktasının deforme olmuş ortadaki yüzeyden deformasyona uğramamış olan noktaya olan x yönündeki yer değiştirmesi U_0 olarak alınacaktır. ABCD çizgisinin deformasyon sonrasında düz kalması durumunda x yönündeki yer değiştirmesi [20];

$$u_c = u_0 - z_c \beta \quad (1.38)$$

Şeklinde yazılır. Eşitlikteki β parametresi deformasyon sonrasında ABCD olarak gösterilmiş olan çizgiye ait olan tabakanın orta yüzeyinin x doğrultusundaki eğimidir. Bu eğim aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (1.39)$$

β parametresi, benzer şekilde x ve y doğrultularındaki yer değiştirmeler içinde ifade edilir ve buradan da, yer değiştirmeler ve şekil değiştirmeler aşağıdaki gibi ifade edilirler.

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x}; \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow \varepsilon_x = \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (1.40)$$

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y}; \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \Rightarrow \varepsilon_y = \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \quad (1.41)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \Rightarrow \gamma_{xy} = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \quad (1.42)$$

Tabakalardaki şekil değiştirme, matris şeklinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.43)$$

Burada; orta yüzeydeki şekil değiştirmeler ve eğrilikler aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{Bmatrix} \text{ ve } \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ 2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{Bmatrix} \quad (1.44)$$

Buradan tabakaya ait gerilme-şekil değıştirme bağıntısı ise aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

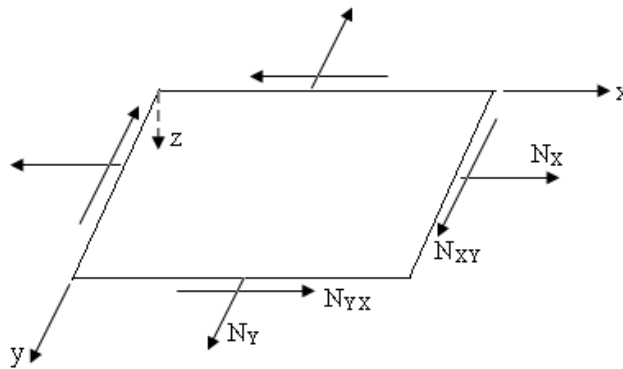
$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + z \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.45)$$

Plaka üzerinde meydana gelen bileşke kuvvet ve momentler, her bir tabaka için global gerilmelerin integrali yoluyla veya plaka kalınlığı yoluyla elde edilmektedir.

$$N_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x dz \quad (1.46)$$

$$M_x = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x z dz$$

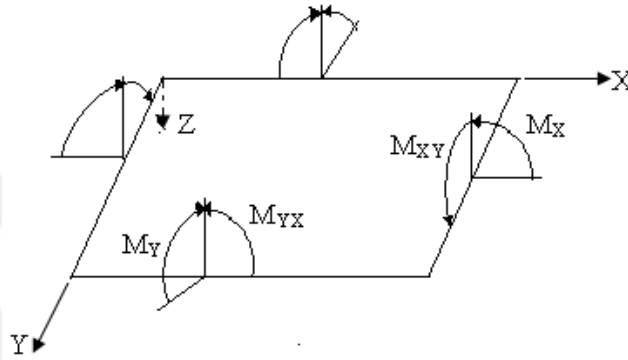
N_x ; birim uzunlukta bileşke kuvvet ve M_x birim uzunlukta bileşke moment olarak ifade edilmekte olup, aşağıdaki Şekil 1.17' de gösterilmektedir [20].



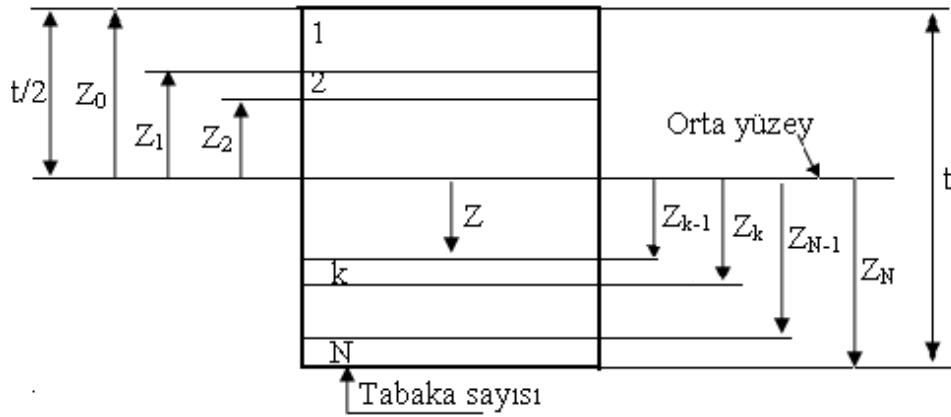
Şekil 1.17. Düzlem plakaya etki eden kuvvetler.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k dz \quad (1.47)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_k z dz \quad (1.48)$$



Şekil 1.18. Düzlem plakaya etki eden momentler.



Şekil 1.19. N tabakalı plakanın geometrisi.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z dz \right\} \quad (1.49)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}_k \left\{ \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} z^2 dz \right\} \quad (1.50)$$

ε_x^0 , ε_y^0 , γ_{xy}^0 , K_x , K_y ve K_{xy} z terimine bağılı büyüklükler olmadığı için ifadenin dışına alınarak denklemler düzenlenirse tüm sisteme ait komple direngenlik matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.51)$$

$$\begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{Bmatrix} \quad (1.52)$$

Burada; A, B, D terimleri aşağıdaki eşitliklerde belirtilmiştir [20].

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \left(\bar{Q}_{ij} \right)_k (Z_k - Z_{k-1}) \quad (1.53)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \left(\bar{Q}_{ij} \right)_k (Z_k^2 - Z_{k-1}^2) \quad (1.54)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \left(\bar{Q}_{ij} \right)_k (Z_k^3 - Z_{k-1}^3) \quad (1.55)$$

1.8.2. Kompozit Malzemeler İçin Hasar Kriterleri

Bir malzemenin gerilmesi ve bunun sonucu olarak akması veya kırılması ile ilgili deneysel sonuçlar genellikle tek eksenli gerilme durumlarını içeren çalışmalarla tespit edilirler. Fakat gerçek kullanma sahalarında malzemelerde bir üç eksenli gerilme durumunun veya en azından iki eksenli gerilme halinin mevcut olduğu görülmektedir. Kırılma teorilerinde malzemenin ortotropik olmasının yanında homojen bir yapıya sahip olması beklenir. Bunun yanında belli şartlar altında çalışan malzemelerin mukavemetini etkileyen önemli unsurlardan biri malzemelerin dayanım sınırıdır. Uygulanan yüklerin malzemenin dayanım sınırını aşması durumunda malzemede hasar meydana gelmektedir. Bu hasarın göz önüne alınarak emniyetli

çalışma için gerekli şartların belirlenmesi önemlidir. Bunun için yapılan deneylerle malzemeye ait mekanik özellikler tespit edilerek mukavemet sınırları belirlenmektedir. Sayısal olarak hasar yüklerinin tespit edilmesi ve hasarın oluşum şeklini modelleyebilmek için çeşitli hasar teorileri öne sürülmüştür. Bu teorilerin esas amacı malzemenin hasara uğrayacağı gerilmelerin önceden tespit edilmesini sağlayarak yükleme sınırlarını tespit edebilmektir. Hasar teorileri genellikle dört grupta toplanmaktadır [22].

- 1- Maksimum gerilme teorisi
- 2- Maksimum şekil değiştirme teorisi
- 3- Tsai-Hill hasar kriteri
- 4- Tsai-Wu hasar kriteri

1.8.2.1 Maksimum gerilme teorisi

Takviye eksenlerindeki gerilmeler o eksenlere ait olan akma gerilmelerinden karşılıklı olarak küçük olduğunda bu ortotropik malzeme üzerine uygulanan gerilmeleri taşıyabilir [46]. Aksi taktirde malzeme üzerine uygulanan gerilmeler takviye istikametlerindeki akma gerilmelerinden herhangi birini geçecek şekilde olduğu zaman akma veya kırılma başlar. Yani malzemenin asal eksenleri doğrultusundaki gerilme bileşenlerinin, o doğrultudaki malzeme dayanım değerlerini aşması halinde hasar oluşmaktadır.

$$\begin{aligned} \sigma_1 &< X_t \\ \sigma_2 &< Y_t = \text{Çekme} \\ |\tau_{12}| &< S \end{aligned} \quad (1.56)$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 &> X_c = \text{Basma} \\ \sigma_2 &> Y_c \end{aligned} \quad (1.57)$$

Burada 1 ve 2 eksenleri malzemenin takviye durumuna bağlı olarak asal takviye eksenlerini, X_t , Y_t çeşitli gerilmelere karşı bu eksenlerde meydana gelen çekme gerilmelerini; X_c , Y_c de bu eksenlerdeki basma gerilmelerini göstermektedir [20, 24].

1.8.2.2. Maksimum şekil değiştirme teorisi

Kompozit tabakada 1-2-3 eksenlerinde normal ve kayma şekil değiştirmeleri, aşağıda verilen durumları sağladığı takdirde kompozit malzemede hasar oluşmaz [19, 21, 25].

$$-\epsilon_1^C < \epsilon_1 < \epsilon_1^T$$

$$\begin{aligned}
-\varepsilon_2^C &< \varepsilon_2 < \varepsilon_2^T \\
-\varepsilon_3^C &< \varepsilon_3 < \varepsilon_3^T \\
-\gamma_{12}^F &< \gamma_{12} < \gamma_{12}^F \\
-\gamma_{23}^F &< \gamma_{23} < \gamma_{23}^F \\
-\gamma_{13}^F &< \gamma_{13} < \gamma_{13}^F
\end{aligned} \tag{1.58}$$

1.8.2.3. Tsai-Hill hasar kriteri

Tsai-Hill Hasar teorisi, izotropik malzemeler için geliştirilmiş Von-Mises teorisinin anizotropik malzemelere uyarlanmış seklidir.

$$\begin{aligned}
&(G + H)\sigma_1^2 + (F + H)\sigma_2^2 + (F + G)\sigma_3^2 - 2H\sigma_1\sigma_2 - 2G\sigma_1\sigma_3 - \\
&2F\sigma_2\sigma_3 + 2L\tau_{23}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{12}^2 = 1
\end{aligned} \tag{1.59}$$

Terimlerin hesaplanması için çeşitli gerilmelerin sistemde bulunma şartlarının sağlanması gereklidir [20, 22, 24].

$$\begin{aligned}
2N &= \frac{1}{S^2} \\
G + H &= \frac{1}{X^2} \\
F + H &= \frac{1}{Y^2} \\
F + G &= \frac{1}{Z^2} \\
2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \\
2G &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \\
2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2}
\end{aligned} \tag{1.60}$$

1.8.2.4. Tsai-Wu hasar kriteri

Tsai-Wu hasar teorisi kompozit malzemelerin gerilme analizlerinde en çok kullanılan teorilerden biridir. Bu teoride anizotropik malzemeler için aşağıdaki eşitliği akma olarak tanımlanmıştır.

$$F_i \sigma_i + F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1 \quad (i, j = 1, \dots, 6) \quad (1.61)$$

İki eksenli gerilme hali için bu eşitlik;

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + F_6 \sigma_6 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_{66} \sigma_6^2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 = 1 \quad (1.62)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlikteki F değerleri;

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} \\ F_{11} &= \frac{-1}{X_t X_c} \\ F_2 &= \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \\ F_{22} &= \frac{1}{Y_t Y_c} \\ F_6 &= 0 \\ F_{66} &= \frac{1}{S^2} \end{aligned} \quad (1.63)$$

şeklinde tanımlanırlar. Bu değerler (1.62) nolu eşitlikte yerine konulduğunda; F_{12} 'de;

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2} \left[1 - \left(\frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c} + \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c} \right) \sigma + \left(\frac{1}{X_t Y_c} + \frac{1}{Y_t Y_c} \right) \sigma^2 \right] \quad (1.63)$$

şeklinde tanımlanmaktadır [19, 20, 24].

1.9. Kompozit Bir Tabakada Fiber Matriks Gerilme Analizi

Fiber takviyeli kompozitler fiber ve fiberi saran matriks malzemesinden oluşurlar. Fiber ile matriksin bir bütün oluşturabilmesi için aralarında mekanik bağ olması gerekir. Fiber – matriks arayüzeyi bu iki malzeme arasındaki bağı teşkil etmektedir [43]. Arayüzey bazı kompozitlerde matriks, fiber ve fiber kaplamasının reaksiyonundan elde edilen malzeme bileşenlerinin oluşturduğu bir tabakadır [45]. Metal matriksli kompozitlerde arayüzey erimiş matriks ile fiberin kimyasal reaksiyonu sonucunda sıvı matriksin fiberin dış yüzeyinden difzyonu ile ortaya çıkan bir malzemedir. Fiber ve matris malzemelerin özellikleri belli iken bunların birleştirilmesiyle oluşturulmuş, ortotropik karakter gösteren bir kompozit tabakanın elastik malzeme sabitleri belli iken, kompozit levhanın E_1 , E_2 , G_{12} , V_{12} değerleri teorik olarak belirlenebilir [44]. E_f ; Elyaf (Fiber) malzemesinin elastisite modülünü, E_m ; Matris

malzemesinin elastiklik modülünü, ν_m ; Matris malzemesinin poisson oranını, V_f ; Fiber hacimsel konsantrasyon oranını ifade eder. Fiber ve matris hacim oranları arasındaki bağıntı;

$$A = A_f + A_m \rightarrow AL = A_f L + A_m L \rightarrow \frac{AL}{AL} = \frac{A_f L}{AL} + \frac{A_m L}{AL} \rightarrow 1 = \frac{A_f}{A} + \frac{A_m}{A}$$

$$V_m = 1 - V_f \quad (1.64)$$

şeklinde tanımlanır. A ; Kompozitin elyafa dik kesit alanını, A_f ; Elyaf kesit alanını, A_m ; Matris kesit alanı, AL ; Kompozitin hacmini, $A_f L$; Elyaf hacmini, $A_m L$; Matris hacmini ifade etmektedir.

$$E_1 = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1.65)$$

$$\varepsilon_2 = V_f \frac{\sigma_2}{E_f} + V_m \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (1.66)$$

$$\nu_{12} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (1.67)$$

Fiber hacim oranı ve matris hacim oranları (1.68) ve (1.69) bağıntılarından elde edilir.

$$V_f = \frac{\text{Fiber hacmi}}{\text{Kompozit hacmi}} = \frac{W_f L.t}{W L.t} = \frac{W_f}{W} \rightarrow W_f = V_f \cdot W \quad (1.68)$$

$$\nu_{12} = V_m \nu_m + V_f \nu_f \quad (1.69)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m} \quad \text{veya} \quad G_{12} = \frac{G_m G_f}{V_m G_f + V_f G_m} \quad (1.70)$$

1.10. Kompozit Yapıdaki Gerilmeler

Tek yönlü takviye edilmiş kompozit malzemeler, matris ve fiberin tokluğuna veya kırılma gerilimine bağlı olarak yükün artmasıyla birlikte dört aşamada deforme olurlar.

- Elyaf ve matris elastik şekil değiştirirler.
- Elyaf elastik şekil değiştirmeye devam ederken, matris plastik şekil değiştirir.
- Hem elyaf hem de matris plastik şekil değiştirirler.
- Elyafın kırılmasına müteakiben, matris kırılmasa bile kompozitin de kırıldığı kabul edilir.

Bu adımlardan bazıları kompozit bileşenlerinin yapılarına (gevreklik-süneklik) bağlı olarak oluşmayabilir. Herhangi bir anda kompozitteki gerilme (σ_1) (1.71) bağıntısından elde edilir.

$$\sigma_1 = V_f \sigma_f + V_m \sigma_m \quad (1.71)$$

Fiberin kopma mukavemeti (1.72), fiber kırılırken matristeki gerilme (1.73), fiber kırılırken kompozitteki gerilme (1.74) bağıntısı ile hesaplanır.

$$\sigma_{fmax} = \varepsilon_{fmax} E_f \quad (1.72)$$

$$(\sigma_m)_{\varepsilon_{fmax}} = \varepsilon_{fmax} E_m \quad (1.73)$$

$$\sigma_{Cmax} = V_f \sigma_{fmax} + V_m (\sigma_m)_{\varepsilon_{fmax}} \quad (1.74)$$

Elyaf takviyeli kompozitlerde takviye etkisinin gerçekleşmesi ve fiberlerin yük taşıyabilmesi için aşılması gereken minimum bir elyaf hacim oranı vardır. Bu oranın altında, fiberler yüklemekten sonra hemen kopar ve yükü sadece matris taşır. Dolayısıyla böyle bir takviyenin hiçbir yararı olmayacağı gibi kuvveti taşıyacak olan matris kesitini azalttığından mukavemetin düşmesine neden olur. Malzeme dayanımının en düşük olduğu noktadaki elyaf hacim oranı V_{f-min} ile gösterilir. Herhangi bir anda kompozitteki gerilme;

$$\sigma_1 = V_f \sigma_f + V_m \sigma_m \quad (1.75)$$

Fiberin koptuğu anda kompozitteki gerilme mukavemeti;

$$(\sigma_C)_{max} = V_f (\sigma_f)_{max} + (1 - V_f) (\sigma_m)_{\varepsilon_{fmax}} \quad (1.76)$$

Lifler hemen koparsa, bundan sonra herhangi bir anda kompozitteki gerilme;

$$\sigma_1 = V_m \sigma_m = (1 - V_f) \sigma_m \quad (1.77)$$

Bu durumda kompozitin mukavemeti;

$$(\sigma_C)_{max} = (1 - V_f) (\sigma_m)_{max} \quad (1.78)$$

bağıntılarından elde edilir. Kompozit mukavemeti $(\sigma_C)_{max}$ her iki hal için eşitlenirse, yükü liflerin taşıdığı veya taşımadığı sınır durum elde edilir.

$$(\sigma_C)_{max} = (1 - V_f) (\sigma_m)_{max} = V_f (\sigma_f)_{max} + (1 - V_f) (\sigma_m)_{\varepsilon_{fmax}} \quad (1.79)$$

$$V_f = V_{fmin} = \frac{(\sigma_m)_{max} - (\sigma_m)_{\varepsilon_{fmax}}}{(\sigma_f)_{max} + (\sigma_m)_{max} - (\sigma_m)_{\varepsilon_{fmax}}} \quad (1.80)$$

$$V_{fmin} = \frac{E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}}{E_f \varepsilon_{fmax} + E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}} \quad (1.81)$$

Fiberlerin matris içine yerleştirilmesindeki en önemli amaç, matristen daha güçlü bir yapı elde etmektir. Bir başka ifadeyle, kompozit malzemeden verim alınabilmesi için, kompozitin mukavemeti matrisin mukavemetinden daha yüksek olmalıdır [44]. Dolayısıyla iyi bir yapıda önce elyaflar sonra matris kopmalıdır. Elyaflar koptuğu zaman kompozitin de hasara uğradığı kabul edilir. Bu sebeple kompozit malzemenin mukavemeti, elyafın mukavemetine göre hesaplanır. Kompozit mukavemetinin, matris mukavemetinden büyük olması için ise elyaf hacim oranının belirli bir kritik değeri geçmesi gerekir. Bu kritik değer (V_{fcrt}), sınır durumunda, yani kompozit mukavemeti ile matris mukavemeti eşitlenerek bulunabilir. Genellikle elyaf malzemeleri, matris malzemelerine göre daha kırılğan yapıya sahiptirler [44].

$$V_f \geq V_{fcrt} = \frac{E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}}{E_f \varepsilon_{fmax} - E_m \varepsilon_{fmax}} \quad (1.82)$$

(1.74) denkleminde göre, liflerin kompozit mukavemetine katkısının olabilmesi için lif oranının bu kritik değerden fazla olması gerekir. Aksi halde liflerin bir katkısı olmadığı gibi zararı bile olabilir. Yeterince elyaf kullanılmaması durumunda, küçük yüklemelerde dahi aşırı uzamalar meydana gelir ve lifler kırılır. Matris malzemesinin mukavemeti düşük olduğundan yük taşıma kapasitesi düşüktür [44]. Minimum fiber hacim oranı ve kritik fiber hacim oranı aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanabilir.

$$V_{fmin} = \frac{E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}}{E_f \varepsilon_{fmax} + E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}} \quad (1.83)$$

$$V_{fcrt} = \frac{E_m \varepsilon_{mmax} - E_m \varepsilon_{fmax}}{E_f \varepsilon_{fmax} - E_m \varepsilon_{fmax}} \quad (1.84)$$

V_{fmin} ; liflerin yük taşıma sınırını gösterir. Bu değer altındaki oranlarda lifler hemen kırılır ve tüm yükü matris taşır. Liflerin kesiti daraldığı için kompozite faydadan çok zarar verir. V_{fcrt} ; Kompozitten verim alma sınırını gösterir. Bu değer üstündeki fiber oranlarında, kompozitin mukavemeti matristen büyüktür. O halde bir kompozit üretilirken $V_f > V_{fcrt}$ olmasına dikkat edilmelidir.

2. MATERYAL ve METOT

Bu bölümde dört tabakalı cam fiber, karbon fiber, aramid fiber ve hibrit (karbon+aramid) fiber takviyeli dokuma kumaşlardan dört tabakalı hibrit kompozit levhaların üretilmesi aşaması ve yapılan deneyler aktarılmaktadır. Üretimi yapılan hibrit kompozit levhaların her birinden üçer adet pimli ve pim-yapıştırıcı bağlantılı numuneler hazırlanmış çekme testine tabi tutulup hasar tipi ve maksimum hasar yükleri tespit edilmiştir. Deney esnasında cihazdaki kalibrasyon hataları ve malzeme kusurlarının da olabilmesi ihtimali düşünülerek, maksimum hasar yükü için, en düşük yük, ilgili malzeme grubuna ait hasar yükü olarak değerlendirilmiştir. Kompozit levhalarda testler farklı tabakalı kompozit malzeme dizilimi için tekrarlanmıştır. Bu çalışmada hibrit kompozit levha üretimi ve hazırlanan bağlantıların deneyleri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. (Yapılan testler sonucunda üç adet kuvvet uzama Şekilleri elde edilmiştir.)

2.1. Hibrit Kompozit Levha Üretimi

Elle yatırma yöntemiyle kompozit plaka üretimi, bir kalıba elle yerleştirilen kumaşlara (elyaf) bir rulo veya fırça ile reçinenin emdirilmesi esasına dayanır. Daha sonra reçine emdirilmiş kumaşlar oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında veya farklı sıcaklık ve basınçlar altında pismeye/kurumaya bırakılır. Reçineler kumaşlara kat kat yedirilebildiği gibi kumaşın özelliklerine bağlı olarak çok katmana aynı anda da reçine sürülebilir.

Bu yöntemde herhangi bir termoset reçine (epoksi, polyester) kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak ise bilinen elyaflar (cam, karbon, aramid vb.) kullanılabilir. Ancak ağır sık dokulu aramid kumaşların bu yöntemle ıslatılması (reçine emdirilmesi) çok zordur.

Üretimi gerçekleştirilen hibrit kompozit levha için gerekli malzemeler ve üretim aşamaları;

Malzemeler;

- Örgülü yapıda kompozit kumaş
- Reçine (gereği halinde sertleştirici)
- Kalıp ayırıcı

Uygulama;

1. Reçine tek komponentli değil ise ikinci komponent ile gerekli oranlarda bir kap içinde karıştırılarak hazırlanır.

2. Örgülü yapıda olan kompozit kumaşlar belirlenen ölçülerde kesilir ve ağırlıkları ölçülür.
3. Kalıp ayırıcı kalıba sürülerek kuruması beklenir.
4. Kalıp üzerine kesilen kumaş yerleştirip rulo veya fırça yardımıyla reçine sürülüp kumaşa emdirilir.
5. Üzerine bir tane daha kumaş yerleştirilir.
6. Fırçayı reçineye batırıp hafif bastırarak kumaşın üzerine sürülür. Fırçayla reçineyi sürme işlemi merkezden köşelere doğru yapılır. Kumaşa reçine iyice emdirilir.
7. Kumaş ilavesi ve reçine sürme işlemleri tekrar edilir.
8. Bu işlemler sırasında geçen zamanda üst kalıba sürülen kalıp ayırıcı kurumuş olur.
9. Reçineyi iyice içine çekmiş olan kumaşların üzerine üst kalıp konularak basınç uygulanır.
10. Kompozit levha kurlenmesi için belirli bir süre bekletilir.

Elle Yatırma Yönteminde Kullanılan Malzemeler;

Fırat Üniversitesi BAP Araştırma Merkezi tarafından desteklenen MF.15.35 no. lu çalışmada aşağıdaki malzemeler satın alınıp kullanılmıştır.

- Aramid elyaf (110 gr/m², Kevlar 49, E.I. Du Pont de Nemours & Co markalı Twill 2/2 dokuma)
- Carbon elyaf (200 gr/m², 3K Twill 2/2 dokuma)
- Hibrit kumaş (210 gr/m², 3K Twill 2/2 dokuma)
- Cam elyaf (290 gr/m², Twill 2/2 dokuma)
- Reçine (MGS L-285, çalışma sıcaklığı -50 C⁰ - +50 C⁰)
- Sertleştirici (MGS H-285, Hardener)
- Kalıp ayırıcı (Wax – QV5110)
- Makas (Robuso 1026/C/9.5)
- Hassas Terazî
- Kalıp temizleme mendili
- Karıştırma kabı ve karıştırıcı
- Elektrikli düşey şerit testere makinası

Laboratuvarda bulunan basınç ve sıcaklığı ayarlanabilir rezistanslı pres ünitesinin mevcut kalıbı alt ve üst tabaka olmak üzere iki tabakadan oluşmaktadır (Şekil 2.1). Örgü kumaş halinde bulunan dokuma kumaşlar pres ünitesinin kalıbına uygun ebatlarda Şekil 2.2’de görüldüğü şekilde 150-250 mm ebatlarında kesilir.



Şekil 2.1. Basınç ve sıcaklığı ayarlanabilir rezistanslı pres ünitesi.



Şekil 2.2. 150-250 mm ebatlarında kesilen örgülü aramid elyaf kumaş.

Şekil 2.3’de görüldüğü üzere kalıp öncelikle kalıp temizleme mendili ile yüzey pürüzsüzlüğü sağlamak amacıyla temizlenir. Şekil 2.4’deki gibi her iki kalıbın üzerine 10 dk

aralarla üçer kez olacak şekilde kalıp ayırıcı sürülür ve kuruması için yarım saat bekletilir. Kalıp ayırıcı kullanılmasının amacı kalıptan kompozit plakayı kolayca çıkarabilmektir.



Şekil 2.3. Kalıp temizleme mendili ile metal kalıbın temizleme işlemi.



Şekil 2.4. Kalıp ayırıcının kalıba uygulama işlemi.

Kesilen örgülü kompozit kumaş tartılır (Şekil 2.5). Üretici firmanın belirlediği oranlar göz önünde bulundurularak, kullanılacak olan kompozit kumaşın ağırlığı kadar reçine ve reçine miktarının %40 'ı kadar sertleştirici ilave edilerek tartılır ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılır (Şekil 2.6).



Şekil 2.5. Kullanılacak kumaş ağırlığının hassas tartı ile ölçümü.

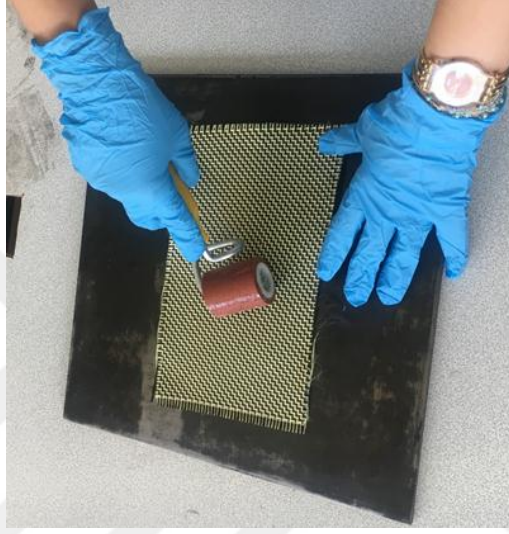


Şekil 2.6. Reçine ve sertleştirici tartılması işlemi.

Daha önceden belirlenen kumaşın tabakalı kompozit dizilim sıralamasına göre ilk kumaş kalıp ayırıcı sürülen kalıbın alt tabakasına yerleştirilir. Şekil 2.7'deki gibi üzerine hazırlanan reçine-sertleştirici homojen karışım rulo yardımıyla kumaşa iyice yedirilir. Ardından ikinci kumaş üzerine bırakılarak ve homojen karışım kumaşa yedirilir. Bu işlem istenilen tabaka veya kalınlık sağlanıncaya kadar yapılır. Kalıbın üst kısmı üzerine kapatılarak prese bırakılır.

Bu çalışmada kullanılan 4 adet örgü fiber kompozit kumaş mevcuttur.(Cam fiber, karbon fiber, aramid fiber, hibrit (karbon aramid) fiber). Bu çalışma ile çeşitli fiber örgü kumaşlardan 4 tabakalı plakalar üretilmiştir. Örneğin; C/A/A/C üretimi sırasında; kalıp ayırıcı sürülen alt

kalıba önce karbon kumaş yerleştirilerek üzerine rulo yardımı ile hazırlanan homojen reçine-sertleştirici karışımı iyice kumaşa yedirilir. Üzerine aramid fiber kumaş serilerek homojen reçine-sertleştirici karışımı rulo yardımıyla kumaşa iyice yedirilir. Üzerine tekrar aramid fiber kumaş serilerek homojen reçine-sertleştirici karışımı rulo yardımıyla kumaşa yedirilerek, 4'üncü son tabaka olan carbon fiber kumaş üzerine konulur ve homojen reçine-sertleştirici karışımı rulo yardımıyla kumaşa yedirilir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Kumaşa reçine-sertleştirici karışımının rulo yardımıyla yedirilmesi.

Kalıptaki kumaşların ortalama 15-20 dk reçine-sertleştirici karışımını iyice içine çekmesi beklenir. İçerisinde kumaşlar kalacak şekilde kalıbın alt kısmının üzerine kalıbın üst kısmı kapatılır. Isınması için önceden açılan pres makinasına yerleştirilip, 60 C° sıcaklık ve 20 Bar basınçta 4 saat bekletildikten sonra basınç altında yaklaşık 8 saat soğumaya bırakılır. Böylece kompozit fiber kumaşlardan tabakalı hibrit kompozit üretimi yapılır. Bu çalışmada belirlenen deney numuneleri için üretim teker teker yapılmıştır.

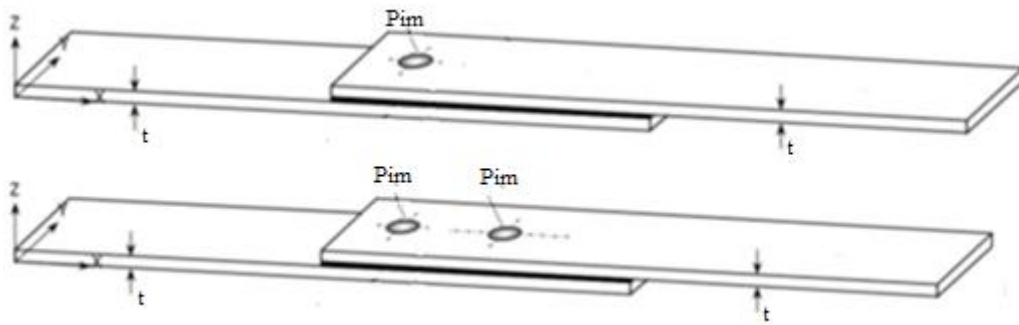
Şekil 2.8'de görülen kompozit plakayı kesebilecek ince uçlu testere yardımıyla plakalar 250mm-20mm ebatlarında kesilir ve kesilen numuneler ile deneyler yapılır.



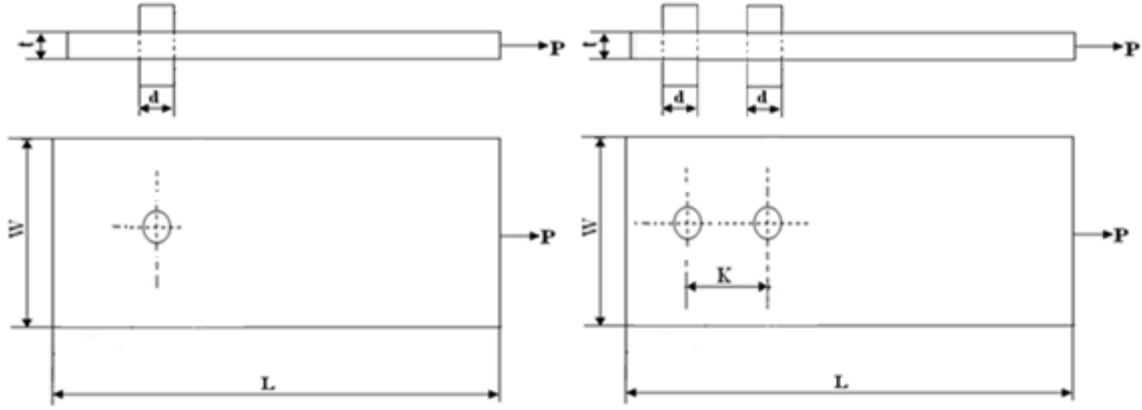
Şekil 2.8. Kompozit plakayı kesebilecek ince uçlu testere.

2.2. Problemin Tanımlanması

Tek ve iki paralel pim bağlantılı cam fiber, aramid, carbon ve hibrit takviyeli dokuma epoksi kompozit plaka numunesinin geometrisi Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’ de görülmektedir.



Şekil 2.9. Tek ve iki pim delikli kompozit plakanın geometrisi.

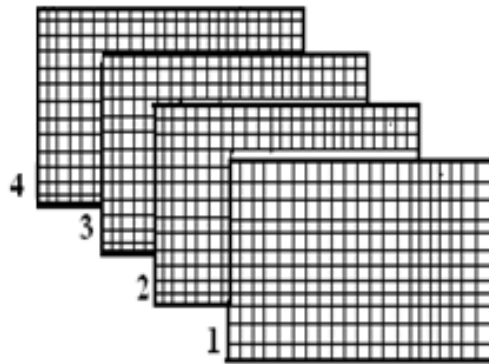


Şekil 2.10. Tek ve iki pim delikli kompozit plakanın geometrisi.

Burada; L ; Plaka uzunluğunu, (250 mm), d ; Delik çapını, (6.5 mm), K ; İki delik merkezi arasındaki mesafeyi, (2 mm), W = Plaka genişliğini, (250 mm), t ; Numune kalınlığını, (2 mm); P ; Çekme kuvvetini, (N) ifade etmektedir.

2.3. Kompozit Plakanın Hazırlanışı

Bu çalışmada 4 tabakalı farklı kompozit kumaşlardan elde dilmiş plakalar kullanılmıştır. Cam fiber, aramid, carbon ve hibrit takviyeli dokuma epoksi kompozit plakalar Bölüm 2’de belirtildiği şekilde üretilmiş ve 20 Bar basınçta $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ de 4 saat süresince preslenmiştir. Presleme işleminden sonra plaka kalınlığı 2 mm olarak elde edilmiştir.



Şekil 2.11. Fiber takviyeli dokuma kumaşlar.

2.4. Deney Numunelerinin Hazırlanma Aşamaları

Dört tabakanın uygun şartlarda bir araya getirilmesi ile elde edilen cam fiber, aramid, carbon ve hibrit takviyeli kumaşlarla üretilen 4 tabakalı hibrit kompozit plakalar, boyu 250 mm eni 20 mm ölçülerinde kesilmiştir. Kesilen numuneler, çapı 6.5 mm matkap yardımıyla tek ve çift delik delinerek hazırlanmıştır. Hazırlanan deney numuneleri üç aşamada incelenmiş olup, her grupta 9 adet numune yer almaktadır. İlk aşamada boyu 250 mm olan deliksiz numuneleri (3 adet) çekme testine tabi tutulmuşlardır. İkinci aşamada, iki plakanın tek pimli şekilde birleştirilerek hazırlanan numuneleri (3 adet) çekme testine tabi tutulmuşlardır. Üçüncü aşamada ise iki plakanın çift pimli şekilde birleştirilerek hazırlanan numuneleri (3 adet) çekme testine tabi tutulmuşlardır. Numuneler hızı 1 mm/dakika olan, Universal test cihazında çekme testine tabi tutulmuştur (Şekil 3.4). Tabakalı hibrit kompozit plakalar için çekme testi sırasında kullanılan pim çapı 6.5 mm'lik olup, paslanmaz çelik malzemeden yapılmıştır.

Bu çalışmalar ve deneysel tüm işlemler Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.12. Universal Test Cihazı

3. SONUÇLAR

Bu bölümde çekme testi sonucu elde edilen parametreler Şekiller halinde verilmiş, kuvvet parametresine bağlı olarak gerilme ve şekil değiştirme oranları hesaplanıp şekiller halinde gösterilmiştir. Geometrik parametrelerin etkisi, maksimum hasar yükleri ve hasar tipleri incelenmiştir. Aynı zamanda malzemenin üretim aşamasındaki diziliminin hasar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

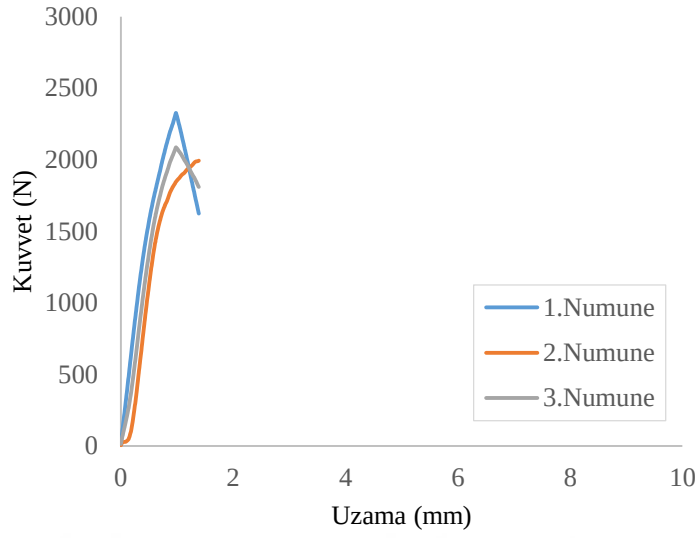
3.1. Tek ve Çift Pim Bağlantılı Hibrit Kompozit Plakalar

Bu kısımda dört tabakalı fiber takviyeli tabakalı hibrit kompozit levhaların deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Numuneler için geometrik parametreler; pimsiz tek parça, tek pimli ve çift pimli bağlantılı olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışma; 4 farklı fiber kumaş malzemesinin tabakalı olarak dizilimi için 28 adet tabakalı hibrit kompozit plaka üretilmiş, her birinden üçer adet numune hazırlanmış ve deneyler yapılmıştır. Her bir farklı kompozit plakaya ait deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

3.1.1. G/G/G/G Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 50 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 20 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı glass-glass-glass-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

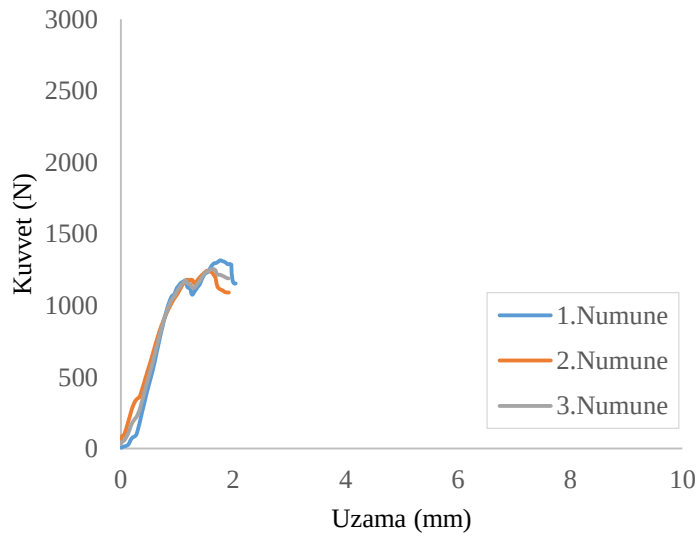
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.1. G/G/G/G deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.

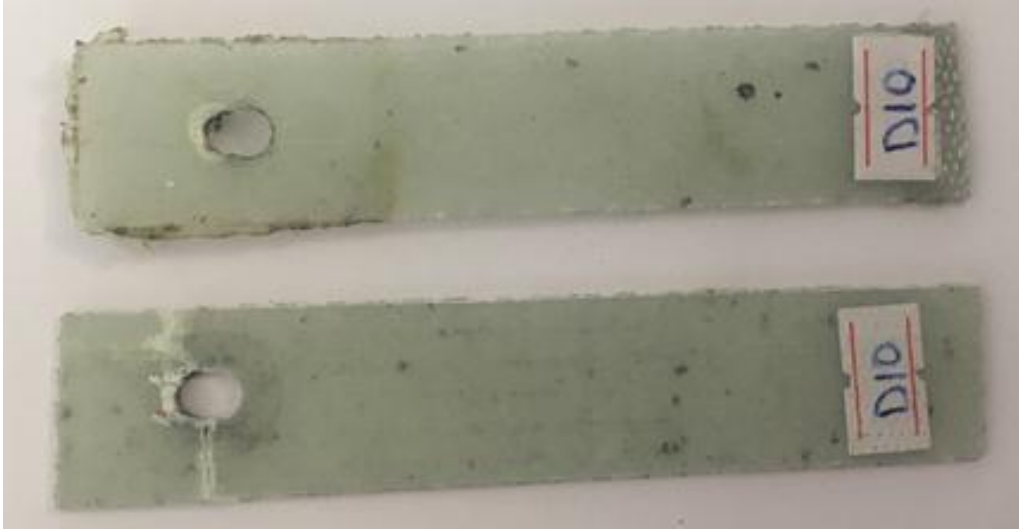
1. numunede 2288 N değerinde, 2. numunede 2454 N değerinde, 3. numunede ise 2086 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir. (Şekil 3.1).

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.2. G/G/G/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

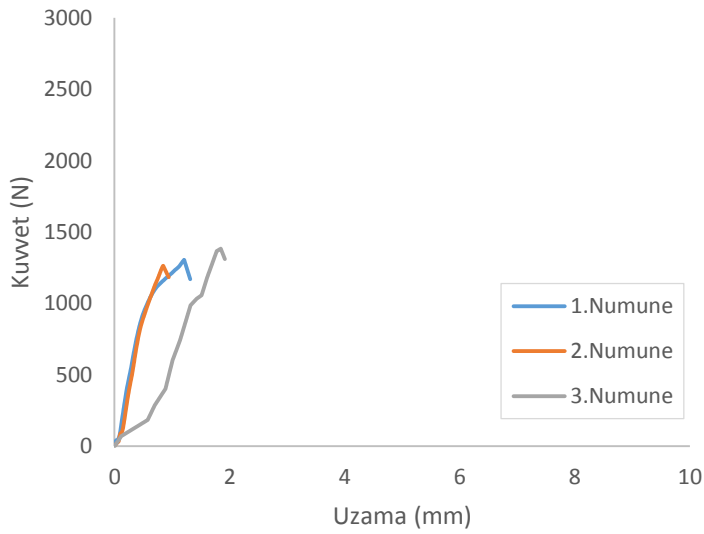
1. numunede 1314 N değerinde, 2. numunede 1243 N değerinde, 3. numunede ise 1254 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.2).



Şekil 3.3. G/G/G/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.3’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme alt parçada levhada kesme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.4. G/G/G/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 1304 N değerinde, 2. numunede 1263 N değerinde, 3. numunede ise 1382 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.4).



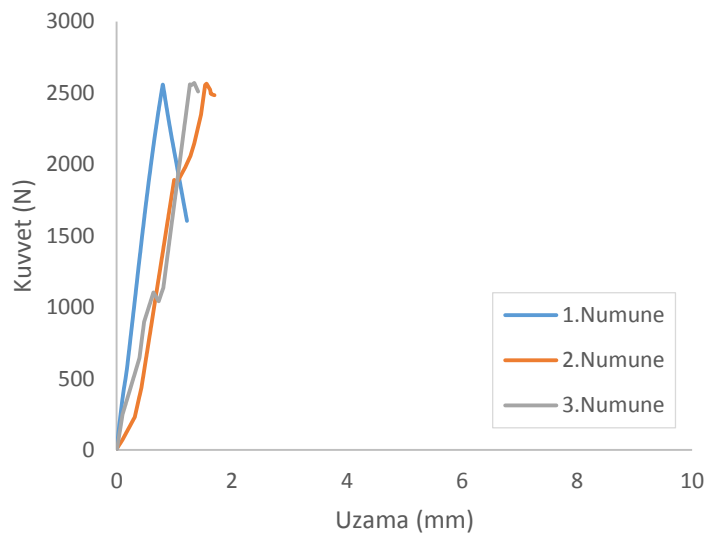
Şekil 3.5. G/G/G/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.5’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme alt parçada levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.2. C/C/C/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 38 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40’ı 15 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı carbon-carbon-carbon-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

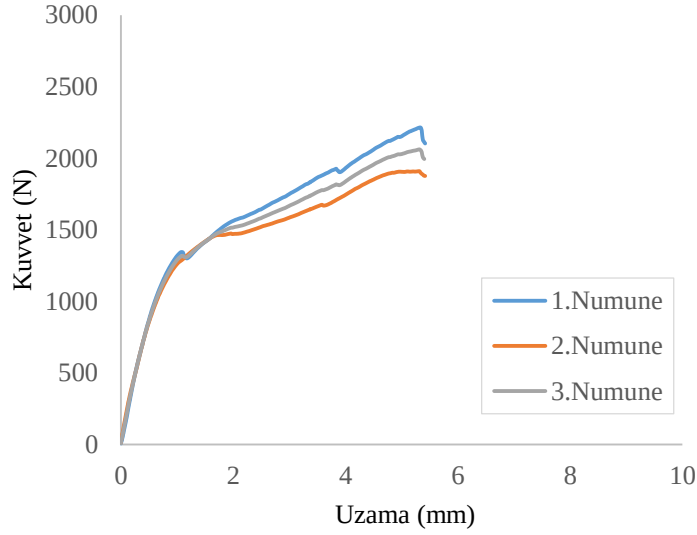
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.6. C/C/C/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 2557 N değerinde, 2. numunede 2564 N değerinde, 3. numunede ise 2569 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (şekil 3.6).

b) Tek pim bağlantılı numunenin yapılan çekme deneyi sonucuna göre;



şekil 3.7. C/C/C/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

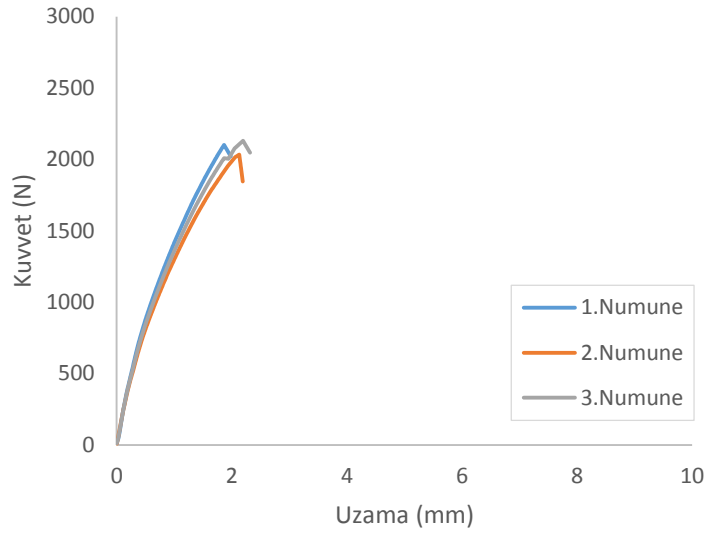
1. numunede 2215 N değerinde, 2. numunede 1908 N değerinde, 3. numunede ise 2061 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (şekil 3.7).



şekil 3.8. C/C/C/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

şekil 3.8' de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.9. C/C/C/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.9’da 1. numunede 2101 N değerinde, 2. numunede 2033 N değerinde, 3. numunede ise 2130 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



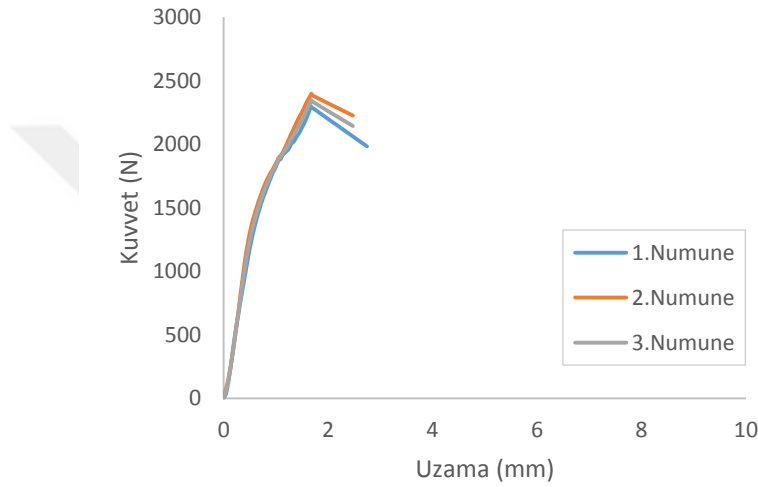
Şekil 3.10. C/C/C/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.10 ’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, levhada kesme alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.3. A/A/A/A Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 52,6 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 21 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-aramid-aramid-aramid dizilimli kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

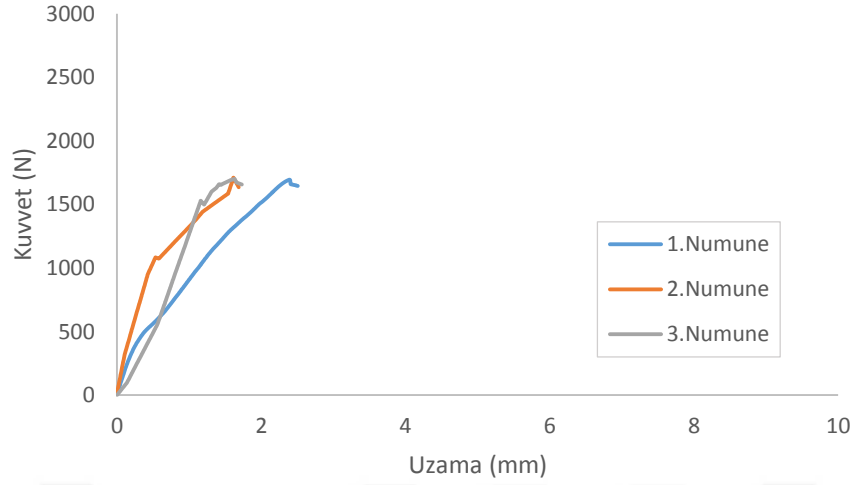
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.11. A/A/A/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 2289 N değerinde, 2. numunede 2396 N değerinde, 3. numunede ise 2344 N değerinde hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.11).

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.12. A/A/A/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

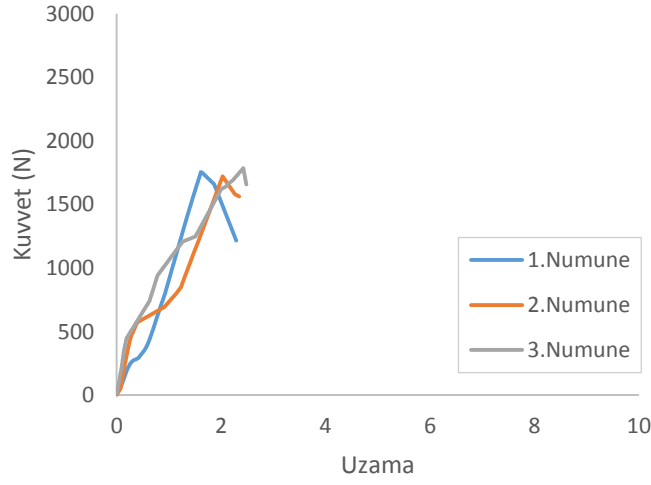
1. numunede 1694 N değerinde, 2. numunede 1710 N değerinde, 3. numunede ise 1701 N değerinde maksimum hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.13. A/A/A/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.13 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.14. A/A/A/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 1754 N değerinde, 2. numunede 1720 N değerinde, 3. numunede ise 1785 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.14).



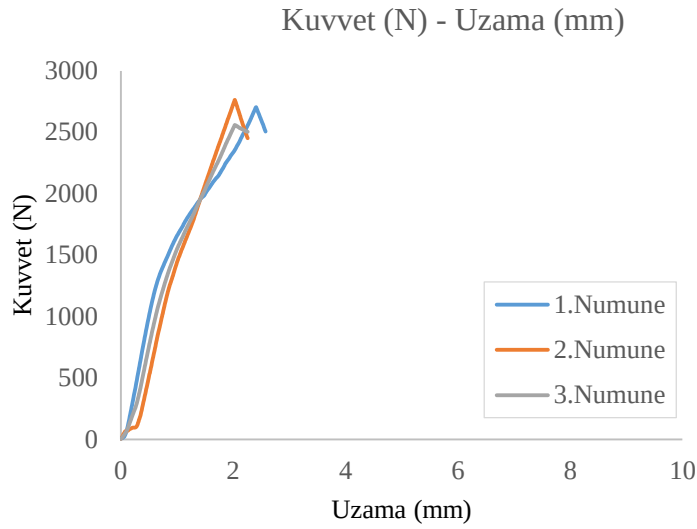
Şekil 3.15. A/A/A/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.15 'da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.4. H/H/H/H Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka İçin Deney Sonucu

Toplam kumaş ağırlığı 32 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 13 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-hibrit-hibrit-hibrit dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

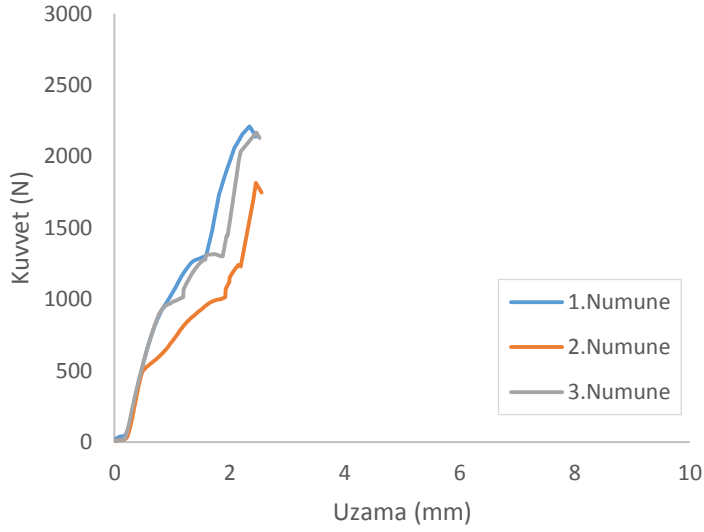
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.16. H/H/H/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.16'da 1. numunede 2704 N değerinde, 2. numunede 2763 N değerinde, 3. numunede ise 2555 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.17. H/H/H/H tek pim bağlantılı kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

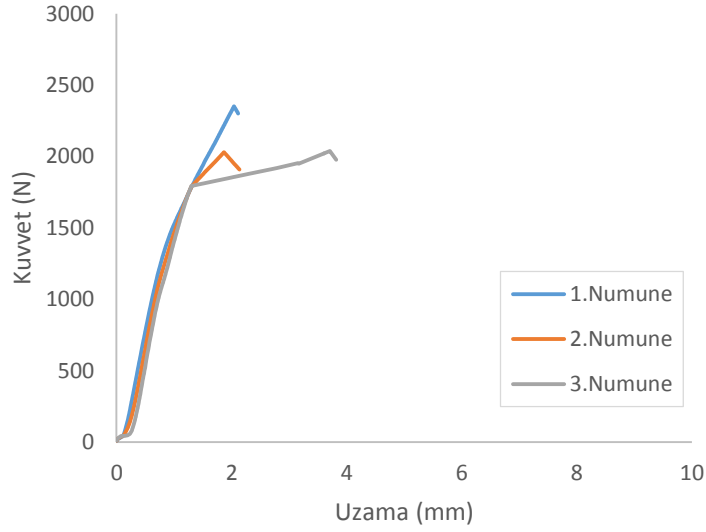
1. numunede 2211 N değerinde, 2. numunede 1814 N değerinde, 3. numunede ise 2167 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.17).



Şekil 3.18. H/H/H/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.18'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.19. H/H/H/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.19’da 1. numunede 2351 N değerinde, 2. numunede 2260 N değerinde, 3. numunede ise 2038 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



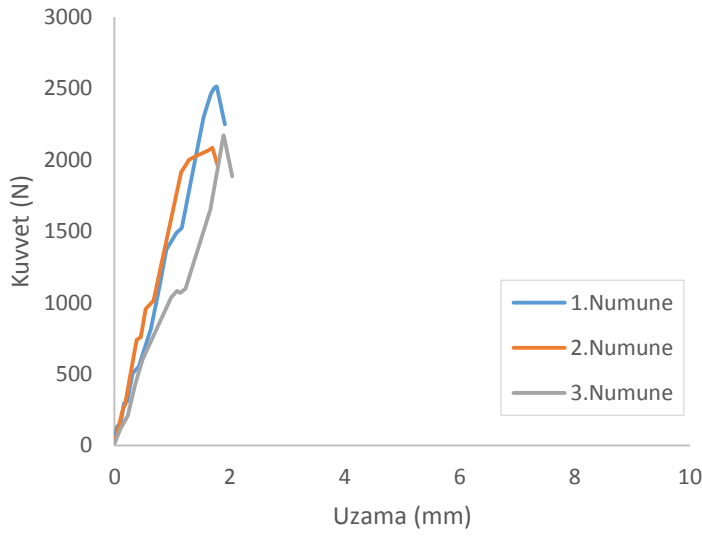
Şekil 3.20. H/H/H/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.20 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme, levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.5. A/G/A/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 51,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 21 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-glass-aramid-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

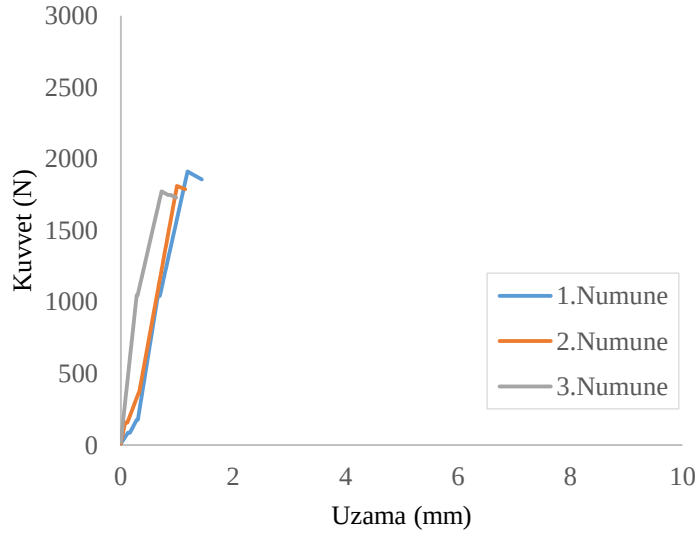
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.21. A/G/A/G deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.

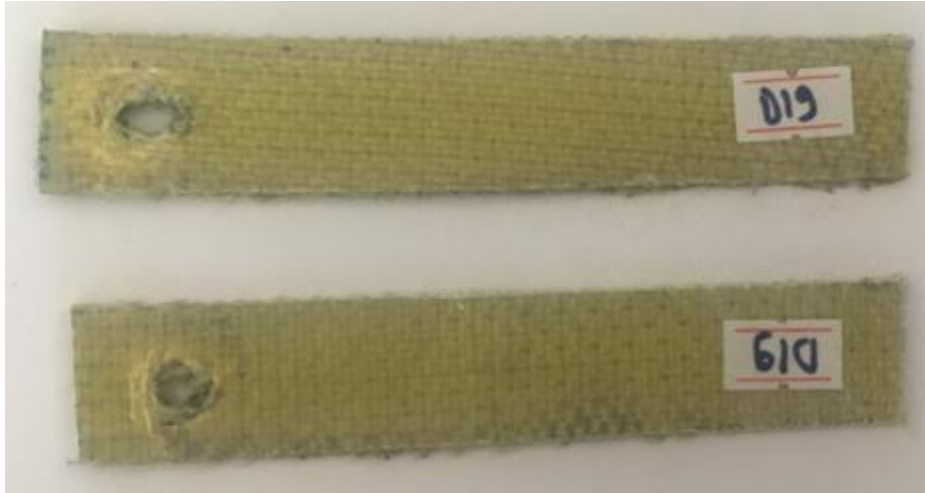
Şekil 3.21'de 1. numunede 2513 N değerinde, 2. numunede 2084 N değerinde, 3. numunede ise 2170 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.22. A/G/A/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

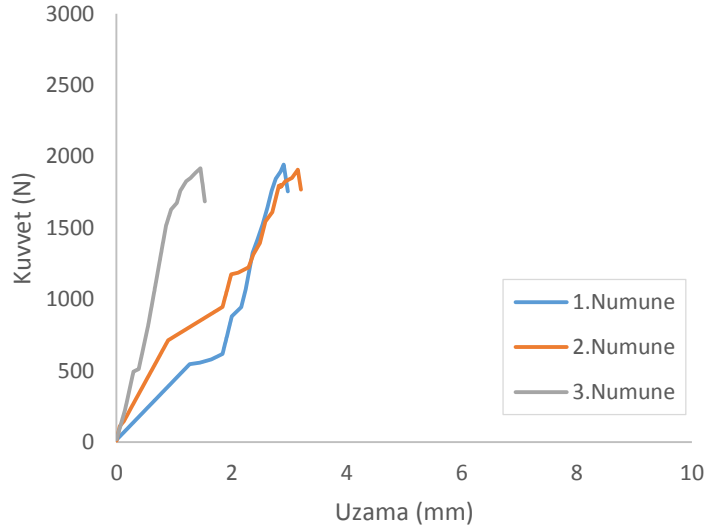
1. numunede 1911 N değerinde, 2. numunede 1810 N değerinde, 3. numunede ise 1772 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.23. A/G/A/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.23'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.24. A/G/A/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 1943 N değerinde, 2. numunede 1907 N değerinde, 3. numunede ise 1917 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.24).



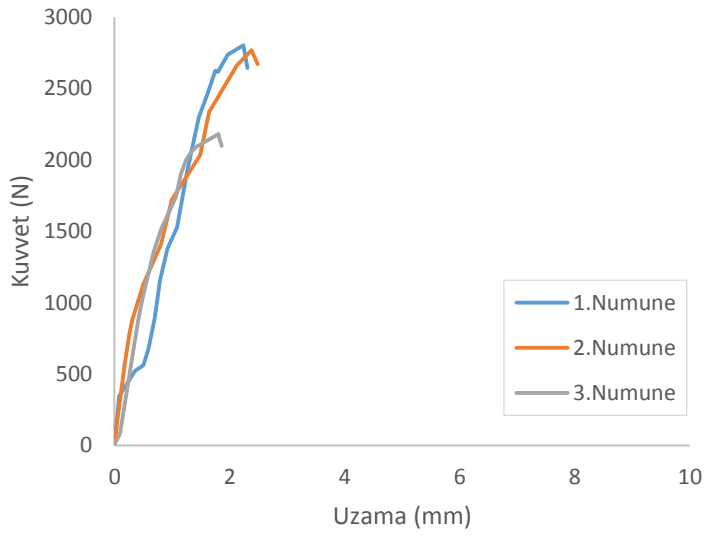
Şekil 3.25. A/G/A/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.25’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme alt parçada delikte ezilme, levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.6. A/A/G/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 51,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 21 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-aramid-glass-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

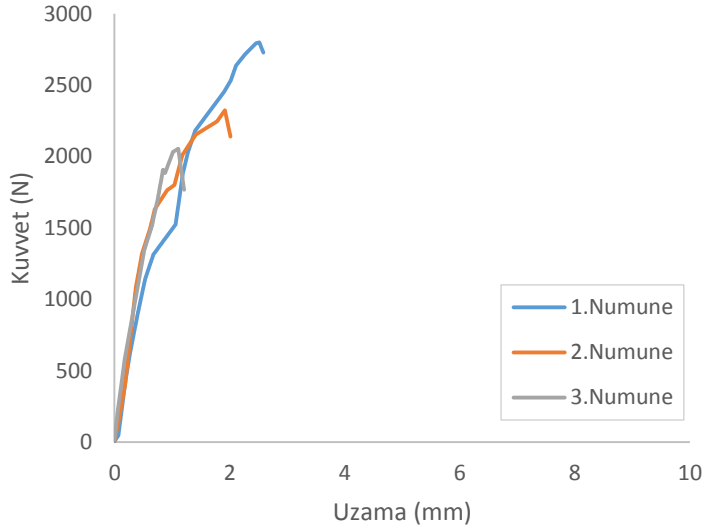
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.26. A/A/G/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

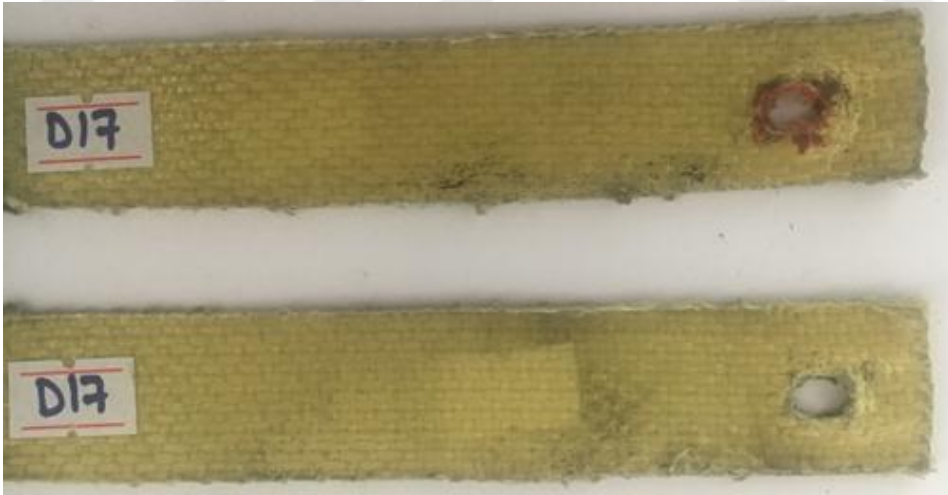
1. numunede 2801 N değerinde, 2. numunede 2767 N değerinde, 3. numunede ise 2180 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.26).

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.27. A/A/G/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

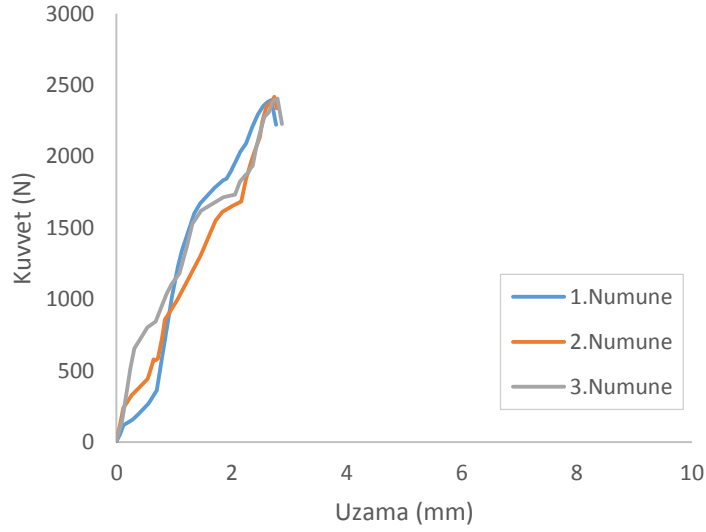
Şekil 3.27’de 1. numunede 2798 N değerinde, 2. numunede 2323 N değerinde, 3. numunede ise 2054 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.28. A/A/G/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.28 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.29. A/A/G/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.29’de 1. numunede 2395 N değerinde, 2. numunede 2417 N değerinde, 3. numunede ise 2405 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



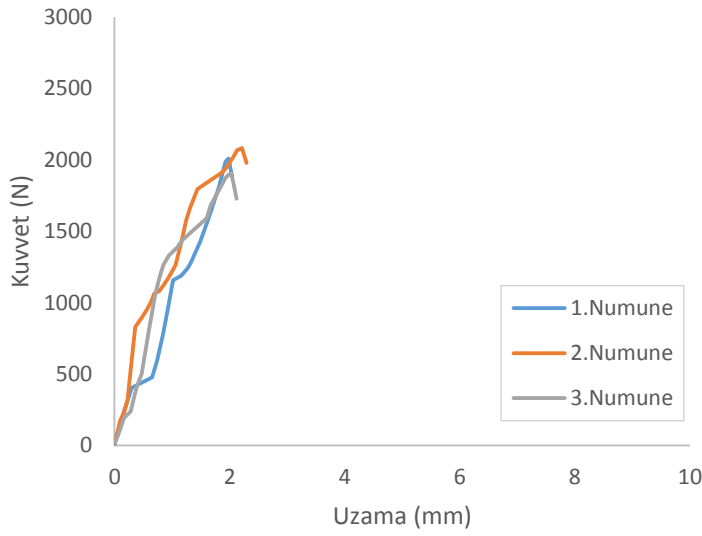
Şekil 3.30. A/A/G/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.30’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme alt parçada delikte ezilme, levhada kesme ve yırtılma meydana gelmiştir.

3.1.7. A/G/G/A Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 51,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 21 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-glass-glass-aramid dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

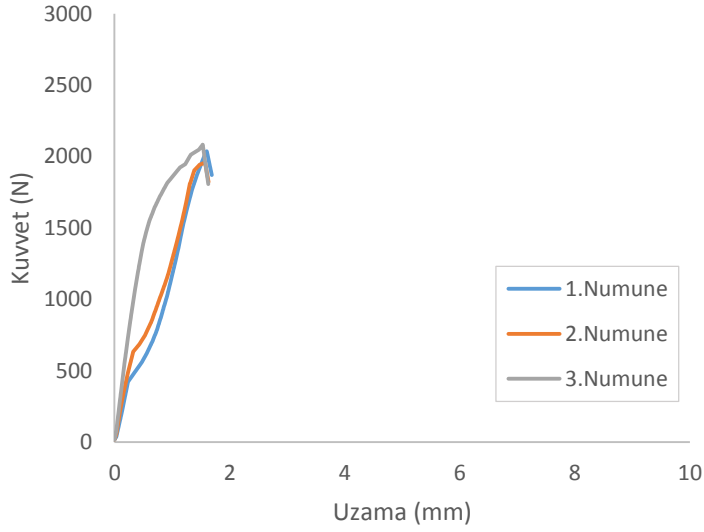
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.31. A/G/G/A deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.

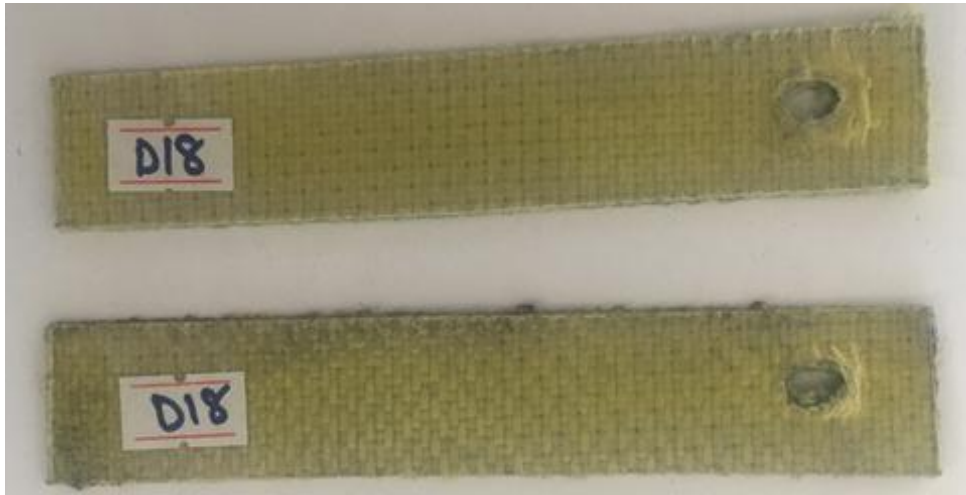
Şekil 3.31'de 1. numunede 2055 N değerinde, 2. numunede 2167 N değerinde, 3. numunede ise 2188 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.32. A/G/G/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

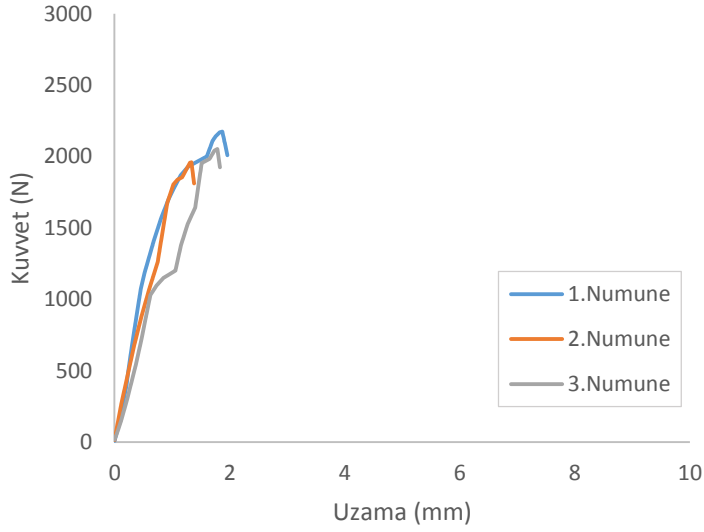
Şekil 3.32’de 1. numunede 2036 N değerinde, 2. numunede 1957 N değerinde, 3. numunede ise 2082 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.33. A/G/G/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

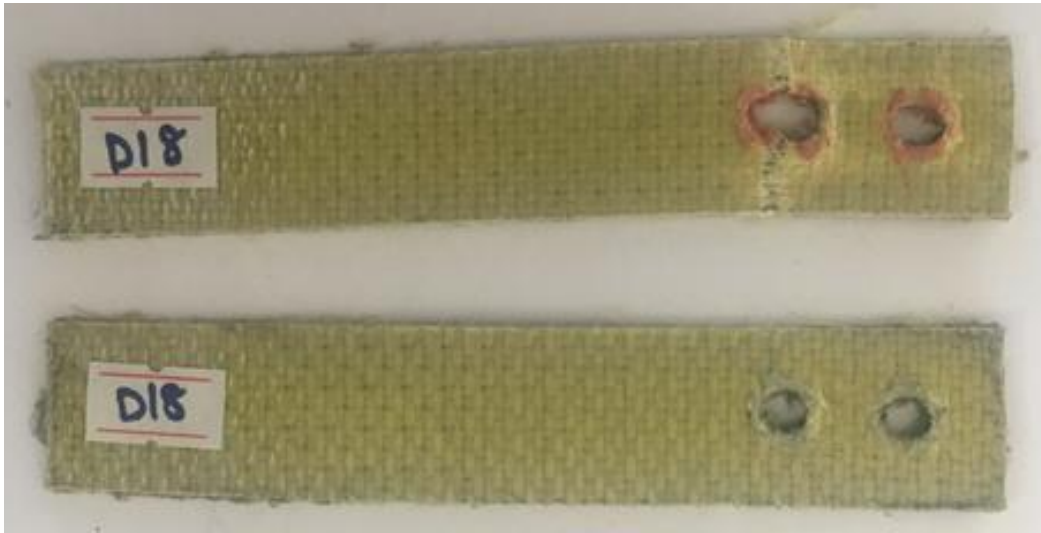
Şekil 3.33 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.34. A/G/G/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 2173 N değerinde, 2. numunede 1959 N değerinde, 3. numunede ise 2052 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.34).



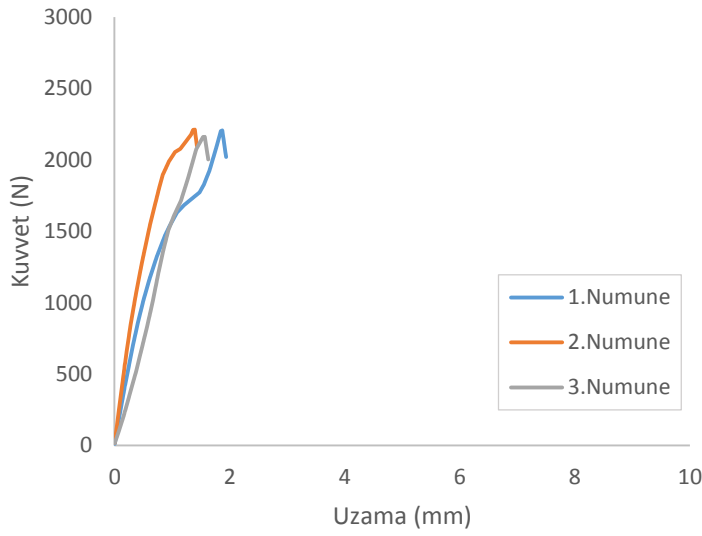
Şekil 3.35. A/G/G/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.35 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.8. G/A/A/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 51,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 21 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı glass-aramid-aramid-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

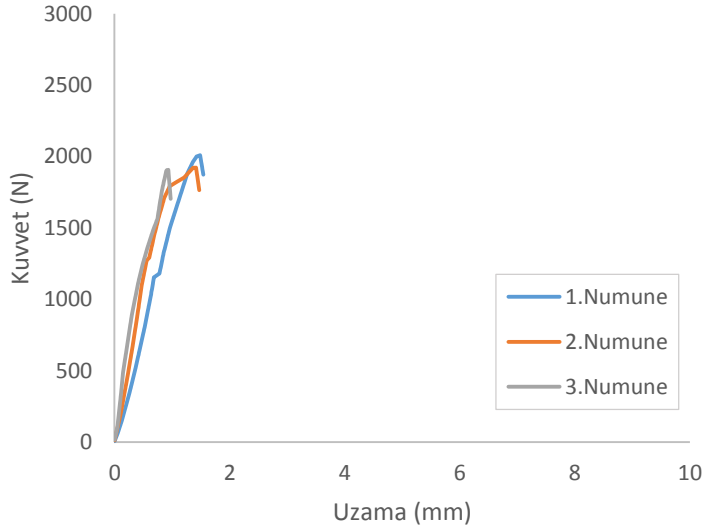
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.36. G/A/A/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

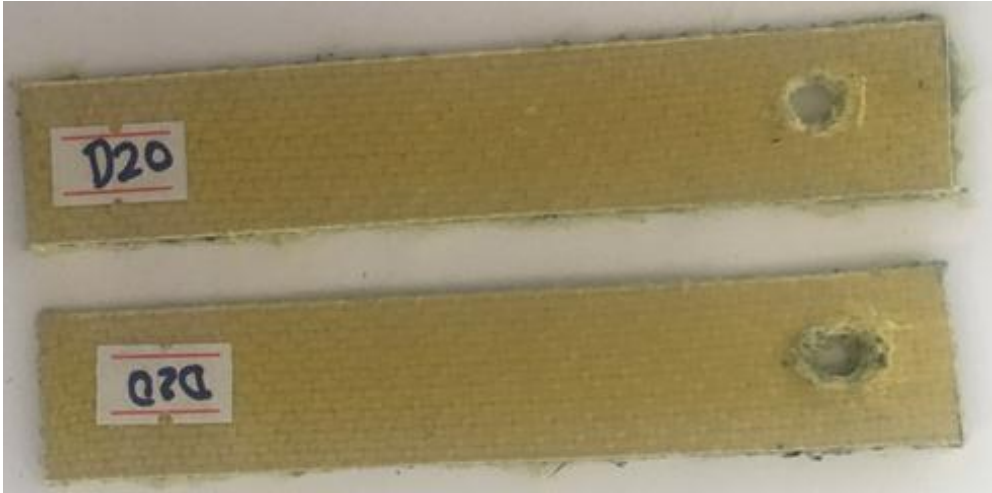
Şekil 3.36'da 1. numunede 2206 N değerinde, 2. numunede 2211 N değerinde, 3. numunede ise 2161 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.37. G/A/A/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

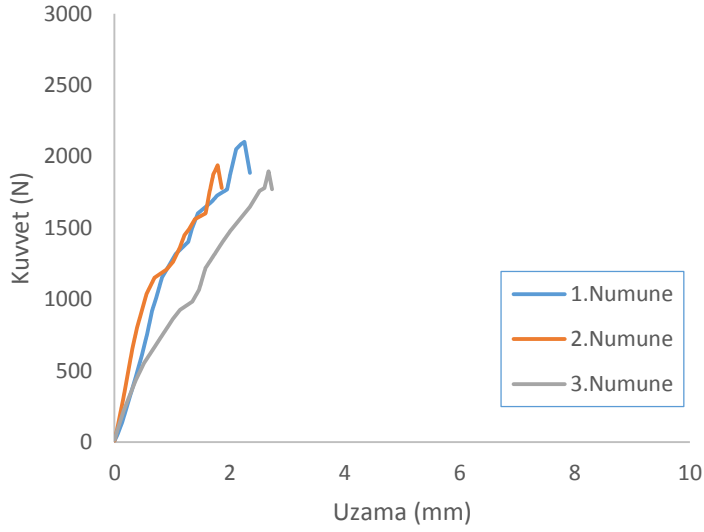
Şekil 3.37’de 1. numunede 2008 N değerinde, 2. numunede 1911 N değerinde, 3. numunede ise 1906 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.38. G/A/A/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.38’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.39. G/A/A/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 2102 N değerinde, 2. numunede 1938 N değerinde, 3. numunede ise 1896 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.39).



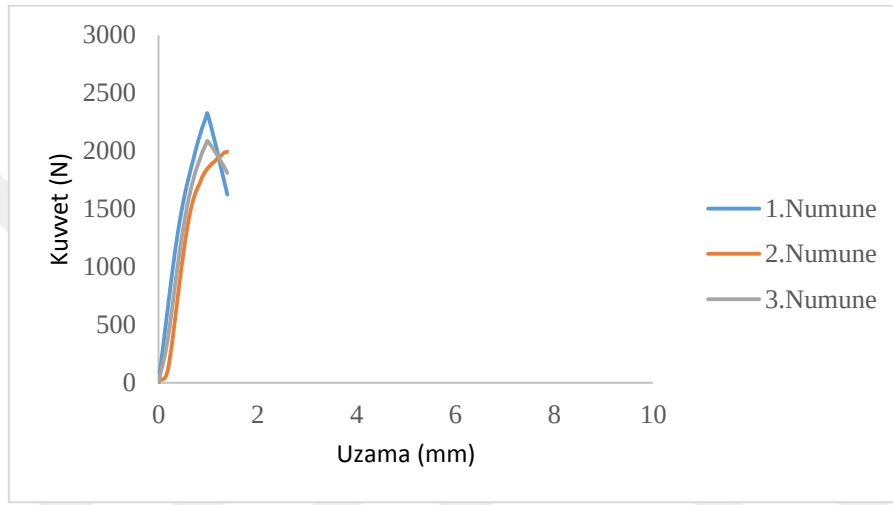
Şekil 3.40. G/A/A/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.40'da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.9. A/H/A/H Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 42,50 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-hibrit-aramid-hibrit dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

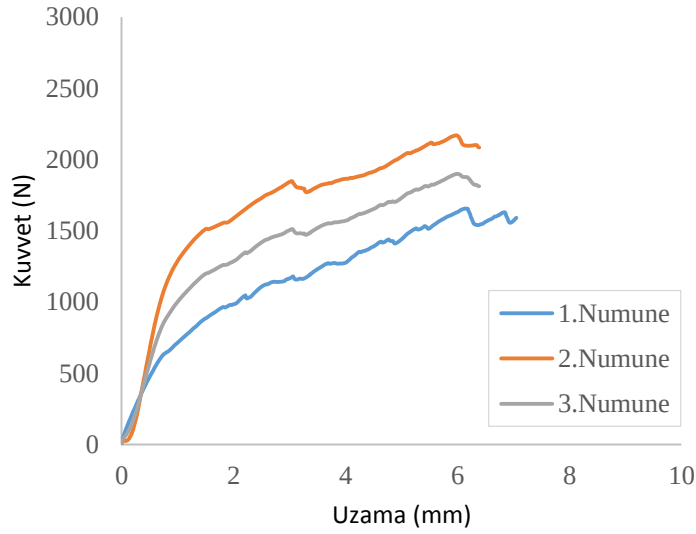
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.41. A/H/A/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

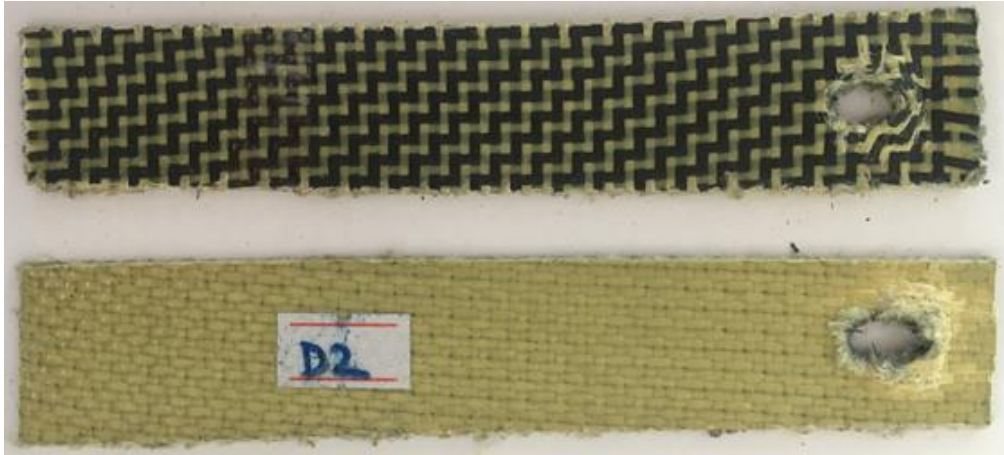
1. numunede 2327 N değerinde, 2. numunede 2456 N değerinde, 3. numunede ise 2086 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil3.41).

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.42. A/H/A/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

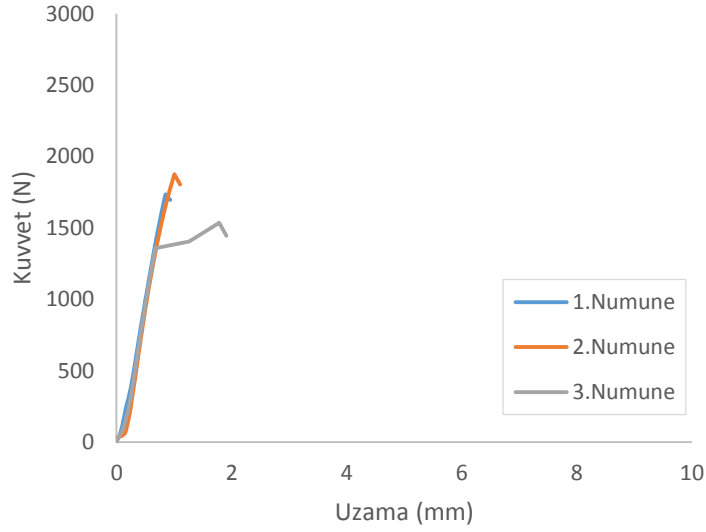
1. numunede 1657 N değerinde, 2. numunede 1848 N değerinde, 3. numunede ise 1512 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.42).



Şekil 3.43. A/H/A/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir (Şekil3.43).

c) Çift pim bağlantılı numunede çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.44. A/H/A/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.44'de 1. numunede 1735 N değerinde, 2. numunede 1875 N değerinde, 3. numunede ise 1535 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



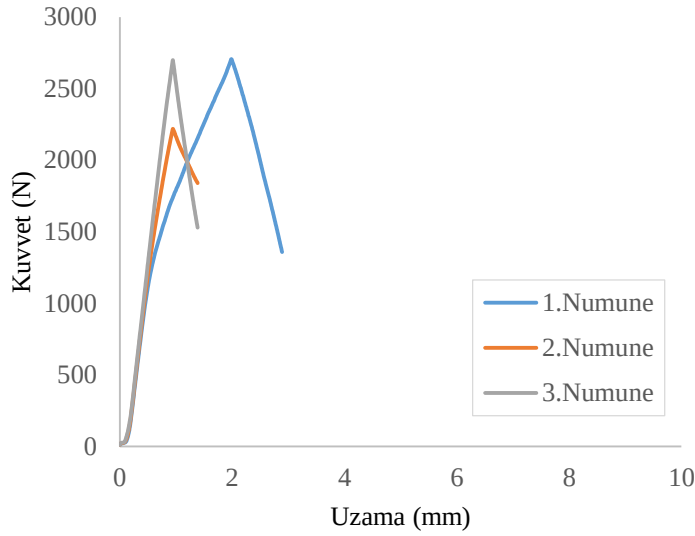
Şekil 3.45. A/H/A/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.45 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.10. H/H/A/A Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 42,50 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-hibrit-aramid-aramid dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

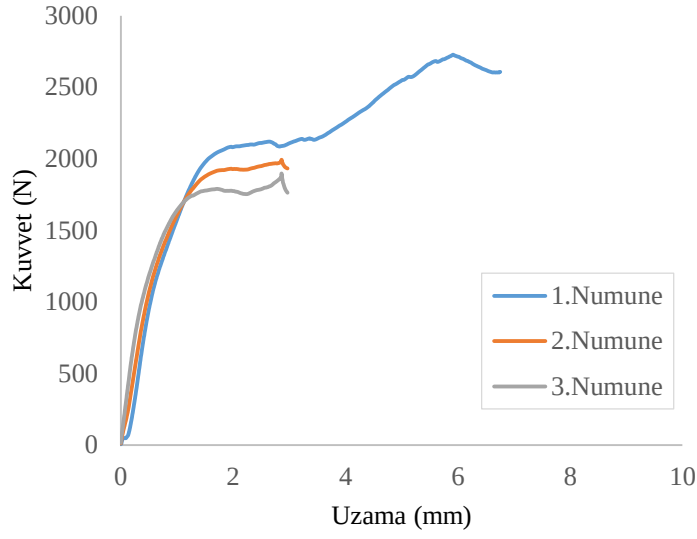
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.46. H/H/A/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.46'da 1. numunede 2705 N değerinde, 2. numunede 2204 N değerinde, 3. numunede ise 2699 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.47. H/H/A/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

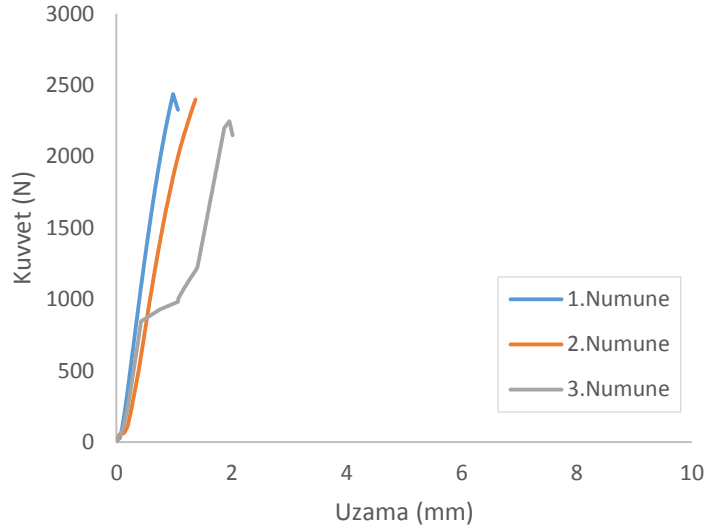
Şekil 3.47’de 1. numunede 2727 N değerinde, 2. numunede 1993 N değerinde, 3. numunede ise 1897 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.48. H/H/A/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.48 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.49. H/H/A/A çift pim bağlantılı numunede hasar yükü-uzama grafiği.

Şekil 3.49’da 1. numunede 2436 N değerinde, 2. numunede 2398 N değerinde, 3. numunede ise 2247 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



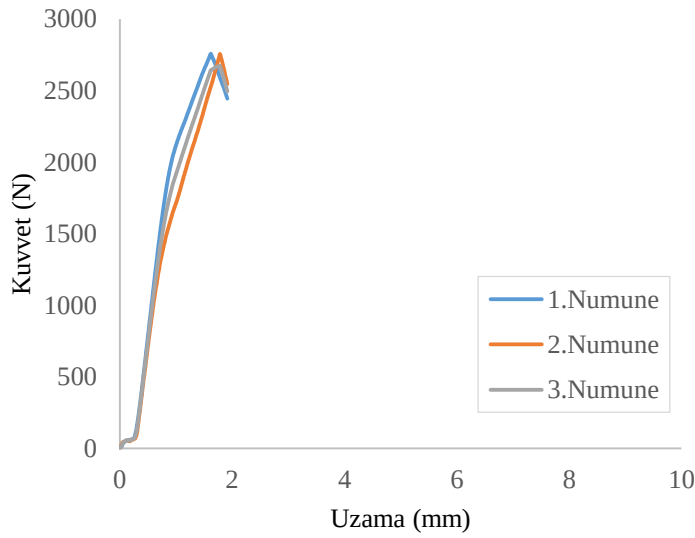
Şekil 3.50. H/H/A/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.50’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada ezilme meydana gelmiştir.

3.1.11. A/H/H/A Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 42,50 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-hibrit-hibrit-aramid dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

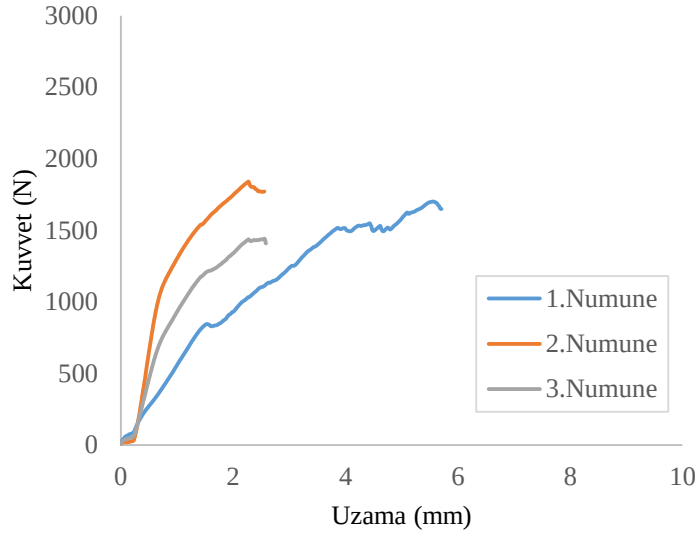
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin yapılan çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.51. A/H/H/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.51'de 1. numunede 2757 N değerinde, 2. numunede 2755 N değerinde, 3. numunede ise 2669 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.52. A/H/H/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

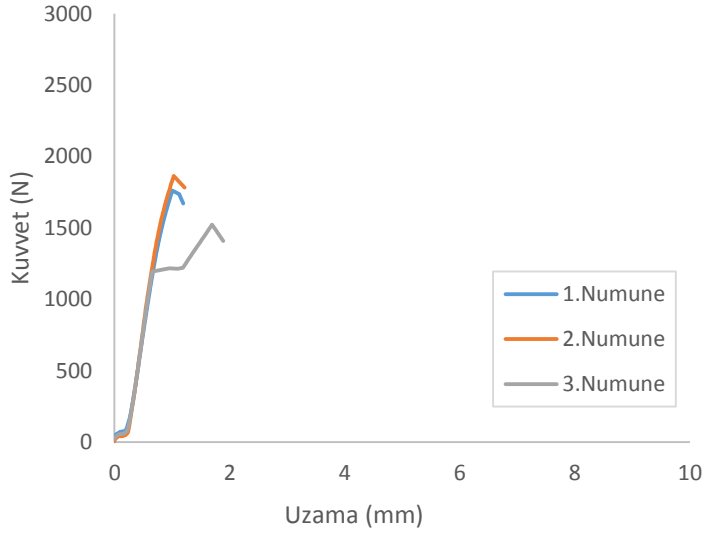
Şekil 3.52’de 1. numunede 1549 N değerinde, 2. numunede 1841 N değerinde, 3. numunede ise 1439 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.53. A/H/H/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.53’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.54. A/H/H/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği

Şekil 3.54'de 1. numunede 1761 N değerinde, 2. numunede 1863 N değerinde, 3. numunede ise 1522 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.55. A/H/H/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

Şekil 3.55'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.12. H/A/A/H Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

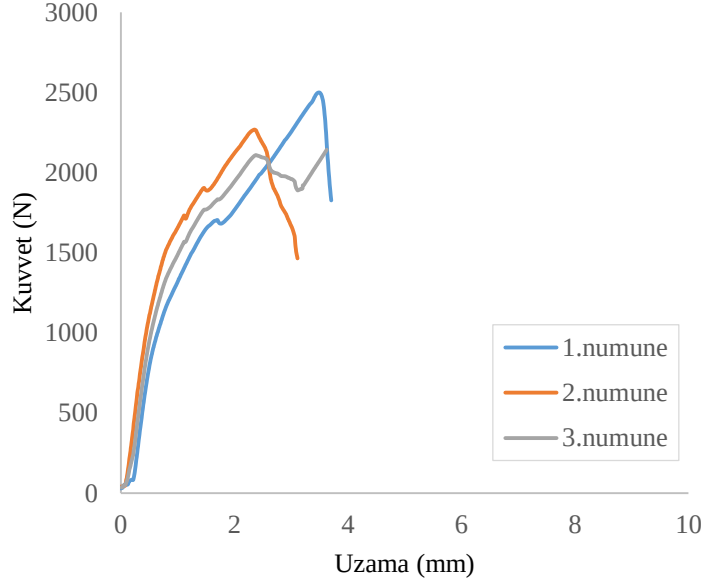
Toplam kumaş ağırlığı 42.30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-aramid-aramid-hibrit dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.56. H/A/A/H tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi.

Tabakalı hibrit kompozit numunenin universal test cihazına bağlantı şekli gösterilmiştir (Şekil 3.56).



Şekil 3.57. H/A/A/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

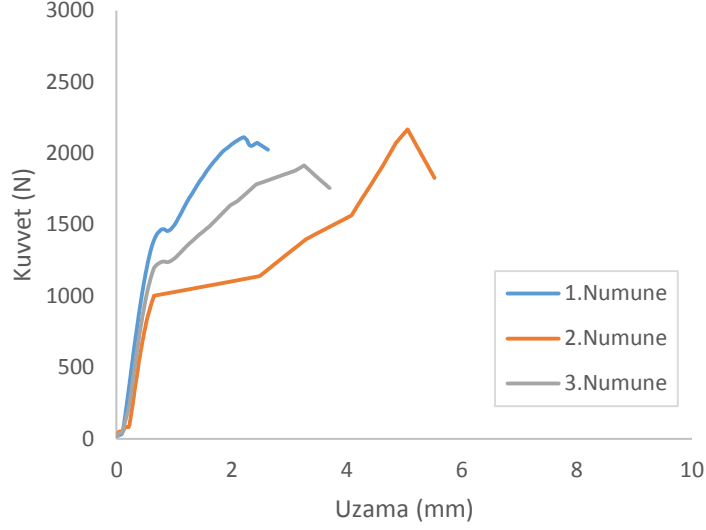
Şekil 3.57’de 1. numunede 2499 N ’luk, 2. numunede 2178 N ’luk, 3. numunede ise 2142 N’luk bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.58. H/A/A/H tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi.

Şekil 3.58 'de tek pim bağlantılı numunenin universal test cihazına bağlantı şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.59. H/A/A/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.59'de 1. numunede 2166 N değerinde, 2. numunede 2111 N değerinde, 3. numunede ise 1914 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.60. H/A/A/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

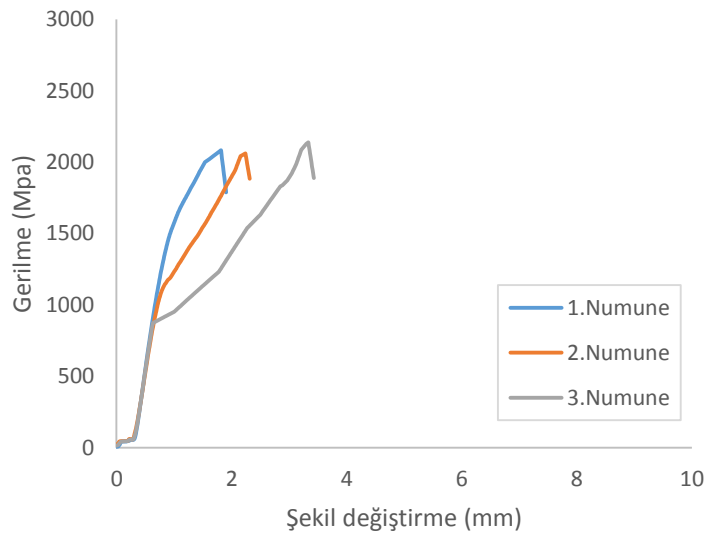
Şekil 3.60'da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunede çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.61. H/A/A/H çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi.

Şekil 3.61 'de çift pim bağlantılı numunenin universal test cihazına bağlantı şekli gösterilmiştir.



Şekil 3.62. H/A/A/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.62'de 1. numunede 2082 N değerinde, 2. numunede 2060 N değerinde, 3. numunede ise 2137 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



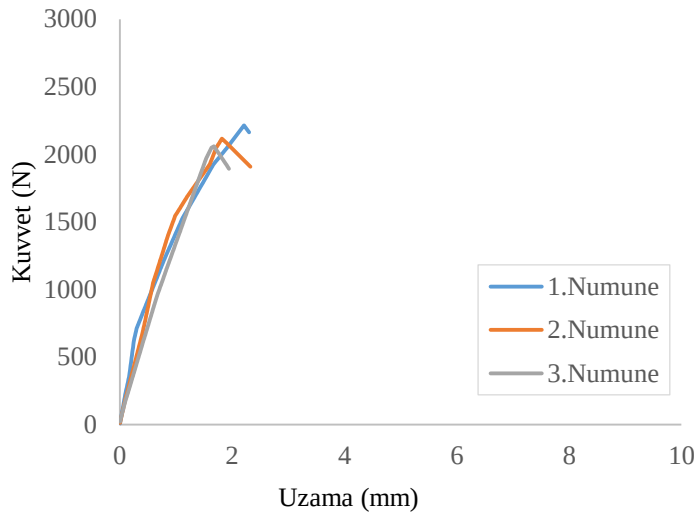
Şekil 3.63. H/A/A/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.63 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.13. A/C/A/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 45,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-carbon-aramid-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

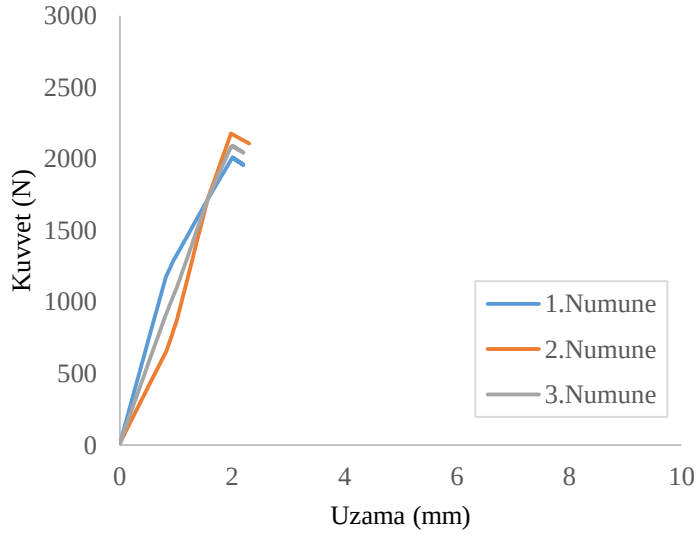
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.64. A/C/A/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

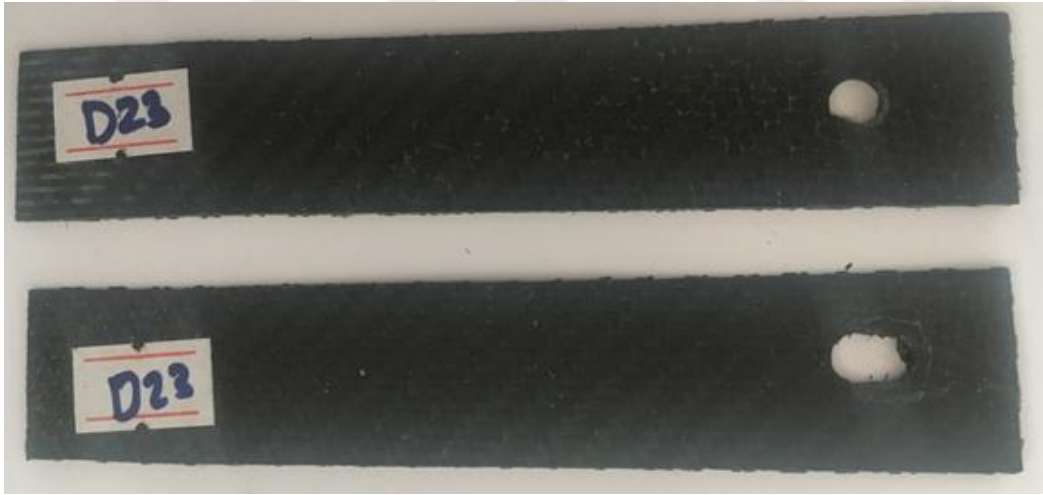
Şekil 3.64'de 1. numunede 2214 N değerinde, 2. numunede 2116 N değerinde, 3. numunede ise 2059 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.65. A/C/A/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

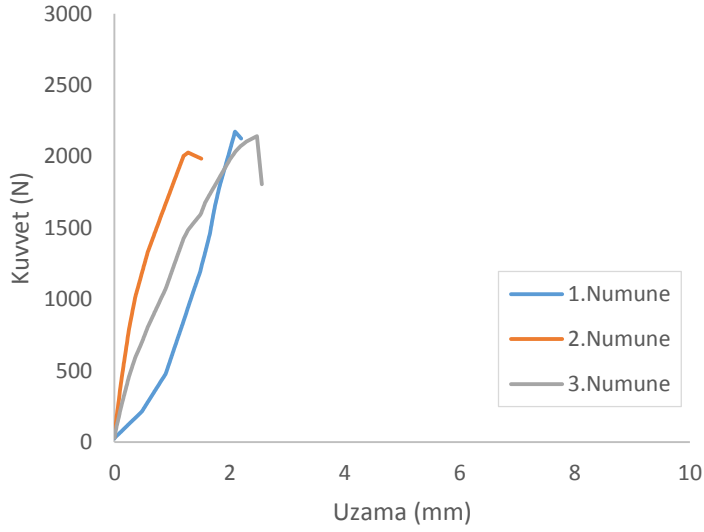
Şekil 3.65’de 1. numunede 2010 N değerinde, 2. numunede 2176 N değerinde, 3. numunede ise 2090 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.66. A/C/A/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.66 ’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.67. A/C/A/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.67’de 1. numunede 2173 N değerinde, 2. numunede 2027 N değerinde, 3. numunede ise 2142 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



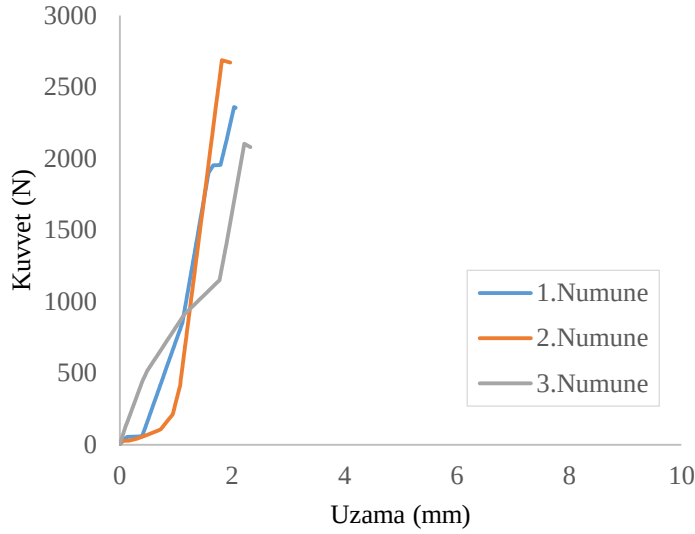
Şekil 3.68. A/C/A/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.68 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada yırtılma meydana gelmiştir.

3.1.14. A/A/C/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 45,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-aramid-carbon-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

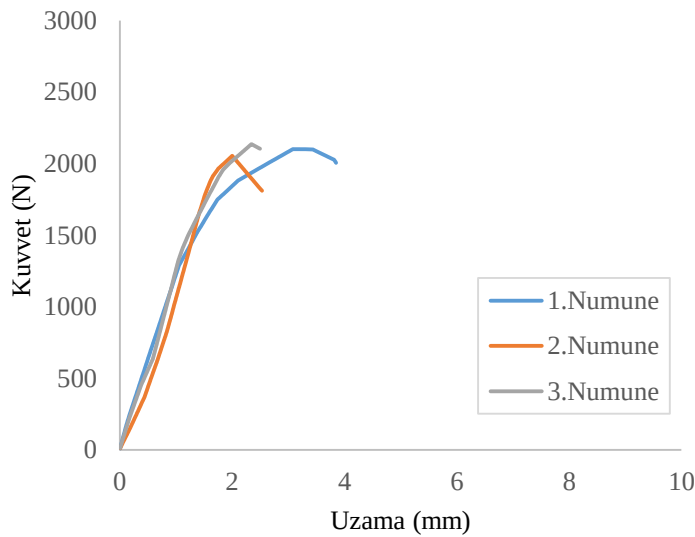
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.69. A/A/C/C deliksiz numunede kuvvet-uzama grafiği.

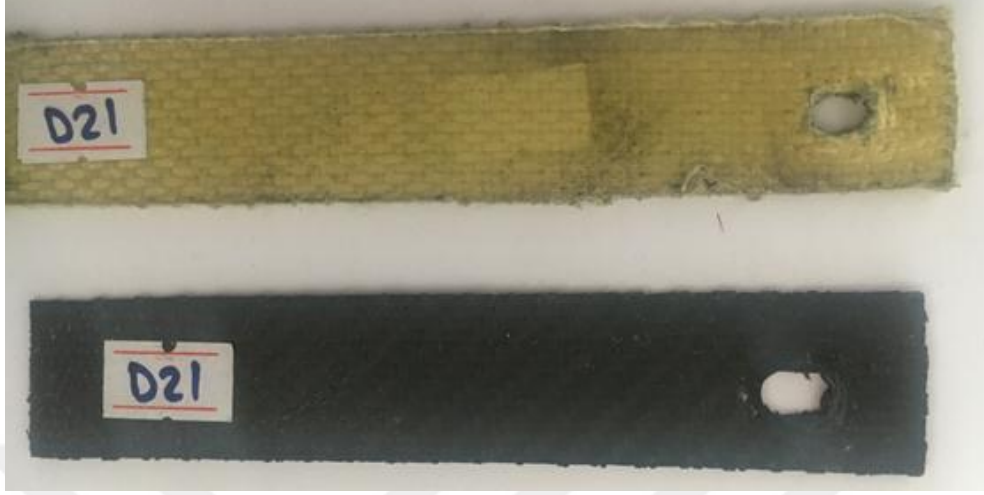
1. numunede 2359 N değerinde, 2. numunede 2705 N değerinde, 3. numunede ise 2103 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.69).

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.70. A/A/C/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

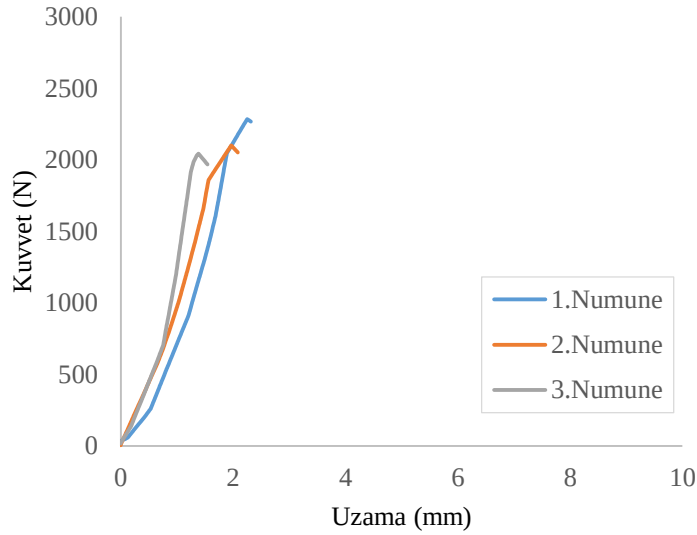
Şekil 3.70’de 1. numunede 2101 N değerinde, 2. numunede 2054 N değerinde, 3. numunede ise 2136 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.71. A/A/C/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

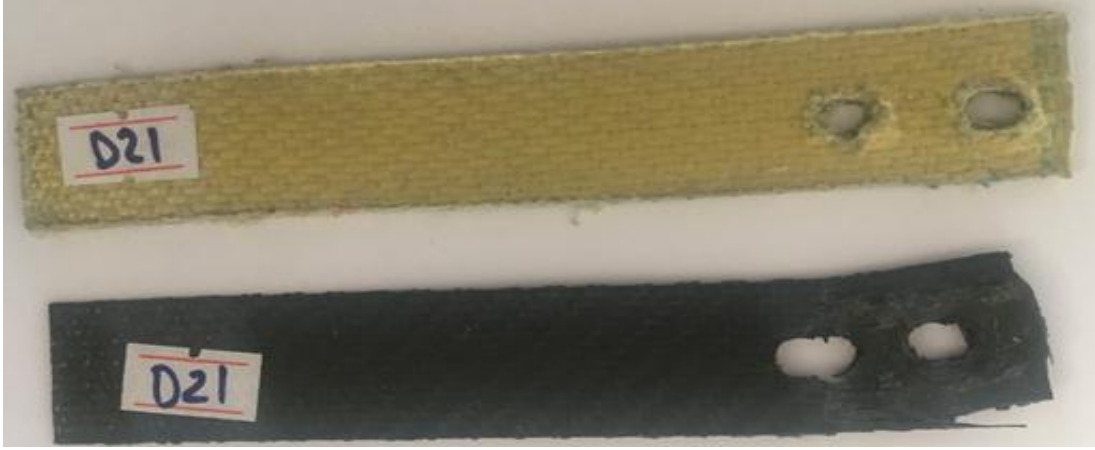
Şekil 3.71’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.72. A/A/C/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.72’de 1. numunede 2283 N değerinde, 2. Numunede 2099 N değerinde, 3. numunede ise 2042 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



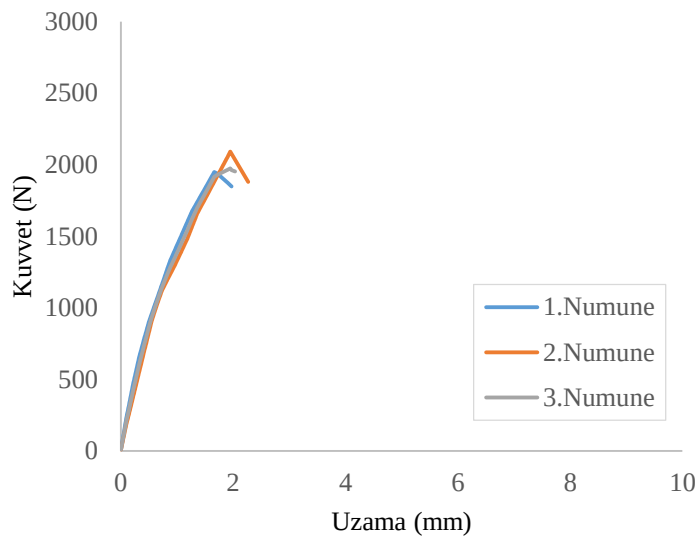
Şekil 3.73. A/A/C/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.73 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.15. A/C/C/A Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 45,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-carbon-carbon-aramid dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

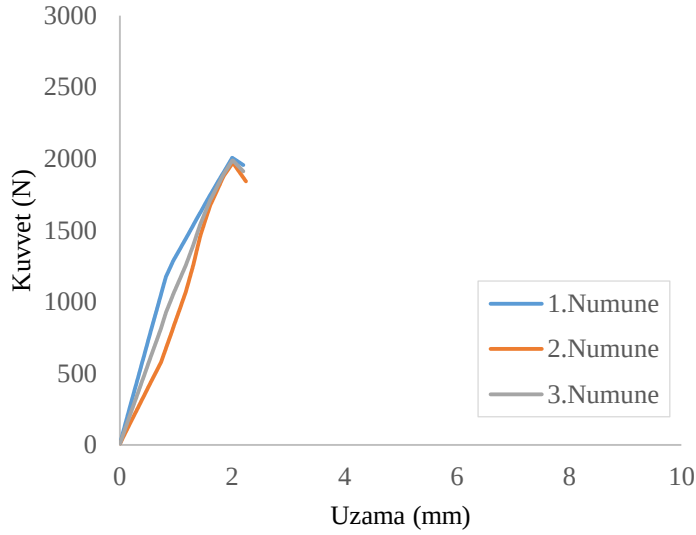
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.74. A/C/C/A tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.74’de 1. numunede 1948 N değerinde, 2. numunede 2091 N değerinde, 3. numunede ise 1974 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.75. A/C/C/A tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

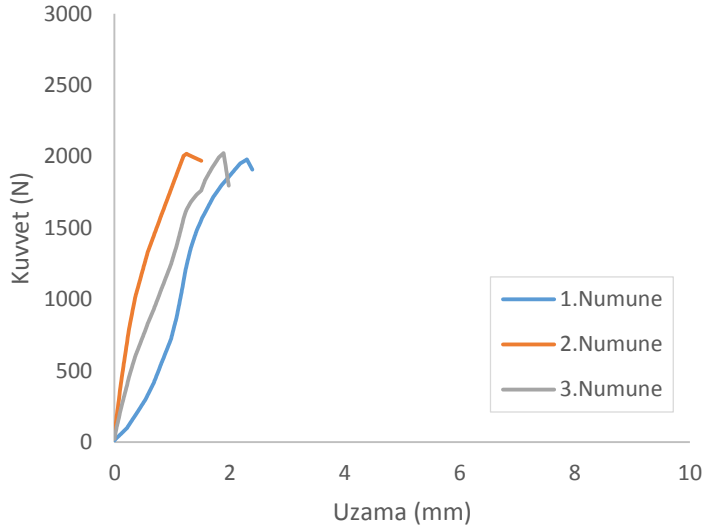
Şekil 3.75’de 1. numunede 2006 N değerinde, 2. numunede 1971 N değerinde, 3. numunede ise 1987 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.76. A/C/C/A tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.76’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.77. A/C/C/A çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.77’de 1. numunede 1979 N değerinde, 2. numunede 2019 N değerinde, 3. numunede ise 1999 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



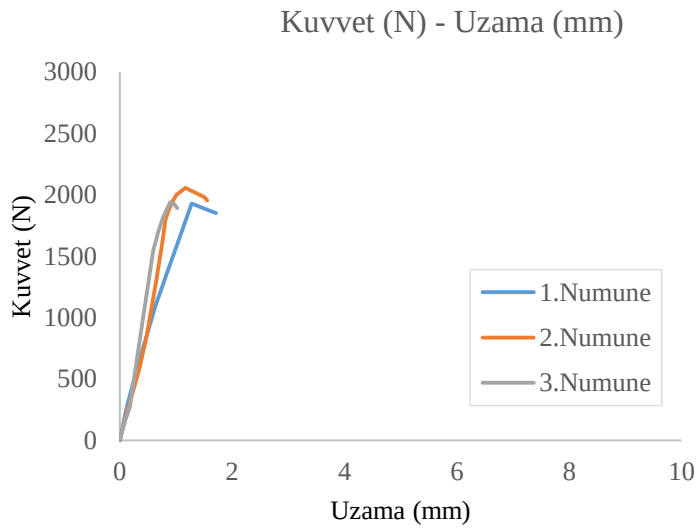
Şekil 3.78. A/C/C/A çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.78 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada yırtılma meydana gelmiştir.

3.1.16. C/A/A/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 45,30 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı carbon-aramid-aramid-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

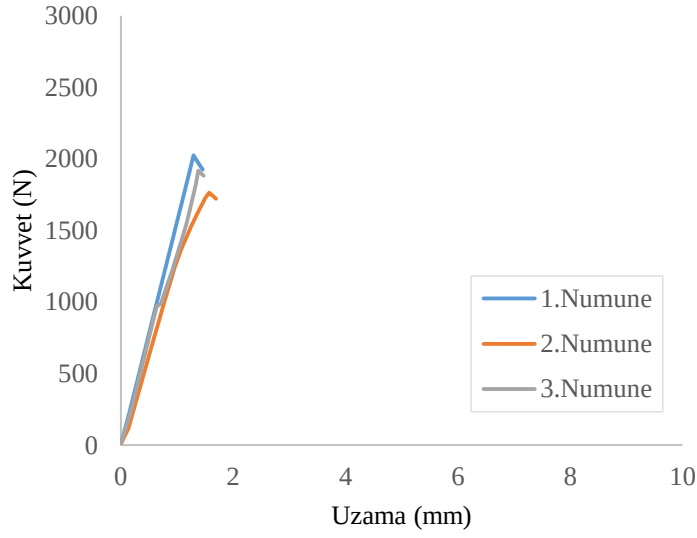
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.79. C/A/A/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.79'da 1. numunede 1928 N değerinde, 2. numunede 2055 N değerinde, 3. numunede ise 1939 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.80. C/A/A/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

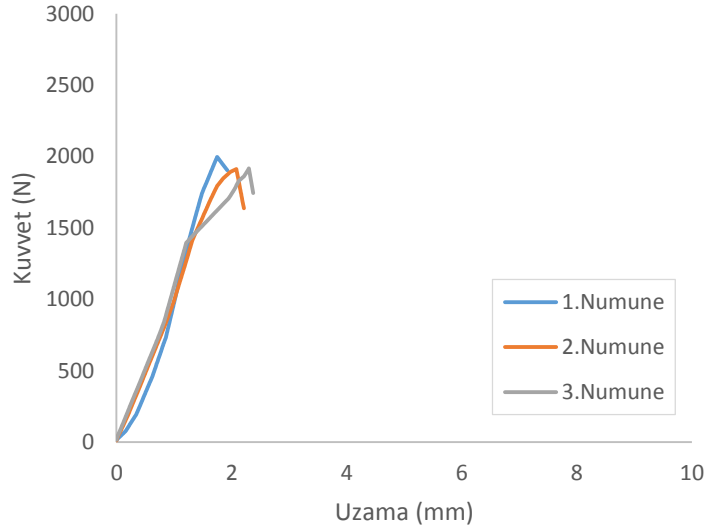
Şekil 3.80’de 1. numunede 2024 N değerinde, 2. numunede 1763 N değerinde, 3. numunede ise 1916 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.81. C/A/A/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.81 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.82. C/A/A/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 1996 N değerinde, 2. numunede 1911 N değerinde, 3. numunede ise 1916 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.82).



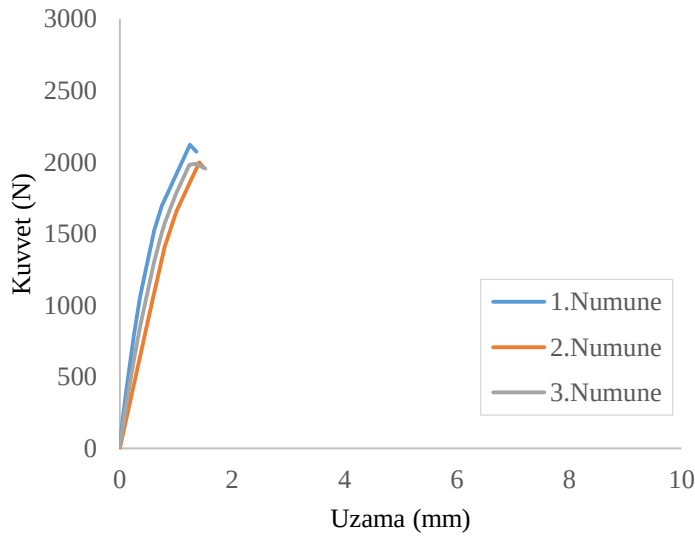
Şekil 3.83. C/A/A/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.83 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.17. C/G/C/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 44 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı carbon-glass-carbon-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

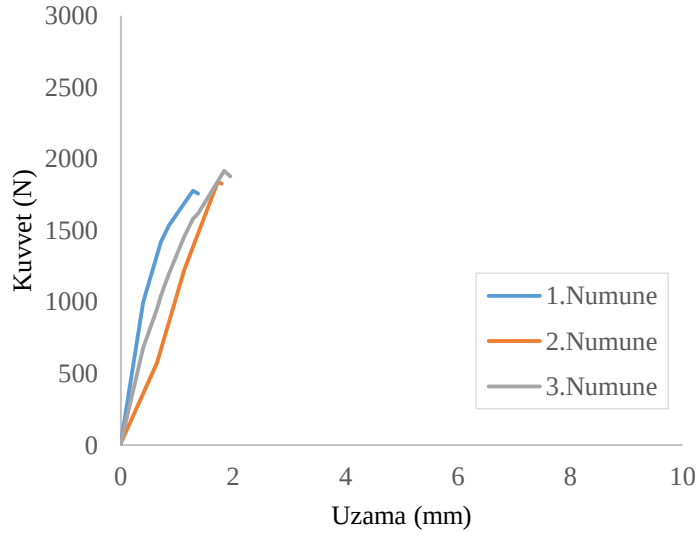
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.84. C/G/C/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 2121 N değerinde, 2. numunede 1997 N değerinde, 3. numunede ise 1988 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.84).

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.85. C/G/C/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

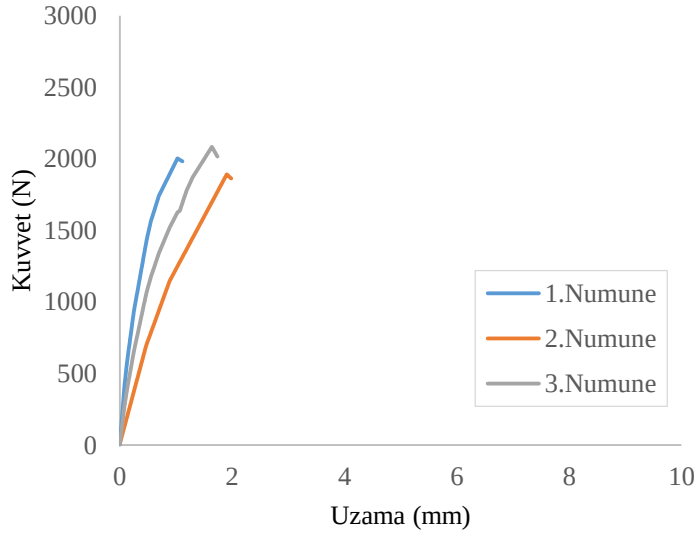
Şekil 3.85’de 1. numunede 1776 N değerinde, 2. numunede 1834 N değerinde, 3. numunede ise 1916 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.86. C/G/C/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.86 ’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.87. C/G/C/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.87’de 1. numunede 2002 N değerinde, 2. numunede 1891 N değerinde, 3. numunede ise 2083 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



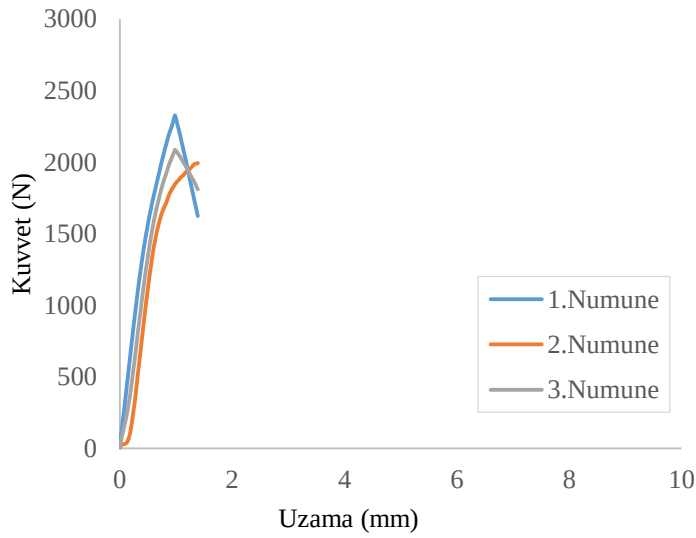
Şekil 3.88. C/G/C/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.88 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada ezilme meydana gelmiştir.

3.1.18. G/G/C/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 44 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı glass-glass-carbon-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

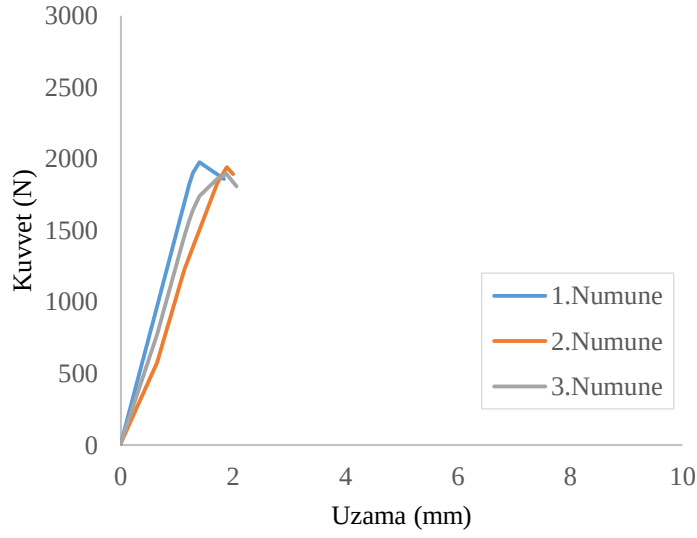
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.89. G/G/C/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.89'da 1. numunede 2327 N değerinde, 2. numunede 2456 N değerinde, 3. numunede ise 2086 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.90. G/G/C/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

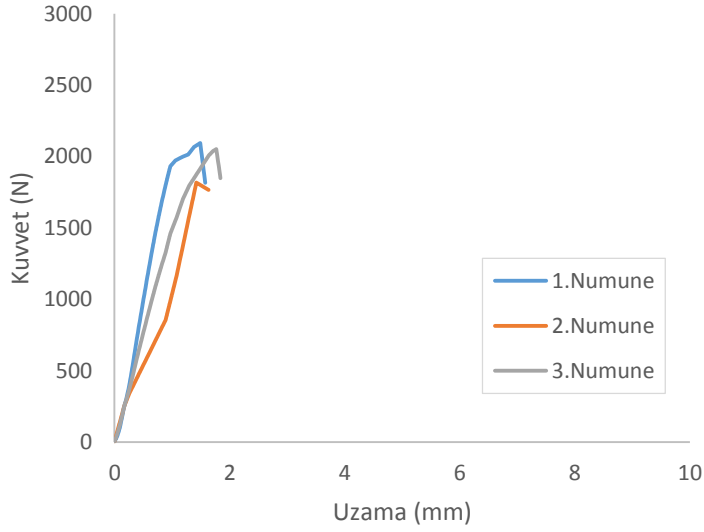
1. numunede 1975 N değerinde, 2. numunede 1941 N değerinde, 3. numunede ise 1898 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.90).



Şekil 3.91. G/G/C/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.91 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üsteki parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.92. G/G/C/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.92’de 1. numunede 2093 N değerinde, 2. numunede 1817 N değerinde, 3. numunede ise 2020 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



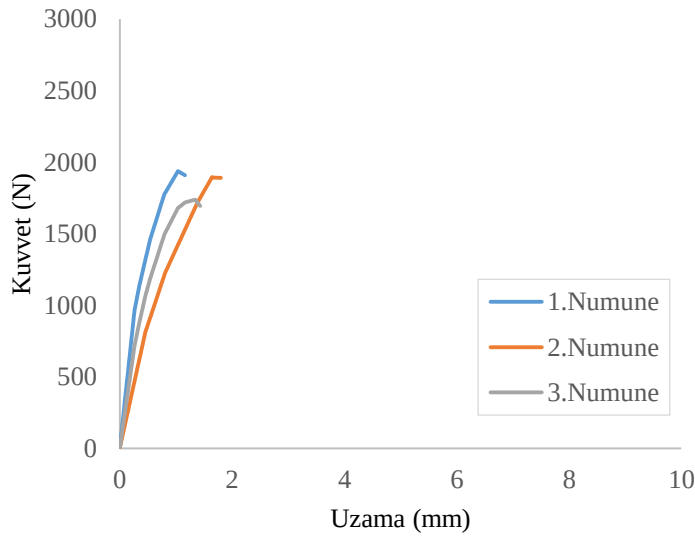
Şekil 3.93. G/G/C/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.93’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.19. C/G/G/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 44 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı carbon-glass-glass-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

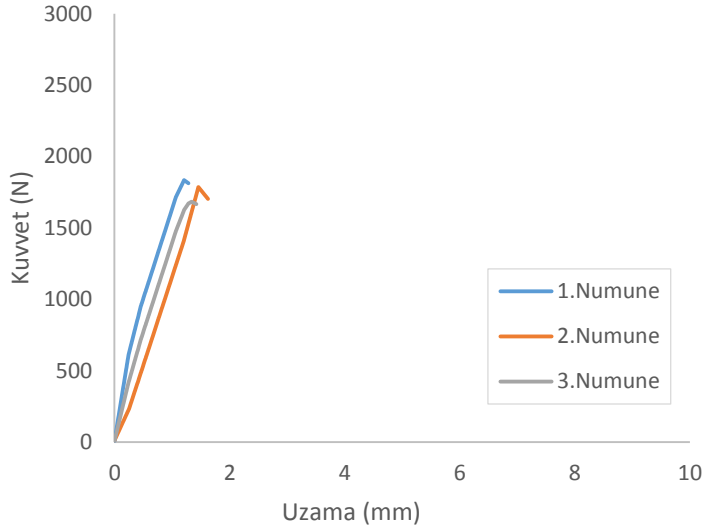
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.94. C/G/G/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.94’de 1. numunede 1937 N değerinde, 2. numunede 1895 N değerinde, 3. numunede ise 1737 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.95. C/G/G/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

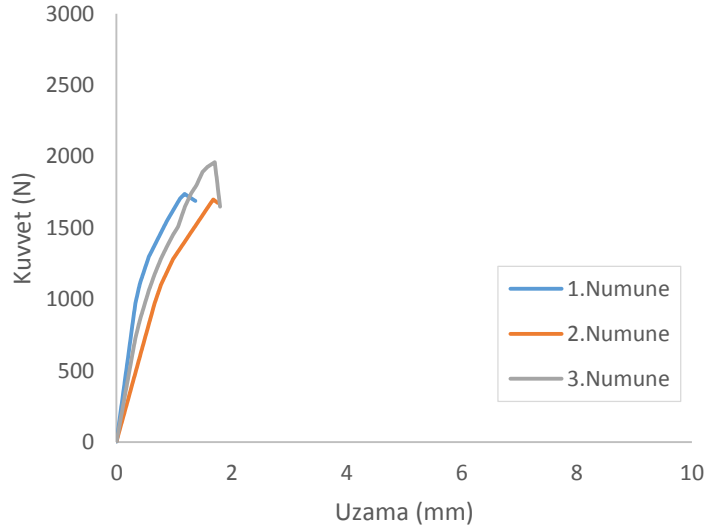
Şekil 3.95’de 1. numunede 1834 N değerinde, 2. numunede 1785 N değerinde, 3. numunede ise 1683 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.96. C/G/G/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.96’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.97. C/G/G/C çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.97’de 1. numunede 1737 N değerinde, 2. numunede 1698 N değerinde, 3. numunede ise 1959 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



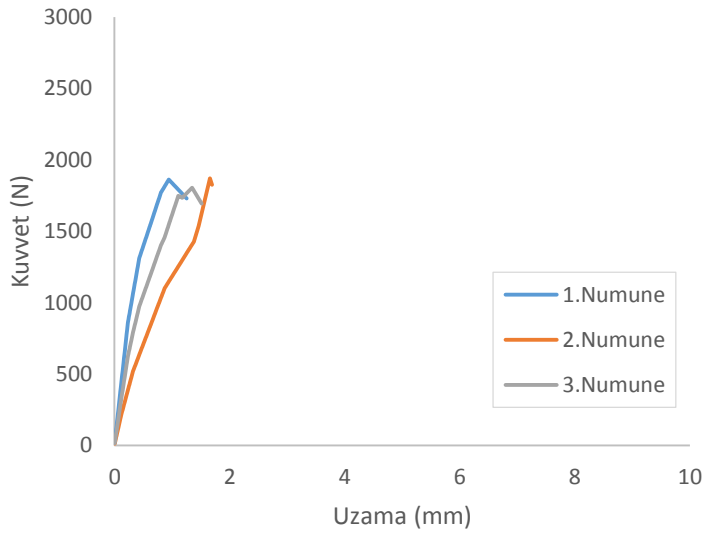
Şekil 3.98. C/G/G/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

Şekil 3.98’ de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.20. G/C/C/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 44 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 18 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı glass-carbon-carbon-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

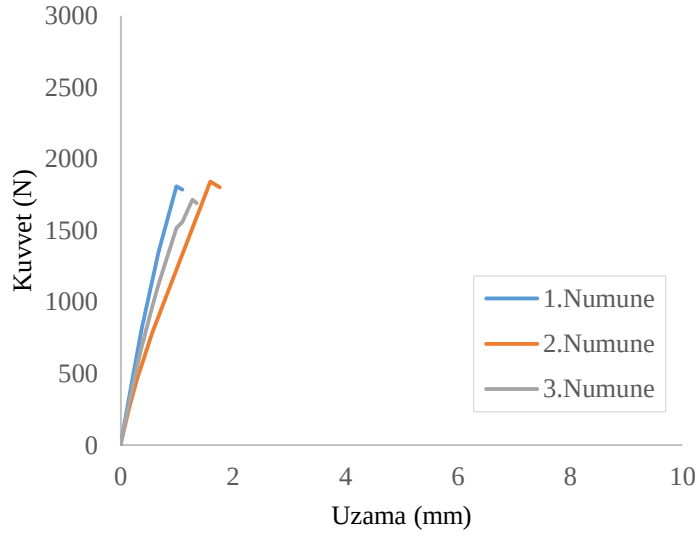
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.99. G/C/C/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet- uzama grafiği.

Şekil 3.99'da 1. numunede 1861 N değerinde, 2. numunede 1870 N değerinde, 3. numunede ise 1804 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.100. G/C/C/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

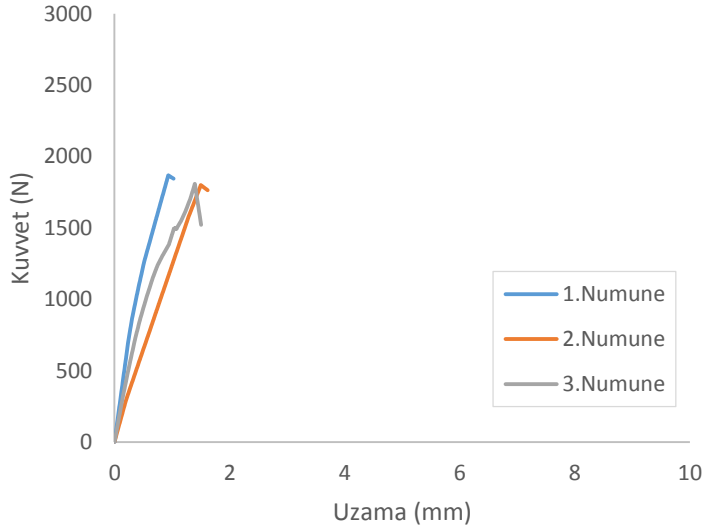
Şekil 3.100'de 1. numunede 1807 N değerinde, 2. numunede 1841 N değerinde, 3. numunede ise 1713 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.101. G/C/C/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.101 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.102. G/C/C/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.102’de 1. numunede 1867 N değerinde, 2. numunede 1799 N değerinde, 3. numunede ise 1808 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



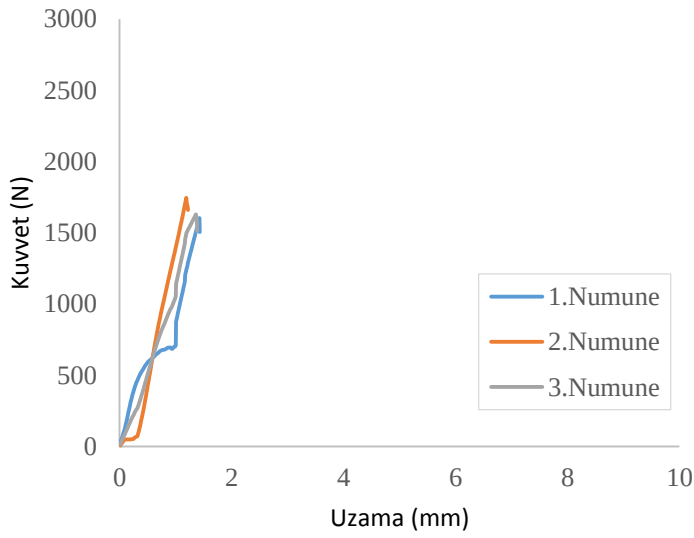
Şekil 3.103. G/C/C/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.103 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.21. C/H/C/H Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 36 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 14,40 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı carbon-hibrit-carbon-hibrit dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

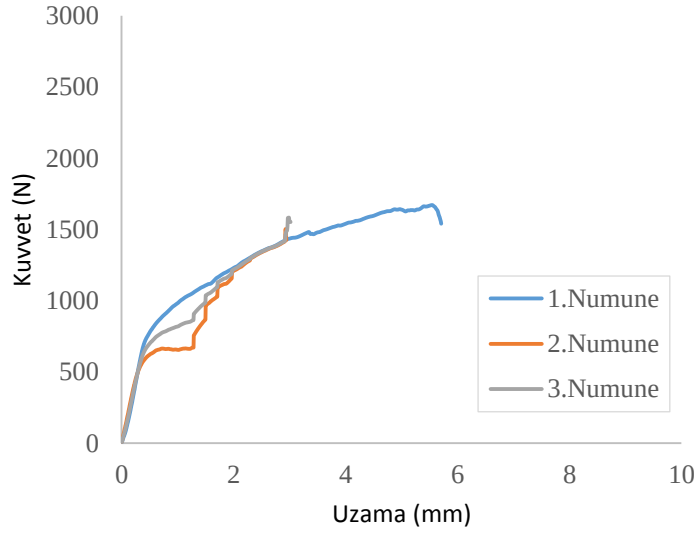
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.104. C/H/C/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.104'de 1. Numunede 1603 N değerinde, 2. Numunede 1745 N değerinde, 3. numunede ise 1629 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.105. C/H/C/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

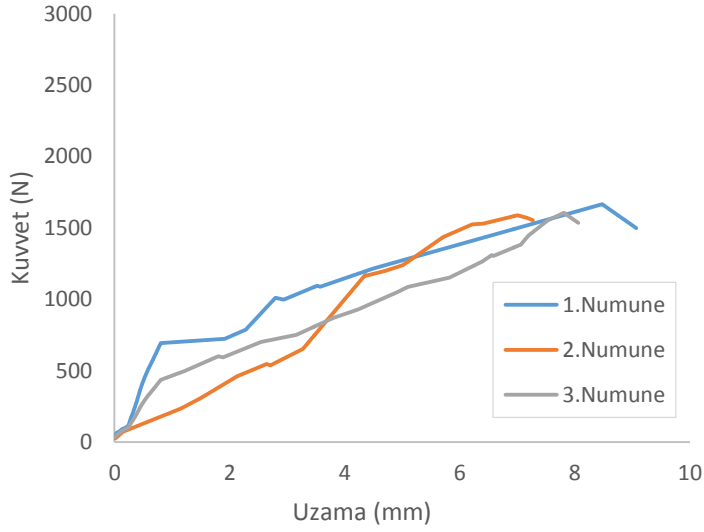
Şekil 3.105’de 1. numunede 1670 N değerinde, 2. numunede 1502 N değerinde, 3. numunede ise 1582 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.106. C/H/C/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.106’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.107. C/H/C/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.107’de 1. numunede 1665 N değerinde, 2. numunede 1588 N değerinde, 3. numunede ise 1605 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



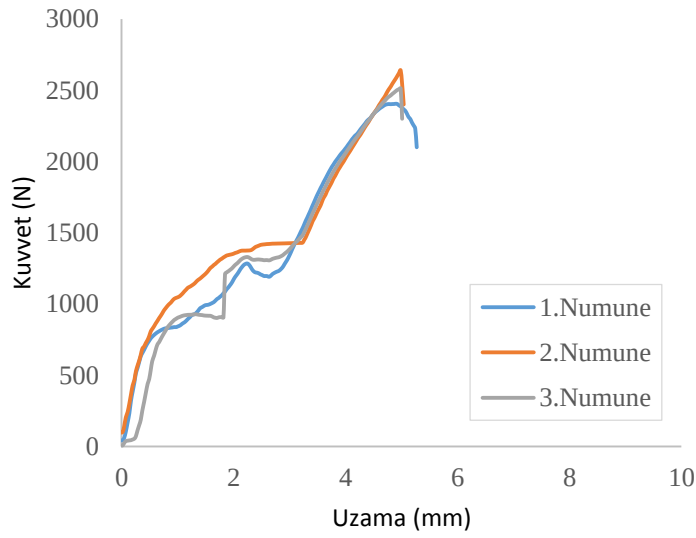
Şekil 3.108. C/H/C/H çift delik numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.108’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.22.C/C/H/H Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 36 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 15 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı karbon-karbon-hibrit-hibrit dizilimli tabakalı hibrit kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

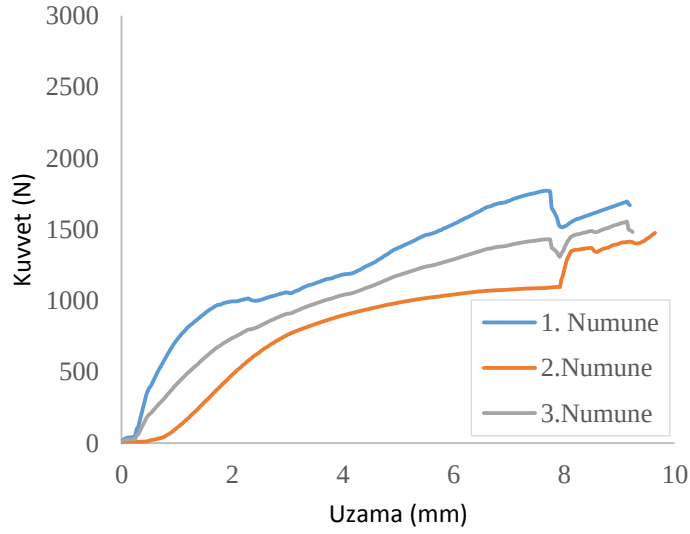
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.109. C/C/H/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.109'da 1. numunede 2405 N değerinde, 2. numunede 2639 N değerinde, 3. numunede ise 2513 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.110. C/C/H/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

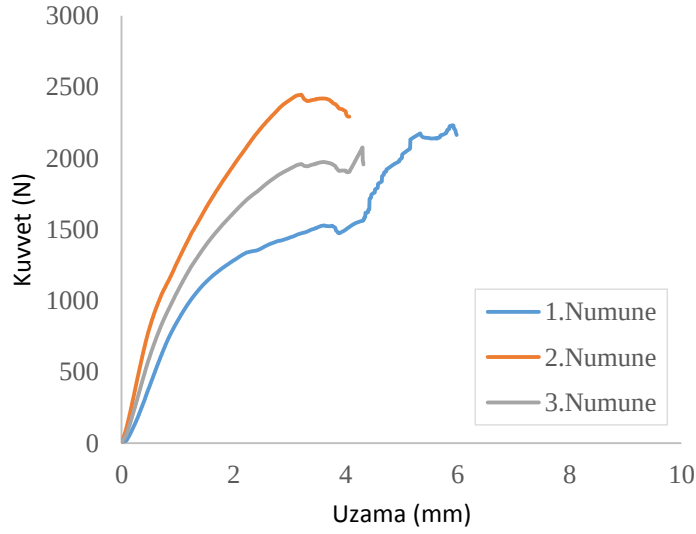
Şekil 3.110’da 1. Numunede 1769 N değerinde, 2. Numunede 1475 N değerinde, 3.numunede ise 1553 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.111. C/C/H/H tek delikli numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.111’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.112. C/C/H/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.112’de 1. numunede 2230 N değerinde, 2. numunede 2418 N değerinde, 3. numunede ise 2075 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



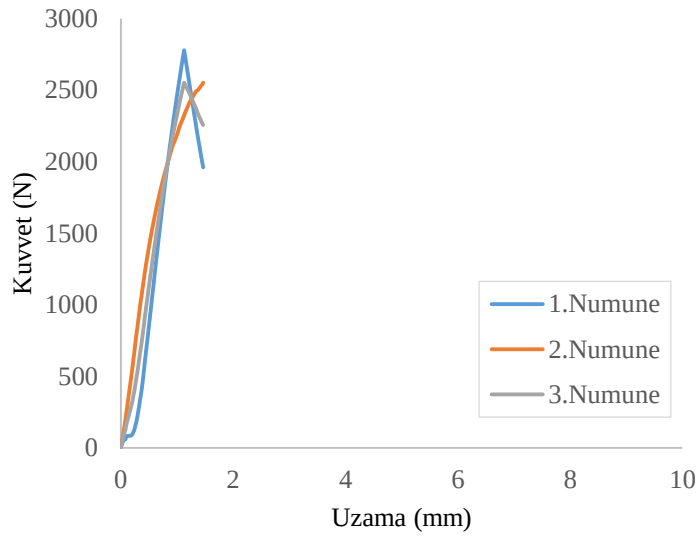
Şekil 3.113. C/C/H/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

Şekil 3.113’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.23. C/H/H/C Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 36 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 14,40 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı carbon-hibrit-hibrit-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

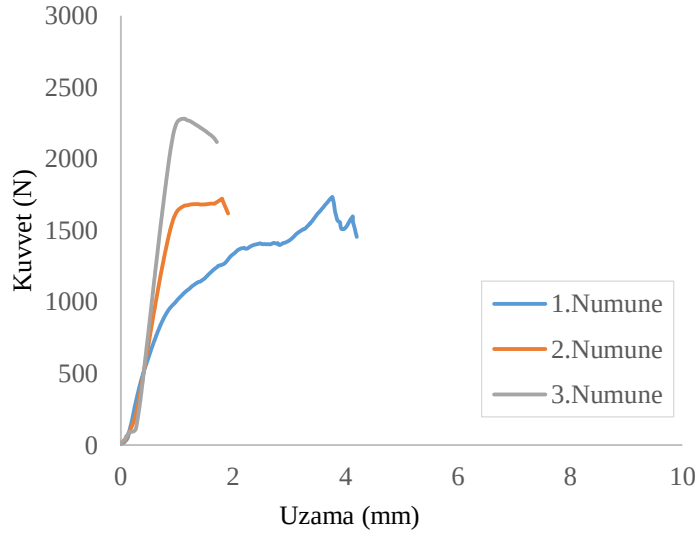
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.114. C/H/H/C tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.114'de 1. numunede 2778 N değerinde, 2. numunede 2601 N değerinde, 3. numunede ise 2547 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.115. C/H/H/C tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

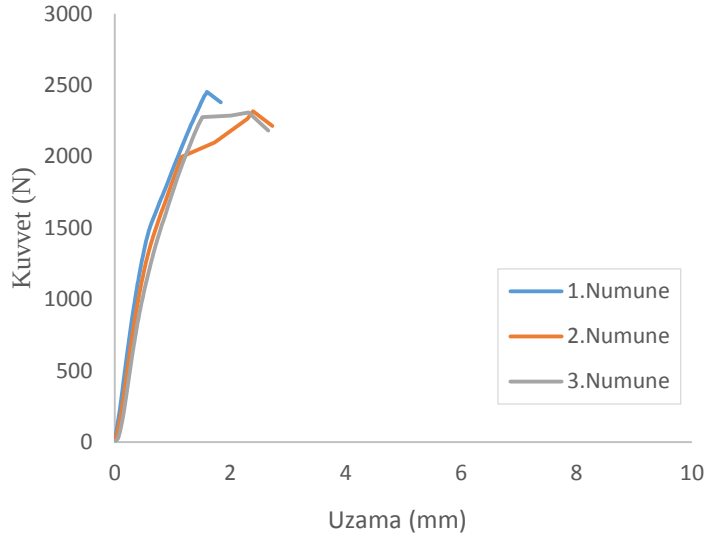
Şekil 3.115’de 1. numunede 1734 N değerinde, 2. numunede 1721 N değerinde, 3. numunede ise 2279 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.116. C/H/H/C tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.116’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.117. H/C/C/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. numunede 2452 N değerinde, 2. numunede 2316 N değerinde, 3. numunede ise 2308 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.117).



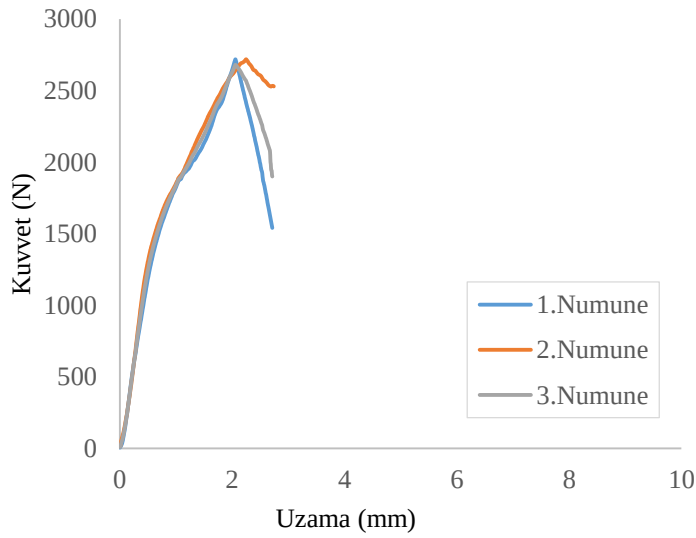
Şekil 3.118. C/H/H/C çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

Şekil 3.118 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.24. H/C/C/H Dizilimli Tabakalı Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 36 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 14,40 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-carbon-carbon-hibrit dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

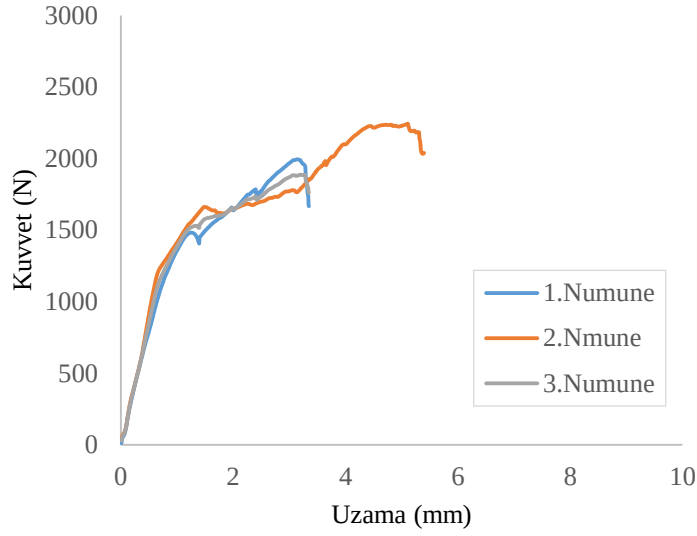
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.119. H/C/C/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.119'da 1. numunede 2695 N değerinde, 2. numunede 2718 N değerinde, 3. numunede ise 2298 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.120. H/C/C/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

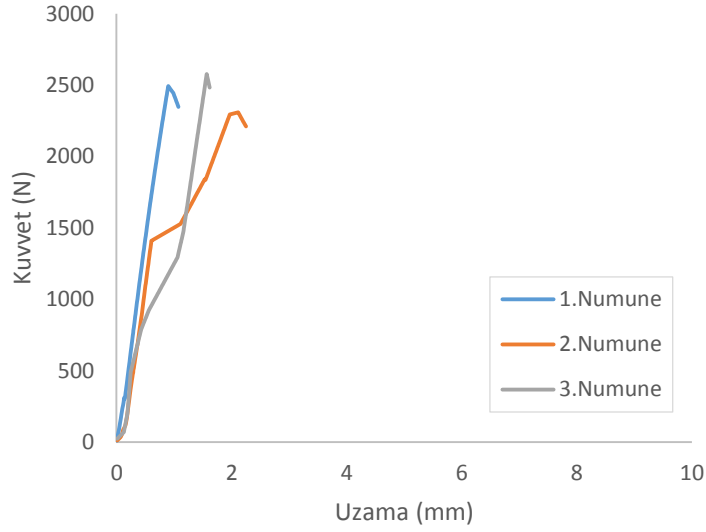
Şekil 3.120’de 1. numunede 1994 N değerinde, 2. numunede 2235 N değerinde, 3. numunede ise 1886 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.121. H/C/C/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.121’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.122. H/C/C/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.122’de 1. numunede 2492 N değerinde, 2. numunede 2309 N değerinde, 3. numunede ise 2577 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



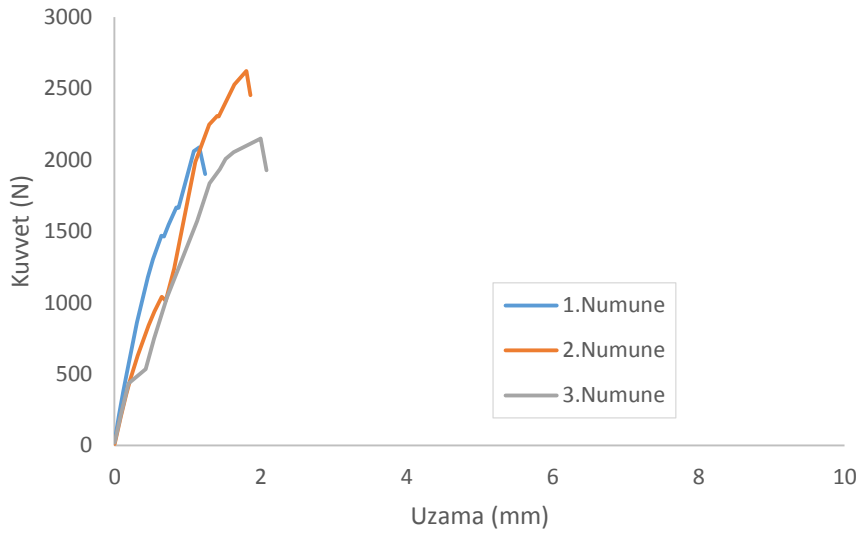
Şekil 3.123. H/C/C/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

Şekil 3.123’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada ise delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.25. H/G/H/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 41 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-glass-hibrit-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

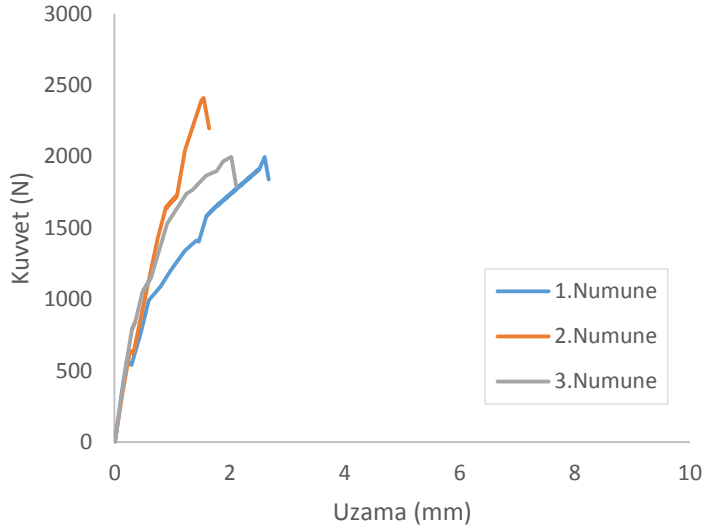
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.124. H/G/H/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

1. Numunede 2187 N değerinde, 2. Numunede 2612 N değerinde, 3.numunede ise 2148 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.124).

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.125. H/G/H/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

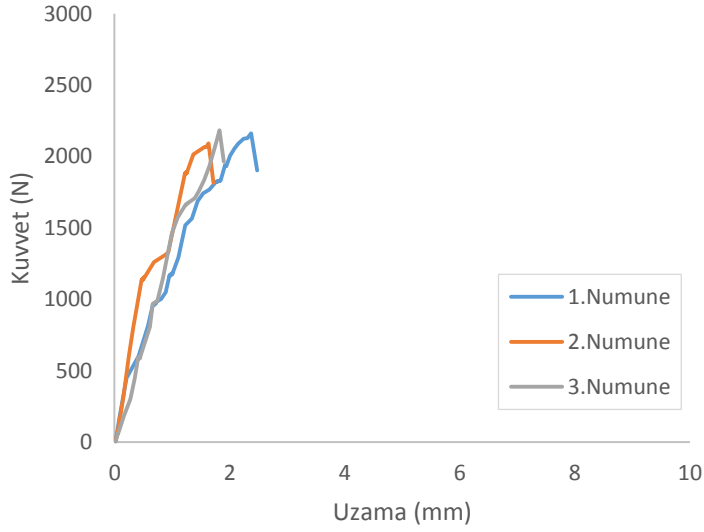
1. numunede 1996 N değerinde, 2. numunede 2409 N değerinde, 3. numunede ise 1993 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir (Şekil 3.125).



Şekil 3.126. H/G/H/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.126'da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.127. H/G/H/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.127’de 1. numunede 2161 N değerinde, 2. numunede 2091 N değerinde, 3. numunede ise 2183 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



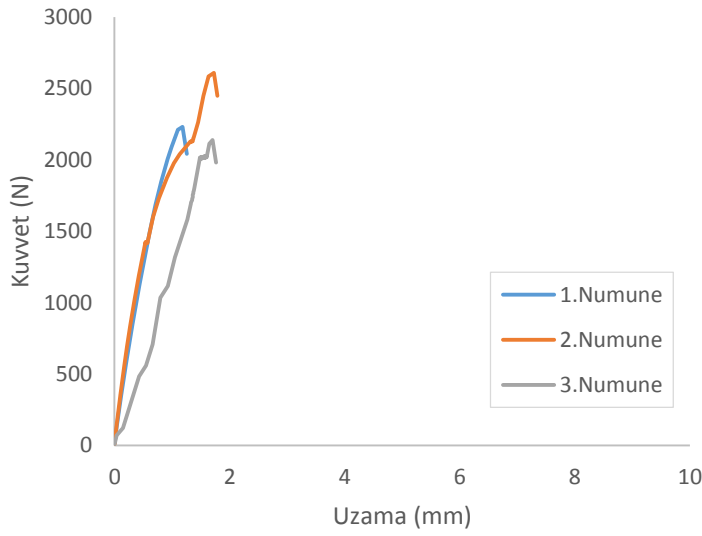
Şekil 3.128. H/G/H/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.128’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.26. H/H/G/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 41 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-hibrit-glass-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

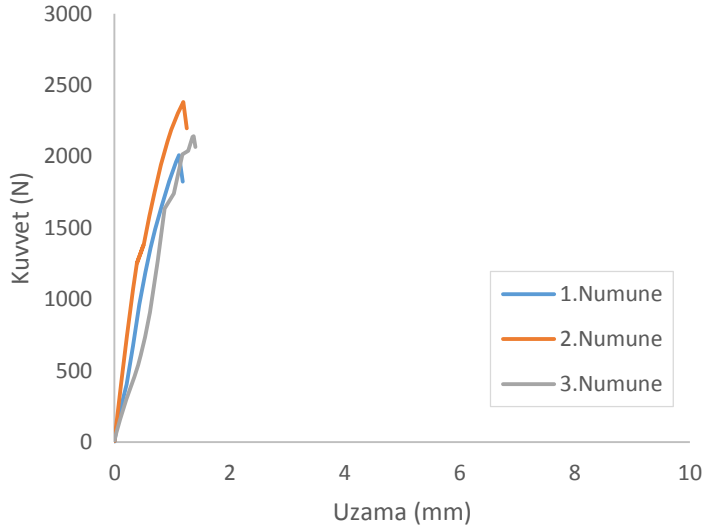
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.129. H/H/G/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.129'da 1. numunede 2230 N değerinde, 2. numunede 2608 N değerinde, 3. numunede ise 2138 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.130. H/H/G/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

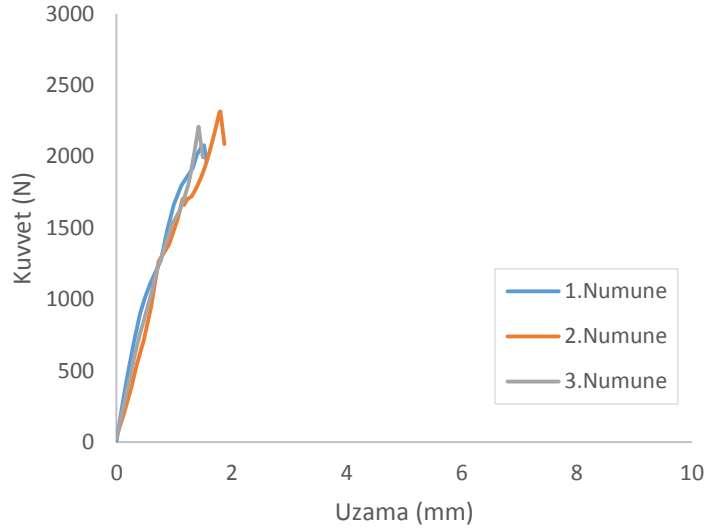
Şekil 3.130’da 1. numunede 2008 N değerinde, 2. numunede 2381 N değerinde, 3. numunede ise 2141 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.131. H/H/G/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

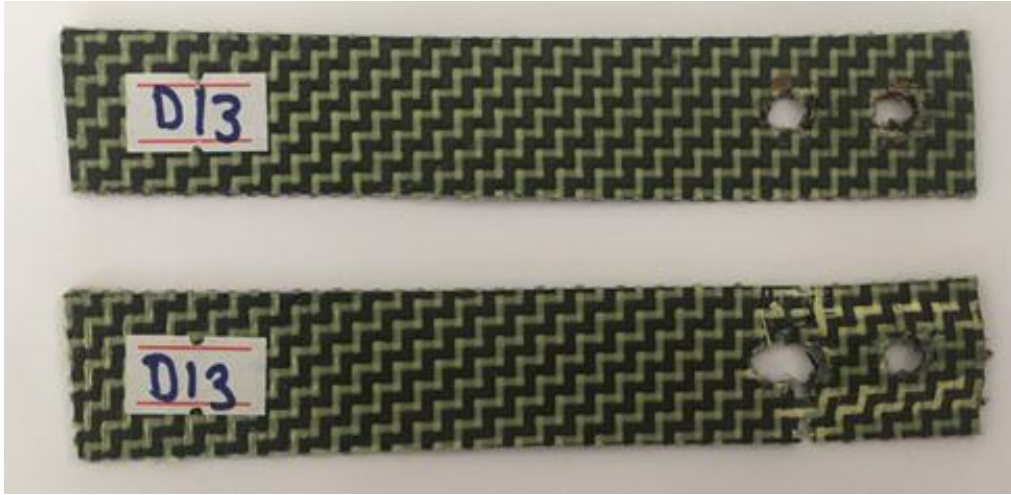
Şekil 3.131’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucuna göre;



Şekil 3.132. H/H/G/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.132’de 1. numunede 2078 N değerinde, 2. numunede 2315 N değerinde, 3. numunede ise 2208 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



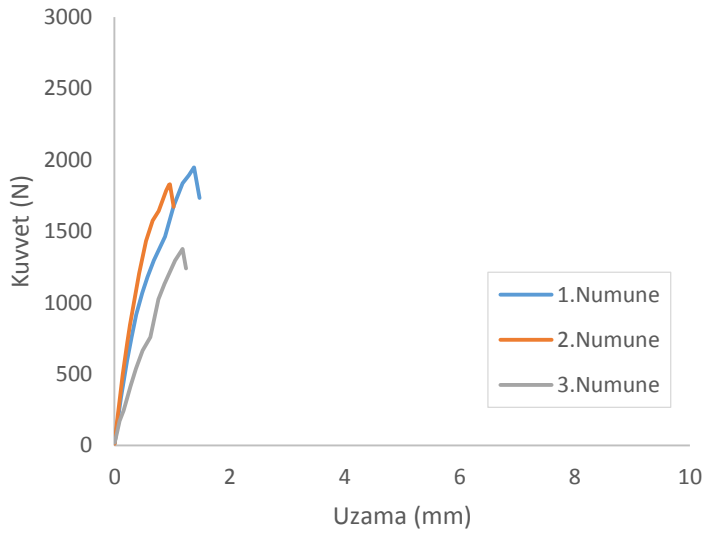
Şekil 3.133. H/H/G/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.133 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde, üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.27. H/G/G/H Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka İçin Deney Sonucu

Toplam kumaş ağırlığı 41 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-glass-glass-hibrit dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

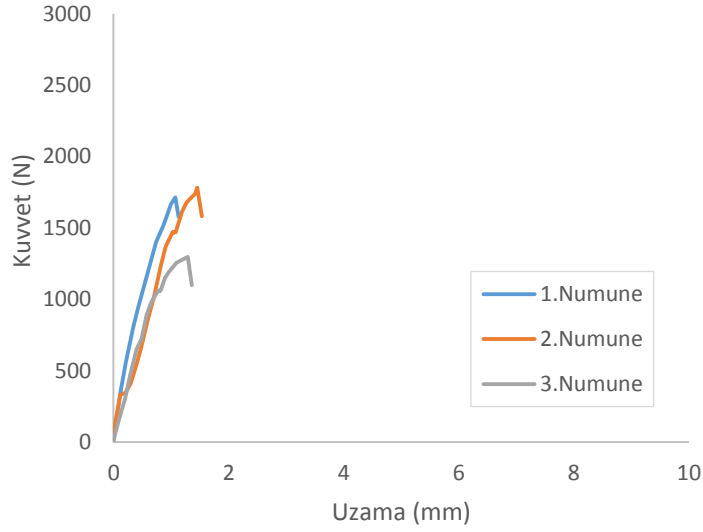
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.134. H/G/G/H tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.134'de 1. numunede 1946 N değerinde, 2. numunede 1828 N değerinde, 3. numunede ise 1375 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.135. H/G/G/H tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

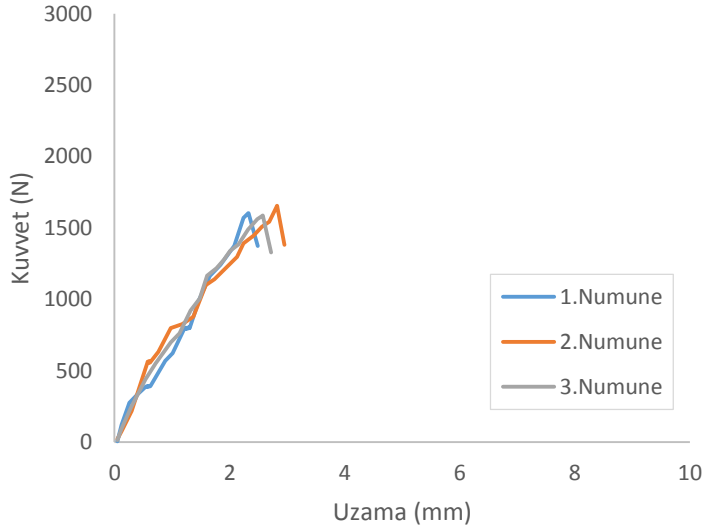
Şekil 3.135’de 1. numunede 1712 N değerinde, 2. numunede 1780 N değerinde, 3. numunede ise 1296 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.136. H/G/G/H tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.136’da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.137. H/G/G/H çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.137’de 1. numunede 1602 N değerinde, 2. numunede 1654 N değerinde, 3. numunede ise 1586 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



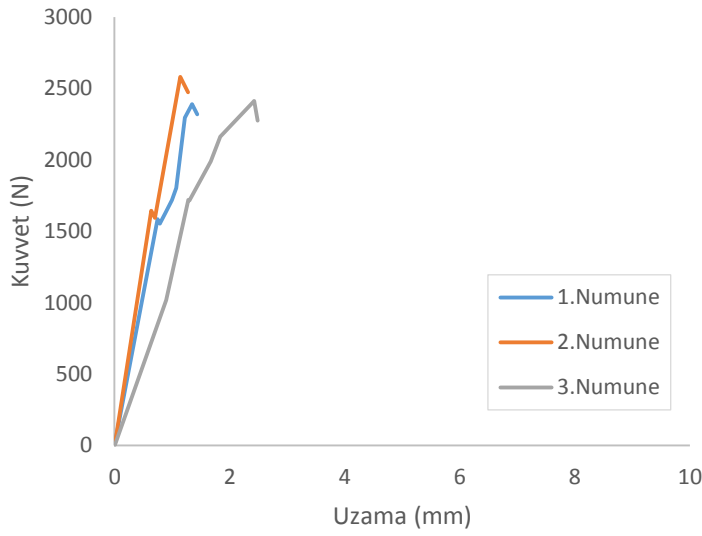
Şekil 3.138. H/G/G/H çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

Şekil 3.138’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde, üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.28. G/H/H/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 41 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 17 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı glass-hibrit-hibrit-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

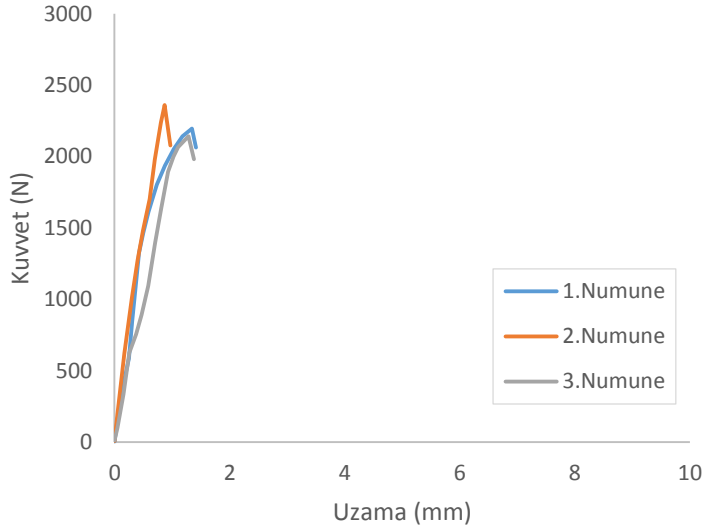
a) Tabakalı deliksiz kompozit numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.139. G/H/H/G tabakalı deliksiz kompozit numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.139'da 1. numunede 2389 N değerinde, 2. numunede 2580 N değerinde, 3. numunede ise 2412 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.

b) Tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.140. G/H/H/G tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

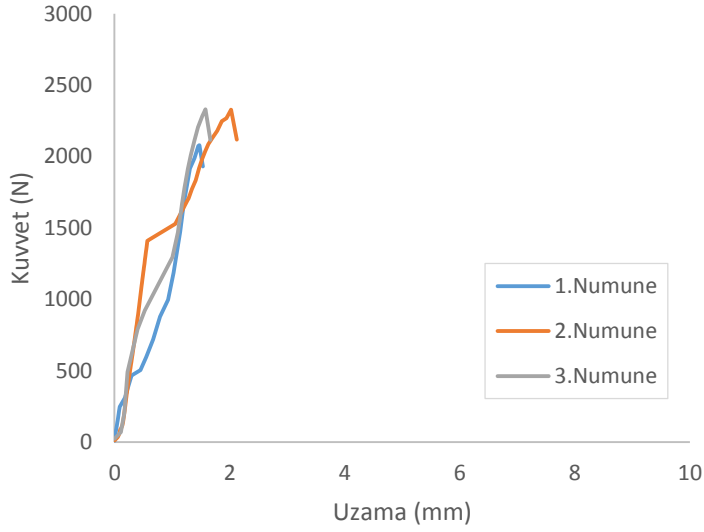
Şekil 3.140’da 1. numunede 2195 N değerinde, 2. numunede 2359 N değerinde, 3. numunede ise 2141 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.141. G/H/H/G tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

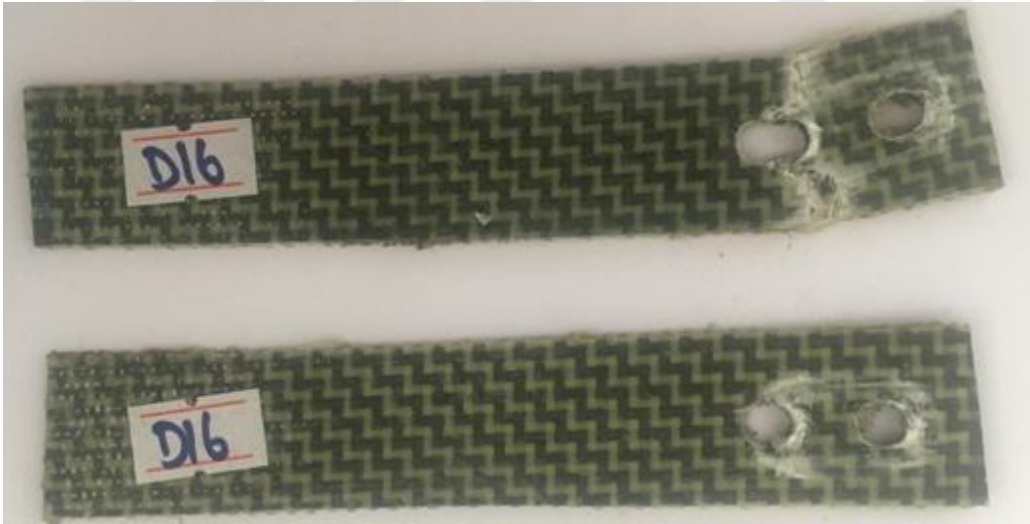
Şekil 3.141’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde her iki parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

c) Çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.142. G/H/H/G çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.142’de 1. numunede 2078 N değerinde, 2. numunede 2327 N değerinde, 3. numunede ise 2330 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



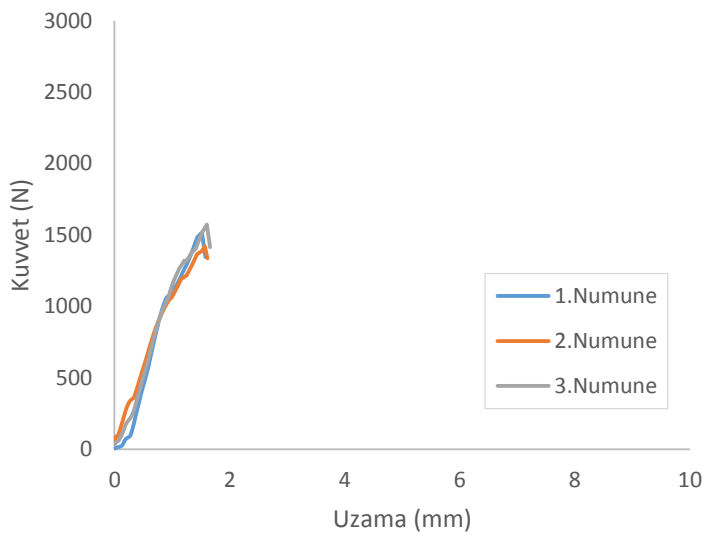
Şekil 3.143. G/H/H/G çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.143’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

3.1.29. G/G/G/G Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

Toplam kumaş ağırlığı 50 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı olan 20 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı glass-glass-glass-glass dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler araldite 2000 yapıştırıcı ile önce yapıştırılmış ardından tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

a) Yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.144. G/G/G/G yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

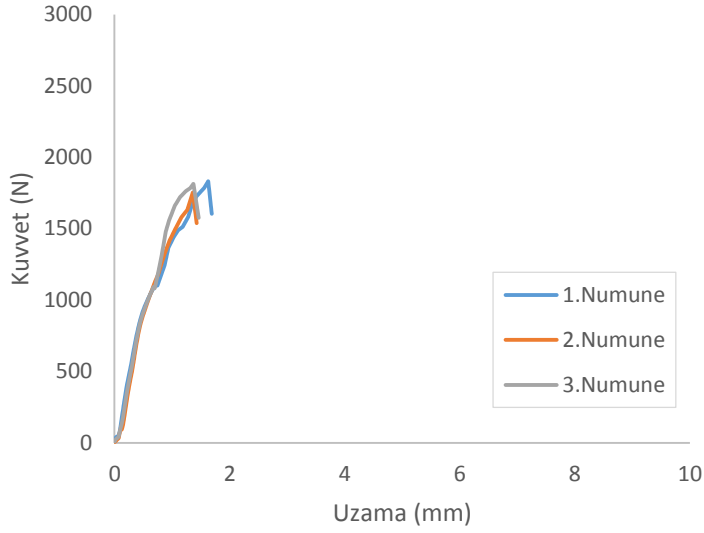
Şekil 3.144'de 1. numunede 1519 N değerinde, 2. numunede 1422 N değerinde, 3. numunede ise 1573 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.145. G/G/G/G yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.145’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada yırtılma meydana gelmiştir.

b) Yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.146. G/G/G/G yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.146’da 1. numunede 1832 N değerinde, 2. numunede 1753 N değerinde, 3. numunede ise 1813 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



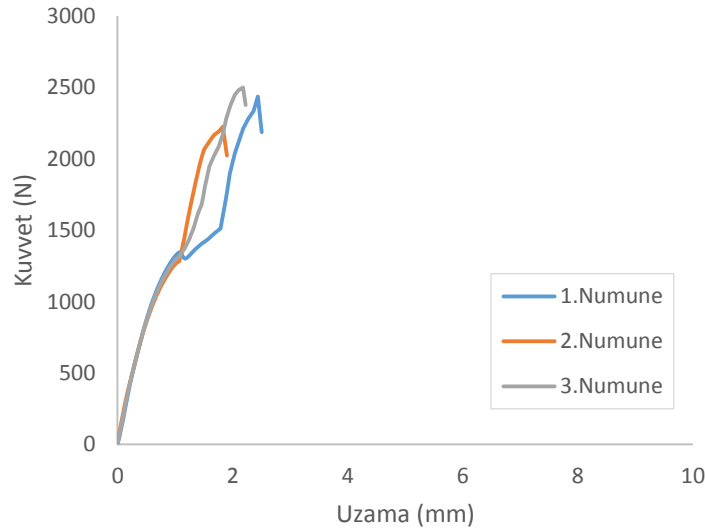
Şekil 3.147. G/G/G/G yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.147 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada yırtılma, alt parçada ve delikte ezilme levhada kesme meydana gelmiştir.

3.1.30. C/C/C/C Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

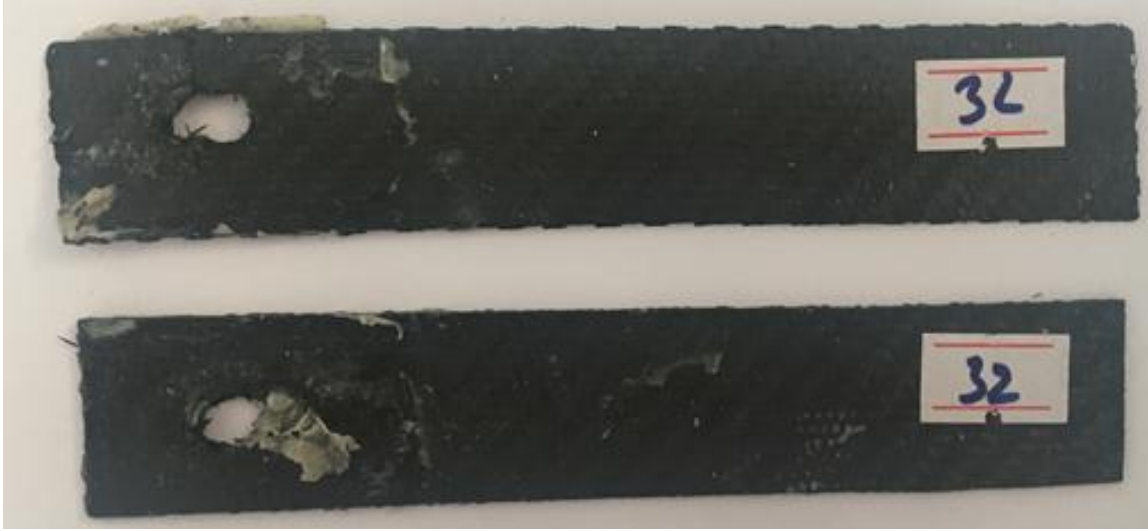
Toplam kumaş ağırlığı 38 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 15 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı carbon-carbon-carbon-carbon dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler araldite 2000 yapıştırıcı ile önce yapıştırılmış ardından tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

a) Yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.148. C/C/C/C yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

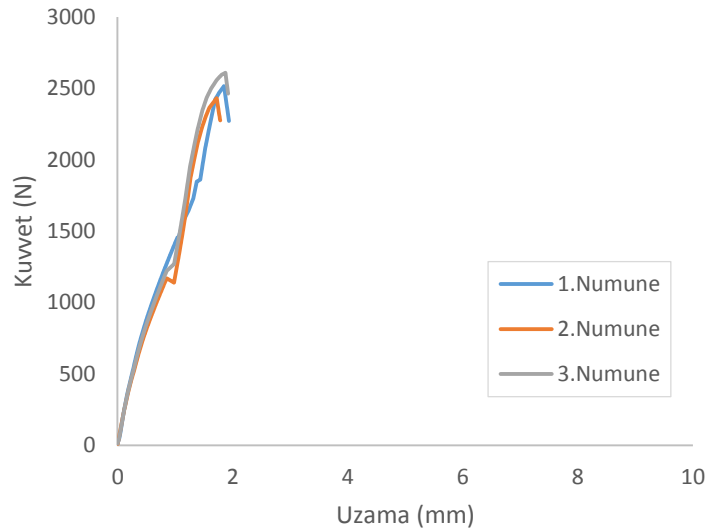
Şekil 3.148'de 1. numunede 2435 N değerinde, 2. numunede 2223 N değerinde, 3. numunede ise 2498 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.149. C/C/C/C yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.149 'da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçadaki delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada delikte ezilme meydana gelmiştir.

b) Yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.150. C/C/C/C yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.150'de 1. numunede 1455 N değerinde, 2. numunede 1169 N değerinde, 3. numunede ise 1290 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



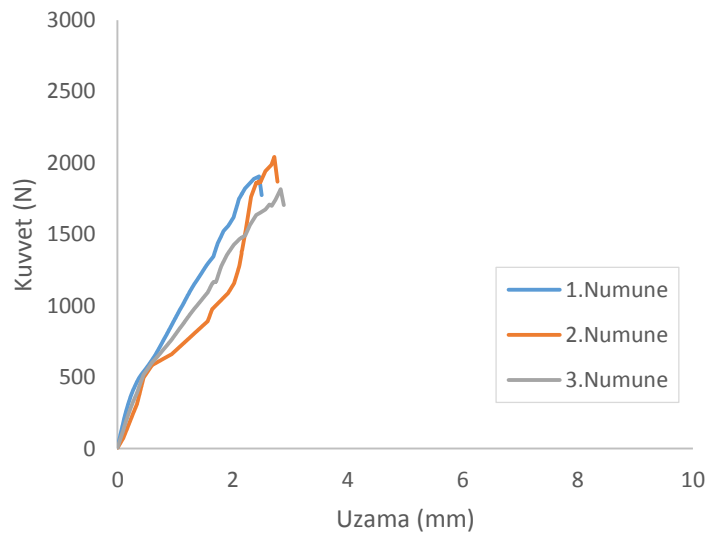
Şekil 3.151. C/C/C/C yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.151 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme, levhada kesme ve yırtılma meydana gelmiştir.

3.1.31. A/A/A/A Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka

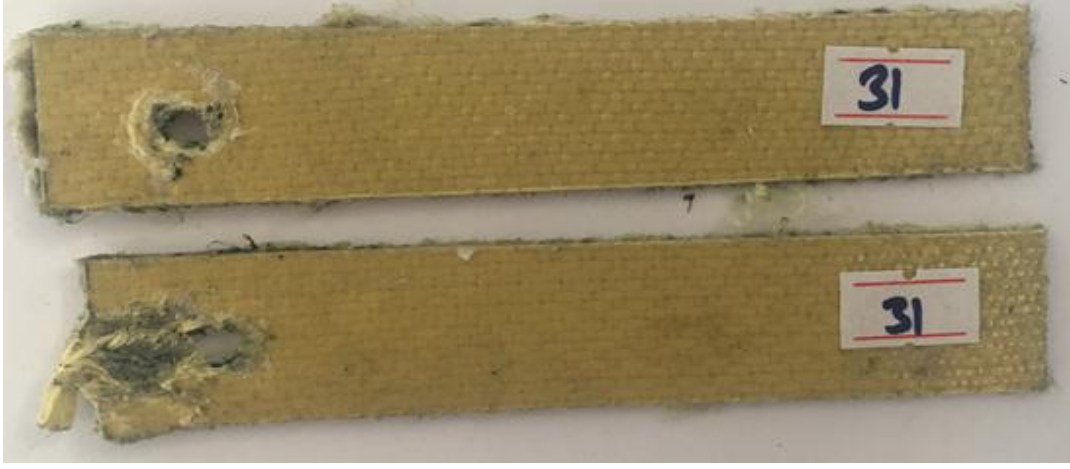
Toplam kumaş ağırlığı 52,6 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 21 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı aramid-aramid-aramid-aramid dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler araldite 2000 yapıştırıcı ile önce yapıştırılmış ardından tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

a) Yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.152. A/A/A/A yapıştırırmalı tek pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

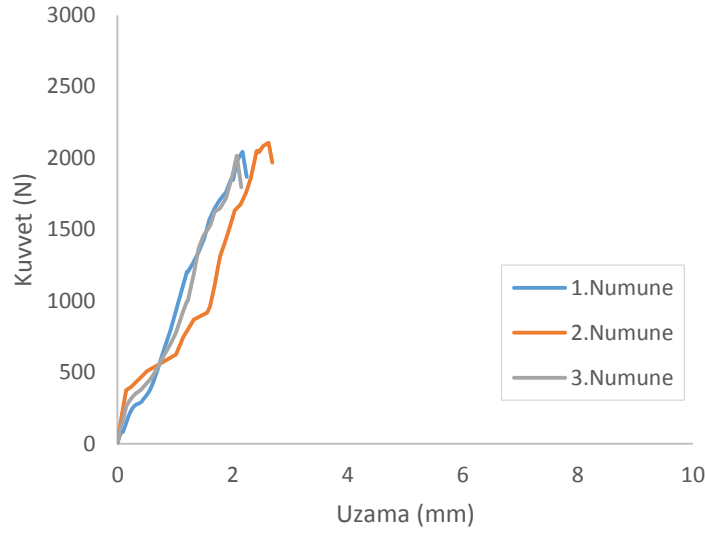
Şekil 3.152’de 1. numunede 1905 N değerinde, 2. numunede 2042 N değerinde, 3. numunede ise 1815 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.153. A/A/A/A yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü

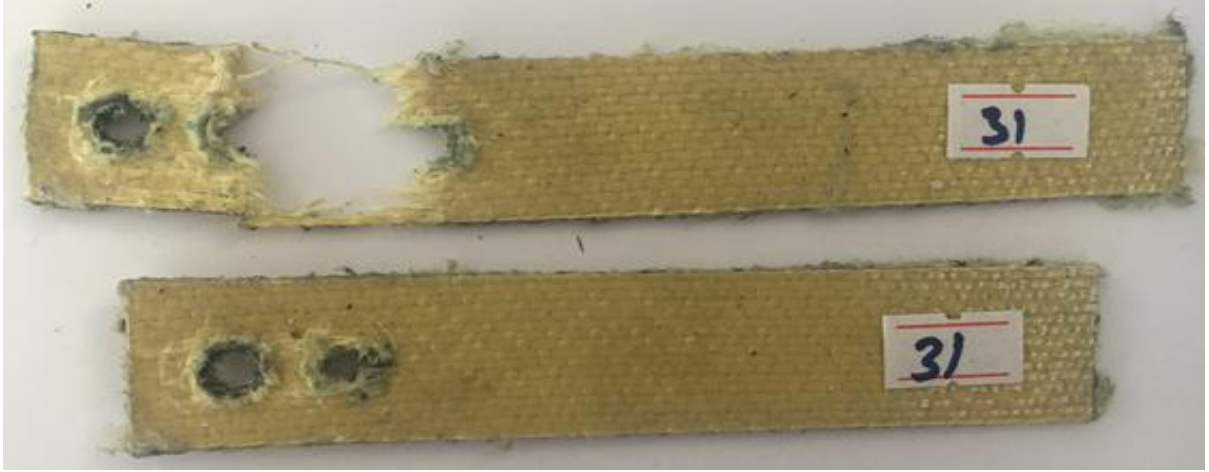
Şekil 3.153 ’de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada yırtılma meydana gelmiştir.

b) Yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.154. A/A/A/A yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.154’de 1. numunede 2044 N değerinde, 2. numunede 2107 N değerinde, 3. numunede ise 2016 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



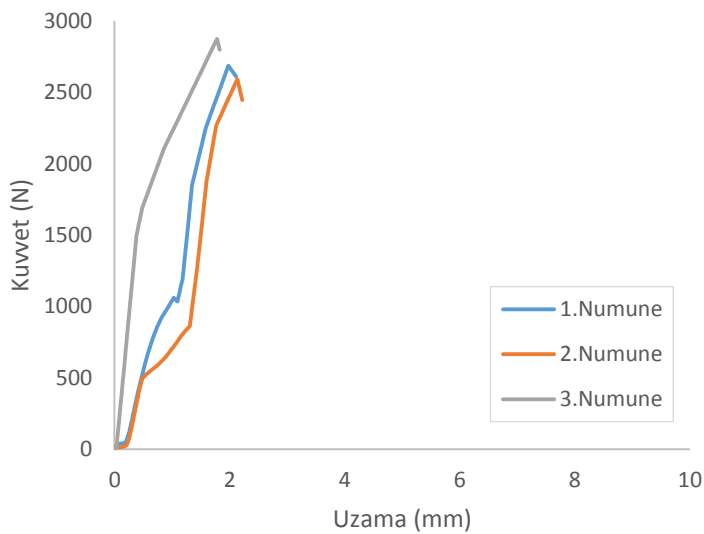
Şekil 3.155. A/A/A/A yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.155 'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçada delikte ezilme ve levhada kesme, alt parçada ezilme meydana gelmiştir.

3.1.32. H/H/H/H Dizilimli Hibrit Kompozit Plaka İçin Deney Sonucu

Toplam kumaş ağırlığı 32 gr, reçine miktarı kumaş ağırlığı kadar ve kumaş ağırlığının %40'ı 13 gr sertleştirici kullanılıp 4 tabakalı hibrit-hibrit-hibrit-hibrit dizilimli tabakalı kompozit plakanın üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu plakadan kesilen numuneler araldite 2000 yapıştırıcı ile önce yapıştırılmış ardından tek pim ve çift pimle birleştirilip çekme deneyi yapılmıştır.

a) Yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.156. H/H/H/H yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin kuvvet-uzama grafiği.

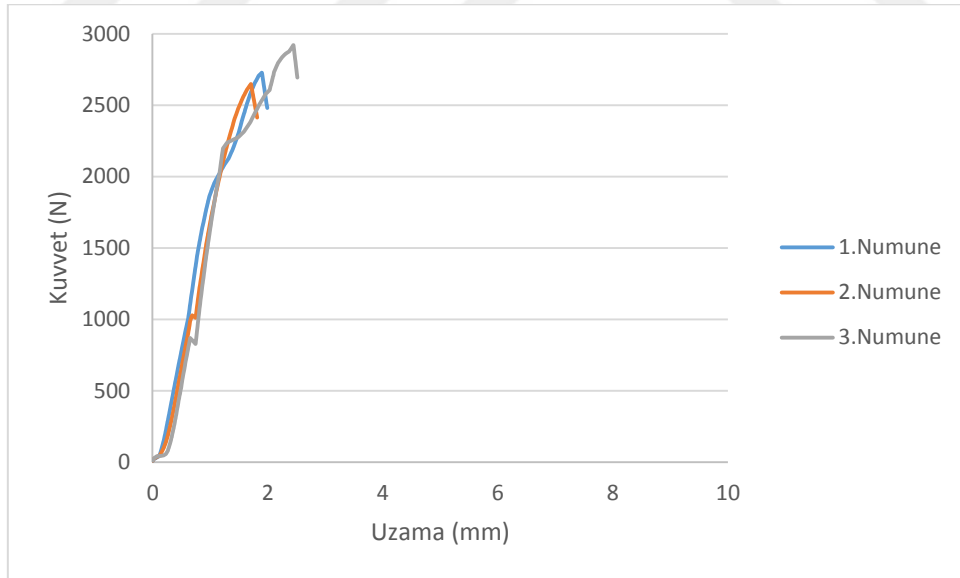
Şekil 3.156'da 1. numunede 2685 N değerinde, 2. numunede 2591 N değerinde, 3. numunede ise 2872 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



Şekil 3.157. H/H/H/H yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.157'de görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçadaki delikte ezilme, alt parçada delikte ezilme ve levhada yırtılma meydana gelmiştir.

b) Yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin çekme deneyi sonucunda;



Şekil 3.158. H/H/H/H yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunede kuvvet-uzama grafiği.

Şekil 3.158'de 1. numunede 2727 N değerinde, 2. numunede 2648 N değerinde, 3. numunede ise 2920 N değerinde bir hasar yükü elde edilmiştir.



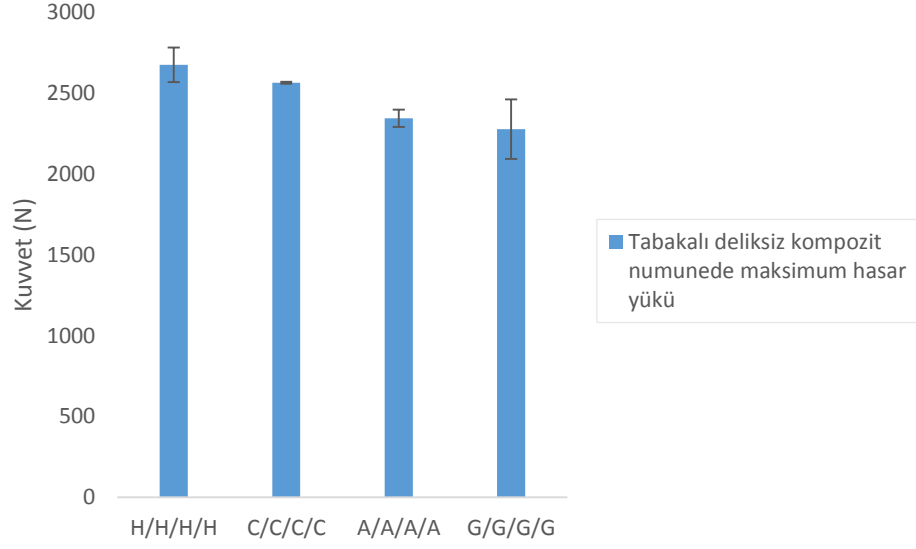
Şekil 3.159. H/H/H/H yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı numunenin hasar görüntüsü.

Şekil 3.159 'da görüldüğü üzere her 3 deneyde kullanılan numunelerde üst parçadaki delikte ezilme ve levhada kesme alt parçada ezilme meydana gelmiştir.

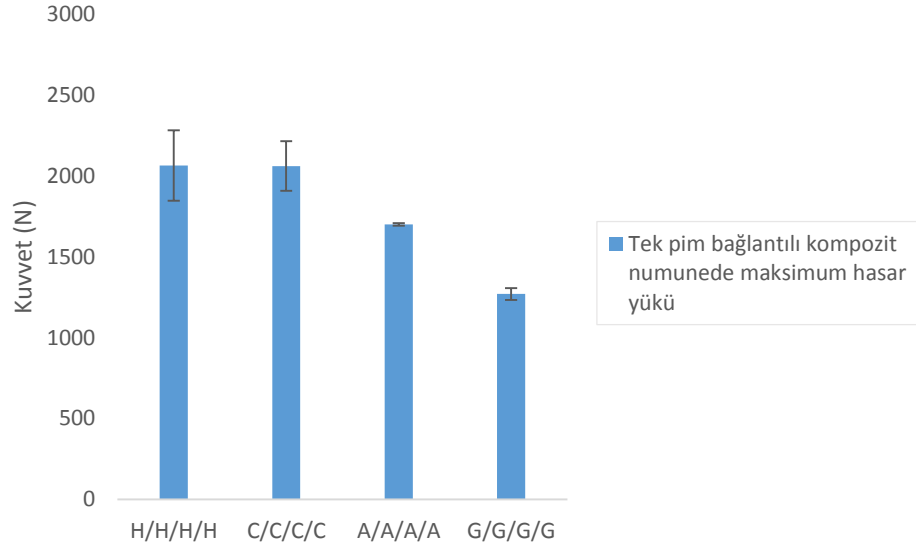
Yapılan deneylerde bulunan hasar yüklerine göre maksimum gerilme ve yer değiştirme değerleri hesaplanarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

Tablo 3.1. G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için hasar yükleri ve tipleri.

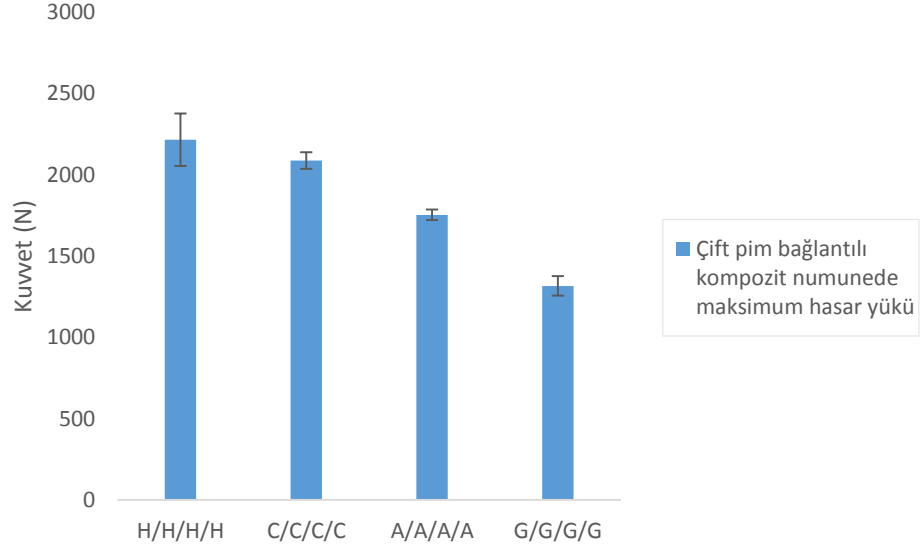
	Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü	Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
G/G/G/G	2276	1270	Delikte ezilme ve levhada kesme	1316	Delikte ezilme ve levhada kesme
C/C/C/C	2563	2061	Delikte ezilme	2088	Delikte ezilme ve levhada kesme
A/A/A/A	2343	1701	Delikte ezilme	1753	Delikte ezilme
H/H/H/H	2674	2064	Delikte ezilme	2216	Delikte ezilme ve levhada kesme



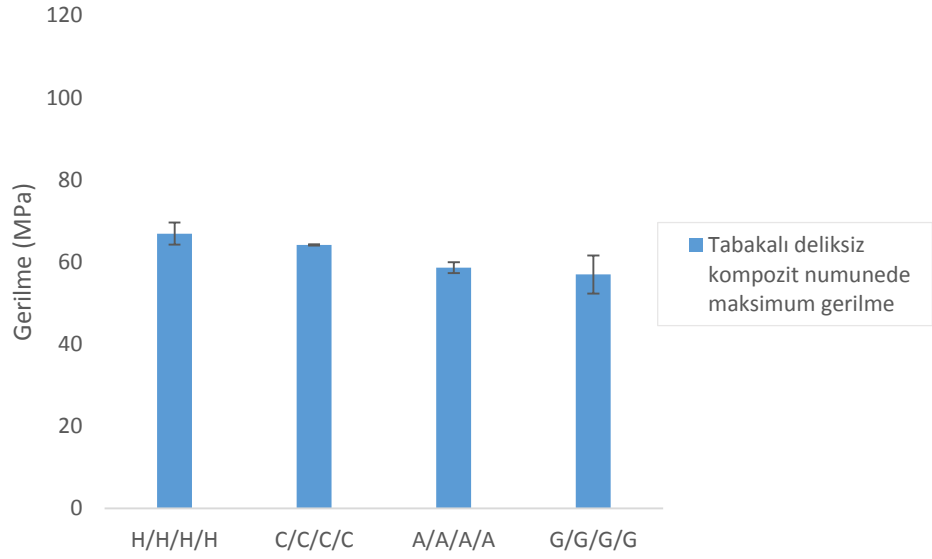
Şekil 3.160. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.



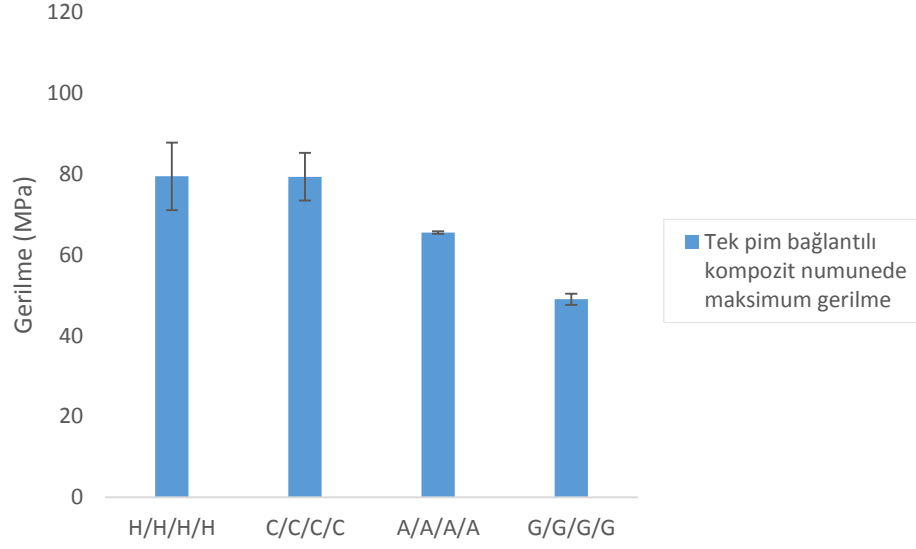
Şekil 3.161. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



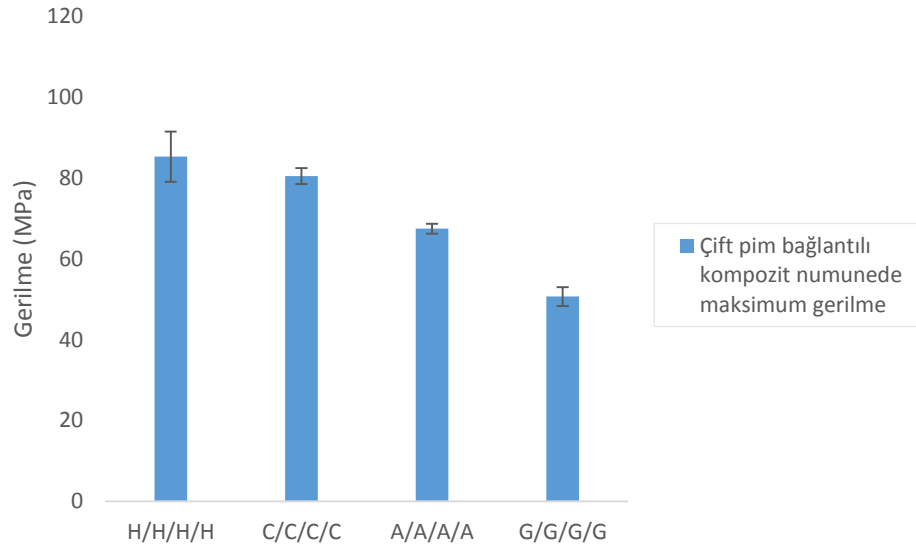
Şekil 3.162. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



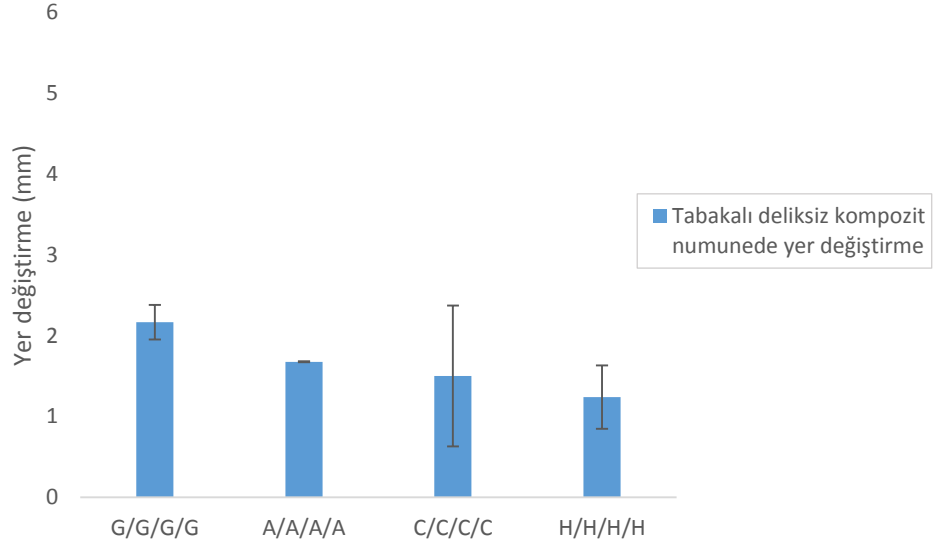
Şekil 3.163. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



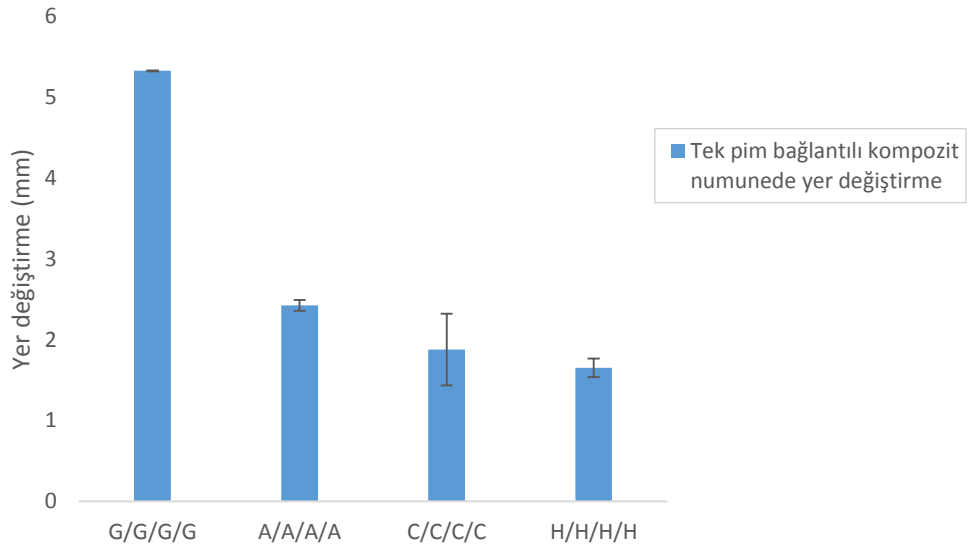
Şekil 3.164. Tek pim bağlantılı kompozit numune maksimum gerilme değerleri.



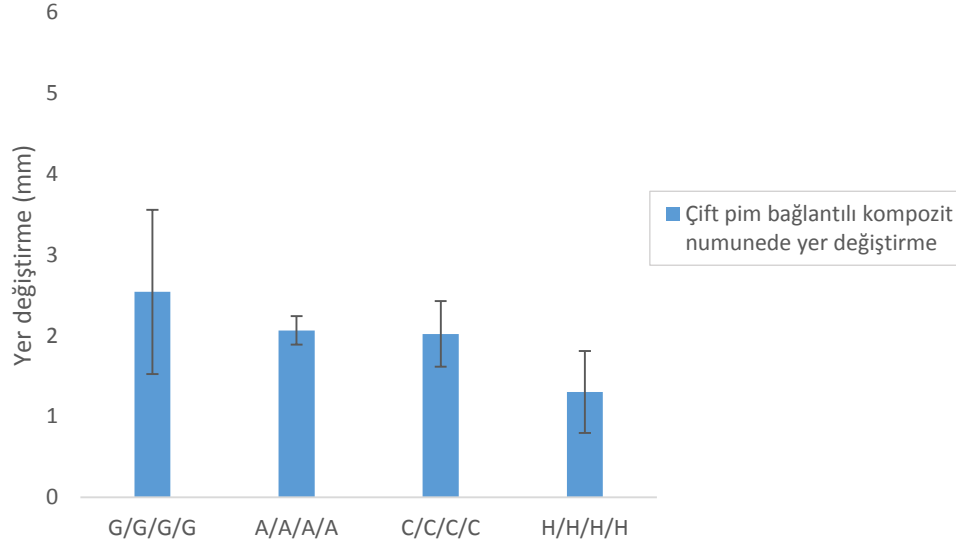
Şekil 3.165. Çift pim bağlantılı kompozit numune maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.166. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.



Şekil 3.167. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.



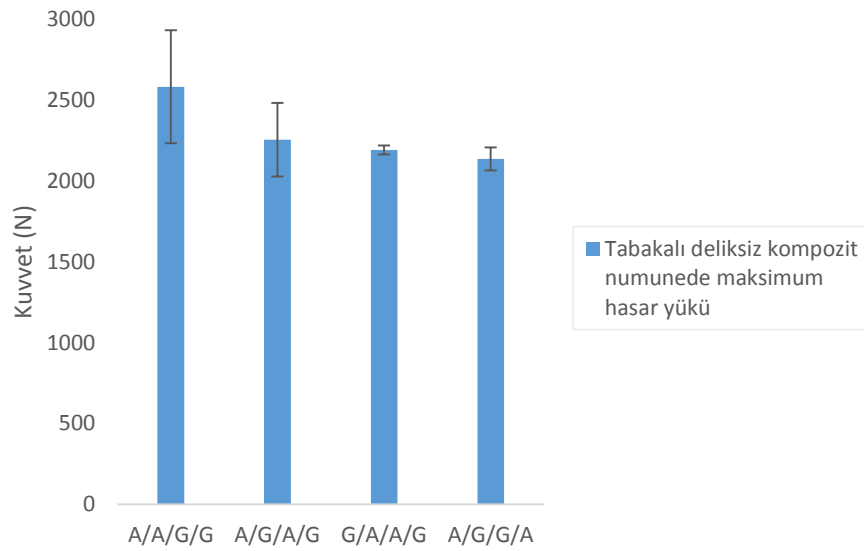
şekil 3.168. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

Tablo 3.1 H/H/H/H, A/A/A/A, C/C/C/C, G/G/G/G dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri verilmiştir. şekil 3.160 ile 3.162 arasında sırasıyla deliksiz, tek pim, çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. şekil 3.163 ile 3.165 arasında maksimum hasar yükündeki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi verilmiştir. şekil 3.166 ile 3.168 arasında hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi verilmiştir. Deliksiz numuneler için; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede gerçekteşmiş, %14'lük bir azalma meydana gelmiştir. Tek pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede gerçekteşmiştir. Tek pimli numune için H/H/H/H ve C/C/C/C dizilimlerinde birbirine yakın değerler elde edilmiş olup %0.15'lik bir değişim söz konusudur. Maksimum hasar yükünün elde edildiği H/H/H/H dizilimine göre G/G/G/G diziliminin hasar yükünde %38'lik bir azalma meydana gelmiştir. Çift pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede meydana gelmiş olup, %40'lık bir azalma gerçekteşmiştir. Deliksiz, tek pim ve çift pim numuneler için yapılan deneylerde dizilim olarak maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü ise G/G/G/G diziliminde meydana gelmiştir. Malzeme değişimi tek ve çift pim bağlantılı kompozitlerde maksimum hasar kuvveti üzerinde daha etkili bir parametredir. Dolayısıyla bu etki gerilmede de aynıdır. Maksimum hasar noktasındaki yer değiştirmelerin büyükten küçüğe sıralanışı; G/G/G/G, A/A/A/A, C/C/C/C ve H/H/H/H şeklindedir. En yüksek yer değiştirme G/G/G/G, en düşük yer değiştirme ise H/H/H/H'de meydana gelmiştir. G/G/G/G daha yumuşak bir malzeme olmasından dolayı

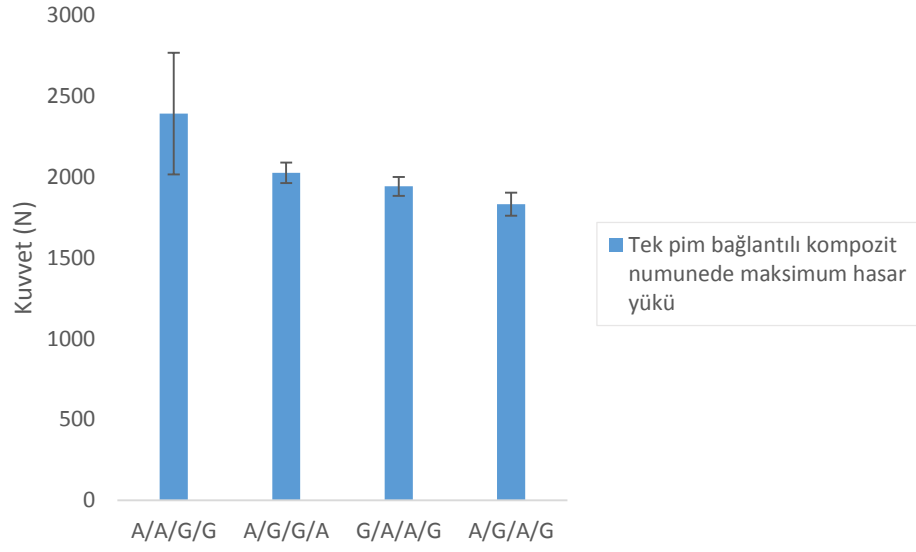
daha fazla uzama elde edilmiştir. H/H/H/H diziliminin ise daha gevrek bir malzeme olduğu görülmektedir.

Tablo 3.2. A/G/A/G, A/A/G/G, A/G/G/A ve G/A/A/G tabaka için hasar yükleri ve tipleri.

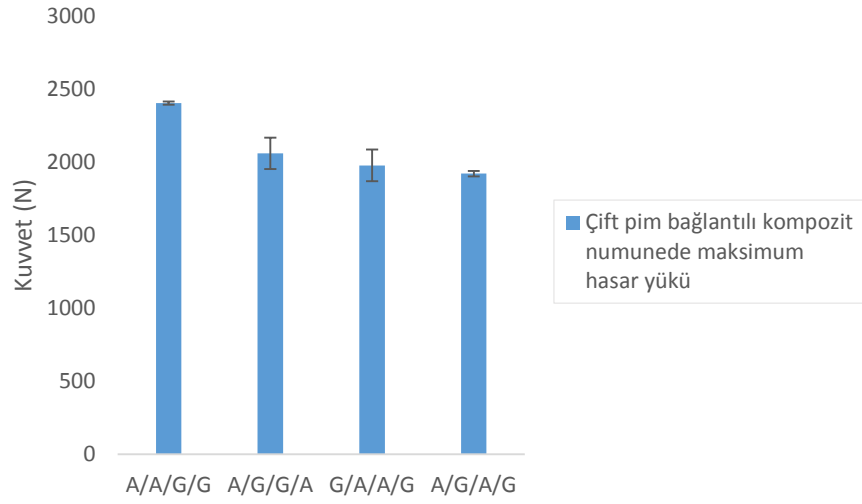
	Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü	Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
A/G/A/G	2255	1831	Delikte ezilme	1922	Delikte ezilme ve levhada kesme
A/A/G/G	2582	2391	Delikte ezilme	2405	Delikte ezilme ve levhada kesme-yırtılma
A/G/G/A	2136	2025	Delikte ezilme	2061	Delikte ezilme ve levhada kesme
G/A/A/G	2192	1941	Delikte ezilme	1978	Delikte ezilme



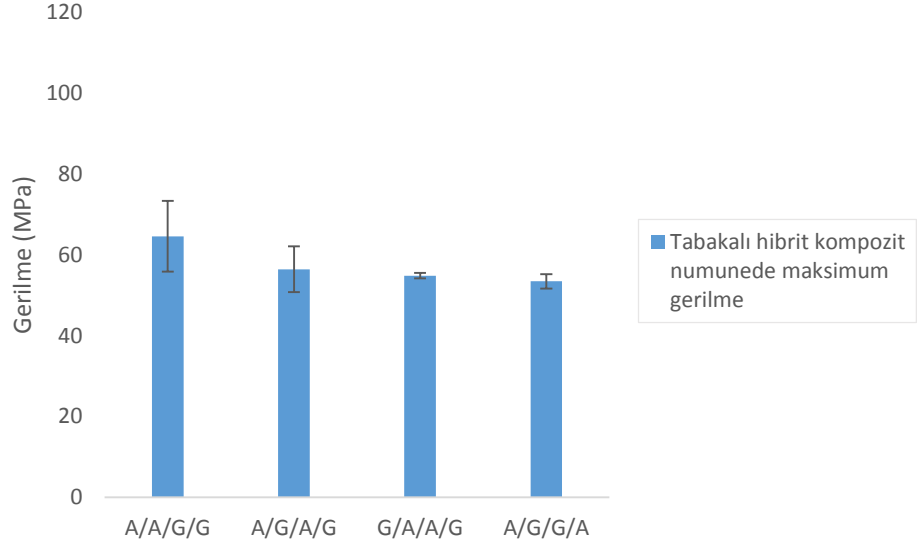
Şekil 3.169. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.



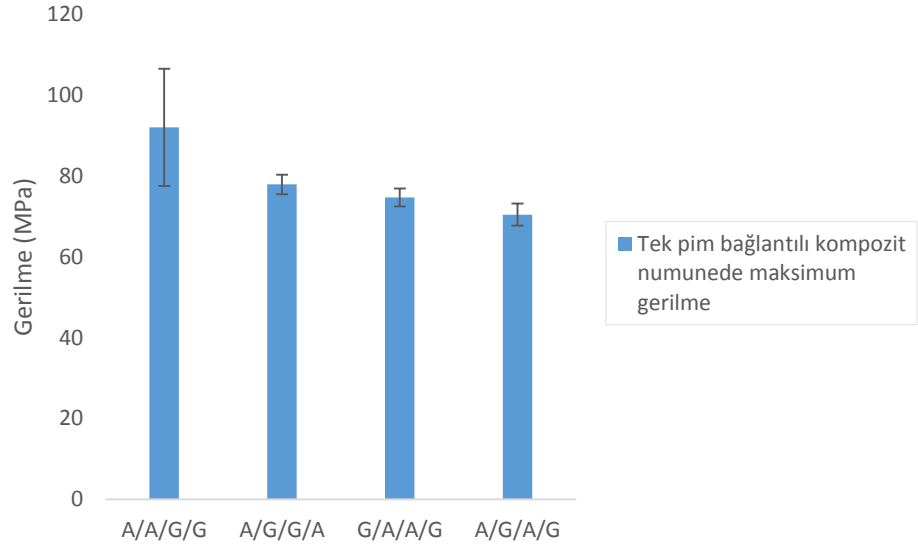
Şekil 3.170. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



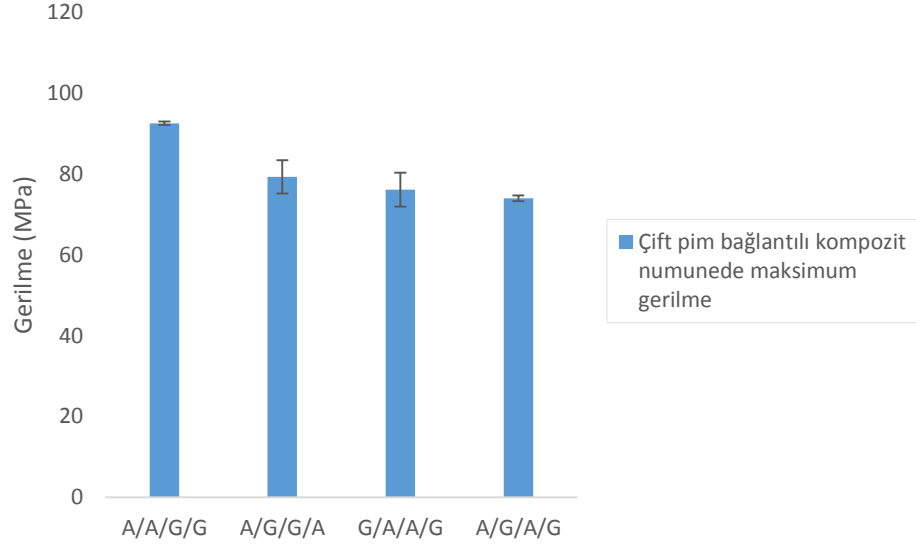
Şekil 3.171. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



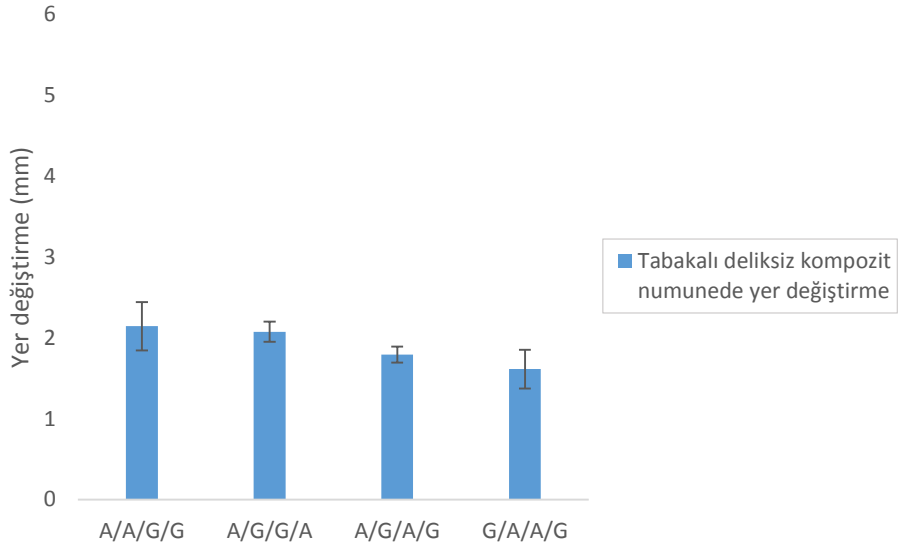
Şekil 3.172. Tabakalı hibrit kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



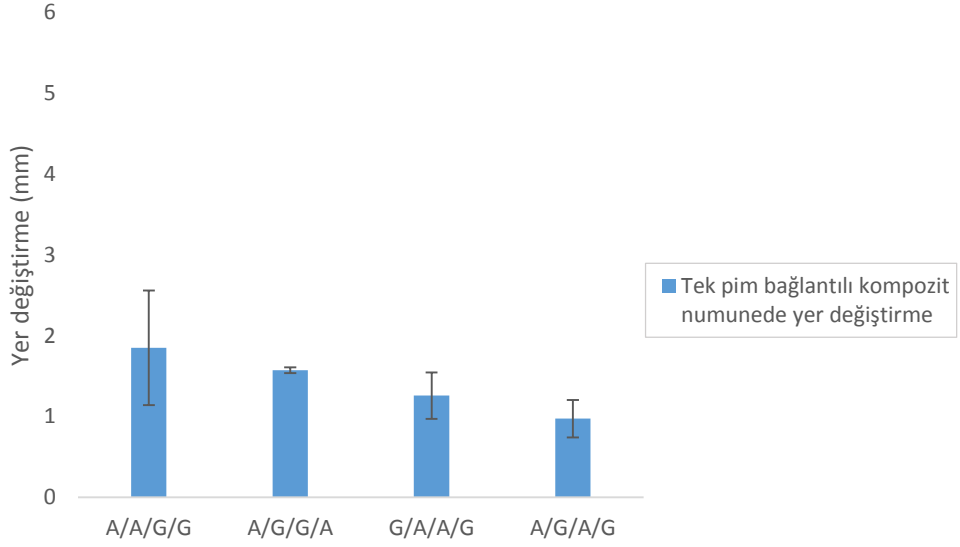
Şekil 3.173. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



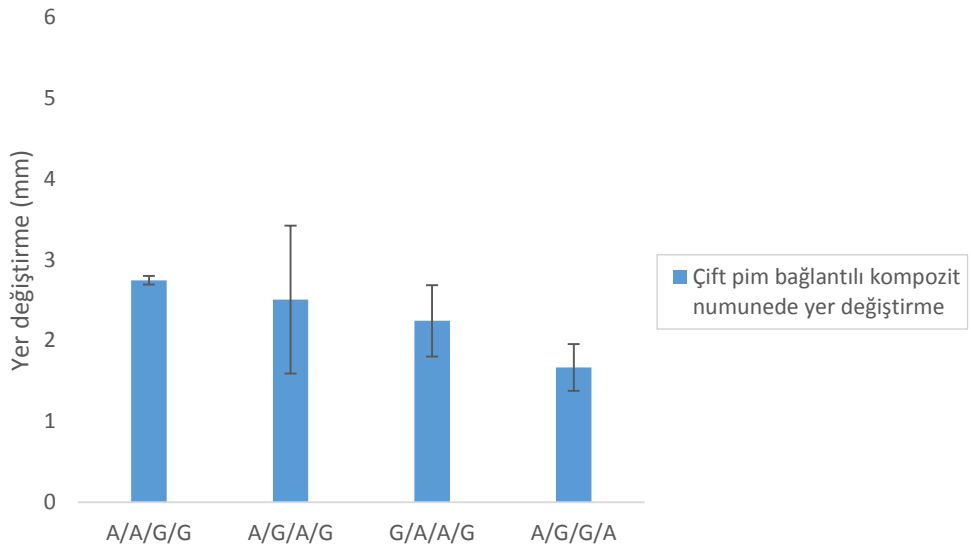
Şekil 3.174. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.175. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.



şekil 3.176. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.



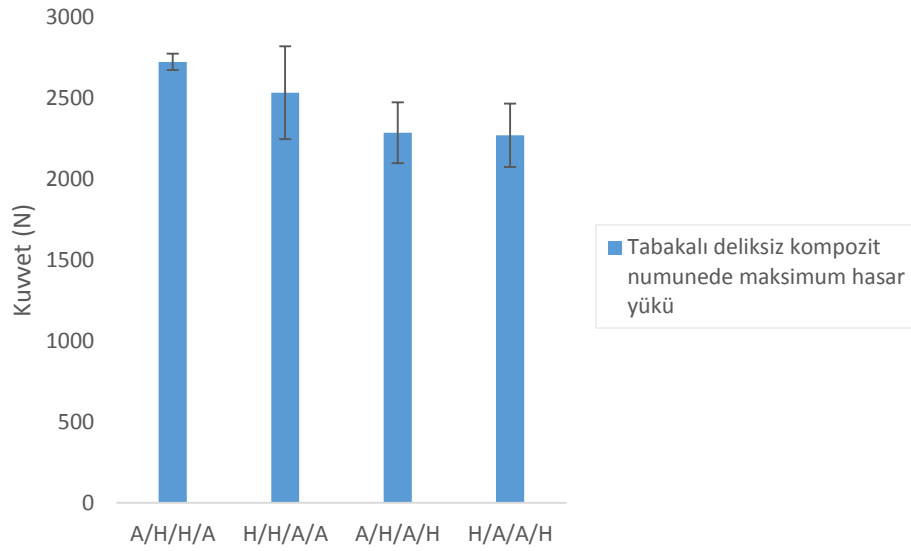
şekil 3.177. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

Tablo 3.2 A/A/G/G, A/G/A/G, G/A/A/G ve A/G/G/A dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri verilmiştir. şekil 3.169 ile 3.171 arasında sırasıyla deliksiz, tek pim, çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. şekil 3.172 ile 3.174 maksimum hasar yükündeki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi verilmiştir. şekil 3.175 ile 3.177 arasında hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi verilmiştir. Deliksiz numune için; tabaka diziliminde cam fiberin dışarıda aramidin içeride olması (A/G/G/A) veya cam fiberin içeride aramidin

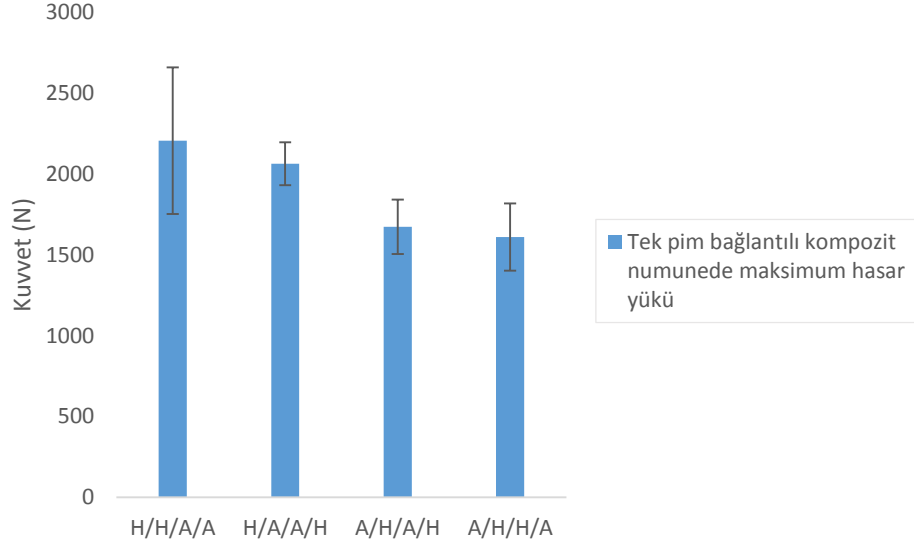
dışarıda olması (G/A/A/G) maksimum hasar yükü değerini değiştirmemiştir. A/A/G/G dizilimi yerine A/G/A/G dizilimi kullanıldığında hasar yükünde %12’lik bir azalma elde edilmiştir. Tek pimli numunede; maksimum hasar yükünün elde edildiği A/A/G/G dizilimine göre A/G/A/G dizilimi kullanılması durumunda hasar yükünde %23’lük bir azalma meydana gelmiştir. Çift pimli numunede ise; A/A/G/G dizilimi yerine A/G/A/G kullanımı sonucu hasar yükünde oluşan azalma %~20’dir. Malzeme değişiminin etkisi tek ve çift pimde daha etkili bir parametredir.

Tablo 3.3. A/H/A/H, H/H/A/A, A/H/H/A ve H/A/A/H tabaka için hasar yükleri ve tipleri.

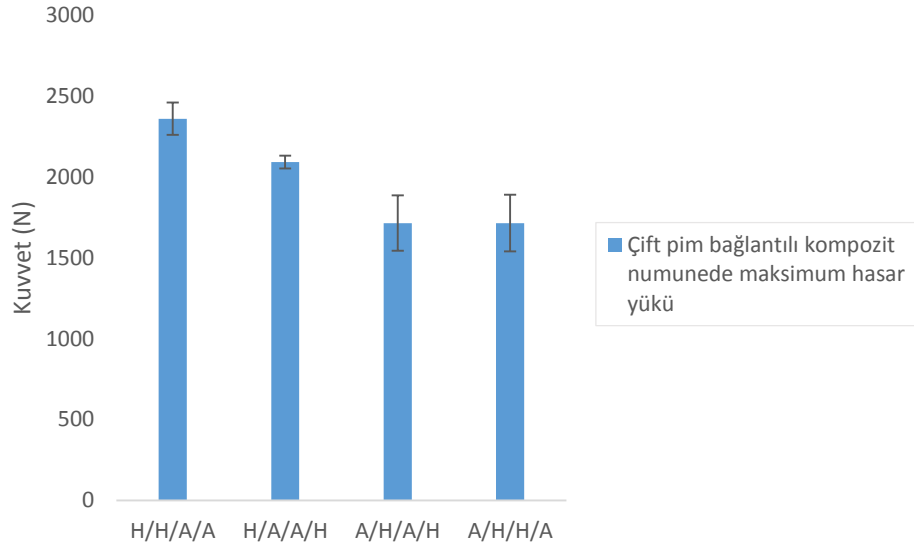
	Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü	Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
A/H/A/H	2289	1672	Delikte ezilme	1715	Delikte ezilme
H/H/A/A	2536	2205	Delikte ezilme	2360	Delikte ezilme ve levhada kesme
A/H/H/A	2727	1609	Delikte ezilme	1715	Delikte ezilme ve levhada kesme
H/A/A/H	2273	2063	Delikte ezilme	2093	Delikte ezilme



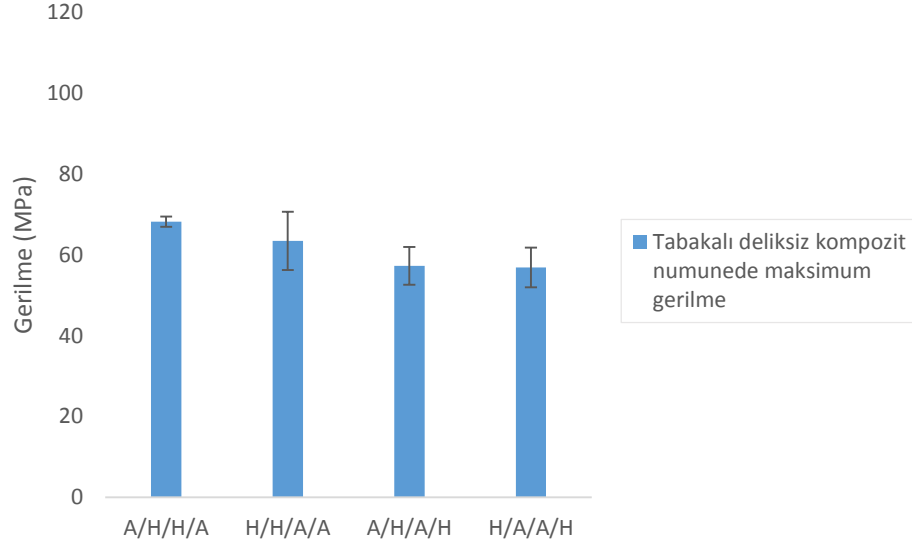
Şekil 3.178 Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.



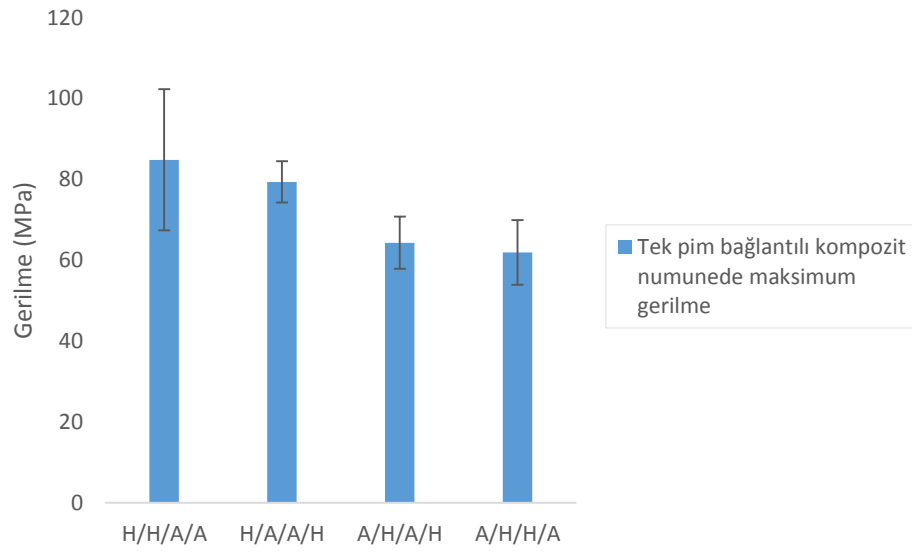
Şekil 3.179. Tek pim bağlantılı kompozit numune maksimum hasar yükü.



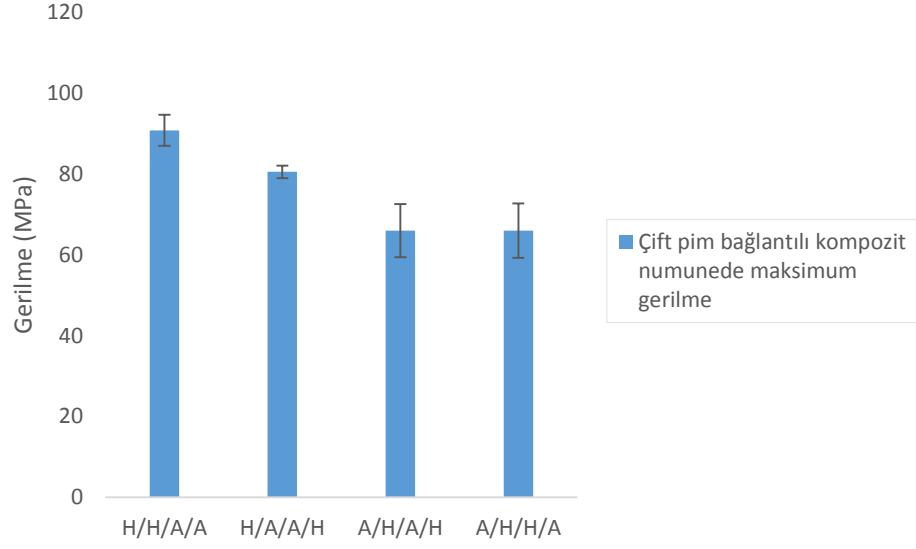
Şekil 3.180. Çift pim bağlantılı kompozit numune maksimum hasar yükü.



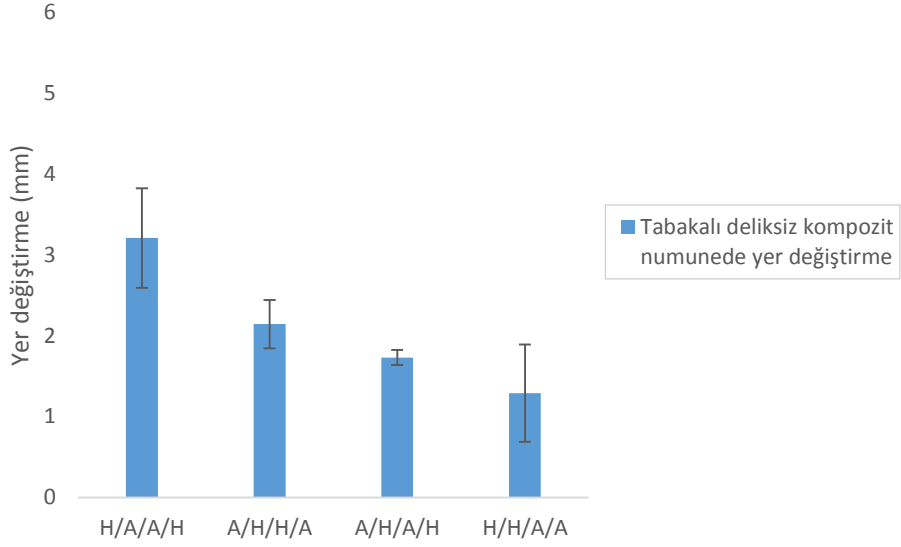
Şekil 3.181. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



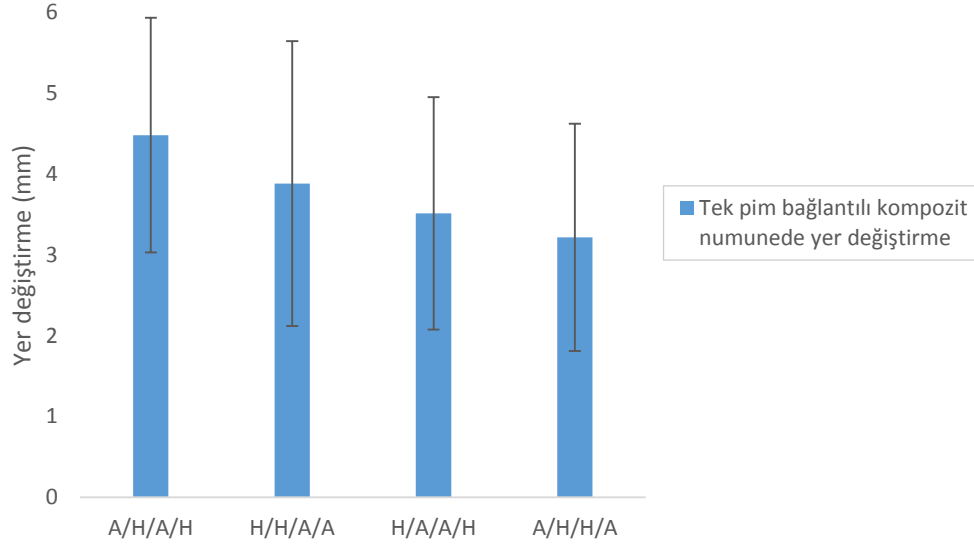
Şekil 3.182. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



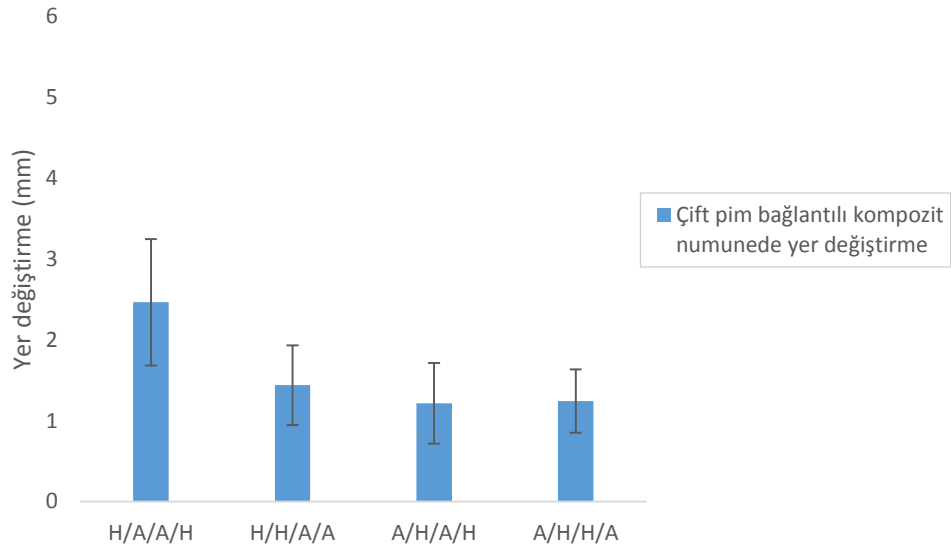
Şekil 3.183. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.184. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değişime.



Şekil 3.185. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.



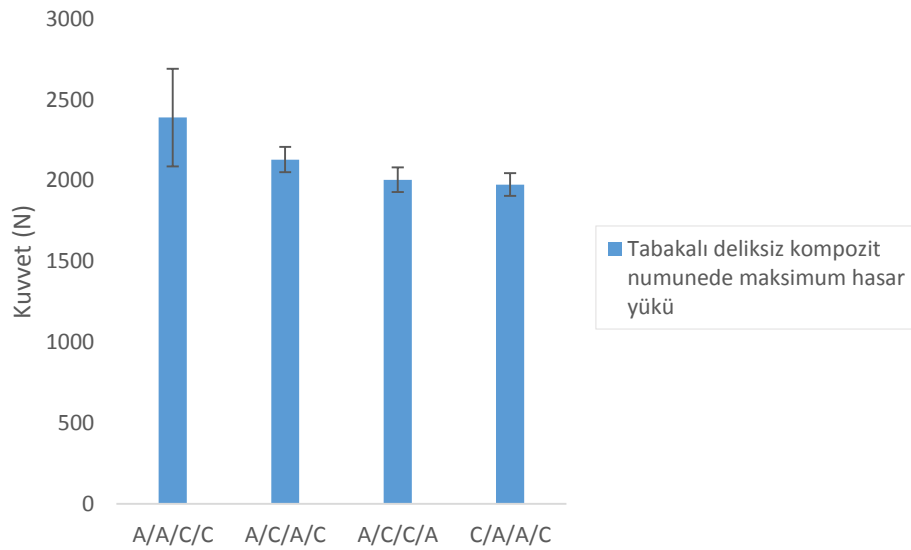
Şekil 3.186. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

H/H/A/A, A/H/A/H, H/A/A/H ve A/H/H/A dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri Tablo 3.3' de gösterilmiştir. Şekil 3.178 ile 3.180 arasında sırasıyla deliksiz, tek pim, çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. Şekil 3.181 ile 3.183 maksimum hasar yükündeki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi verilmiştir. Hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer

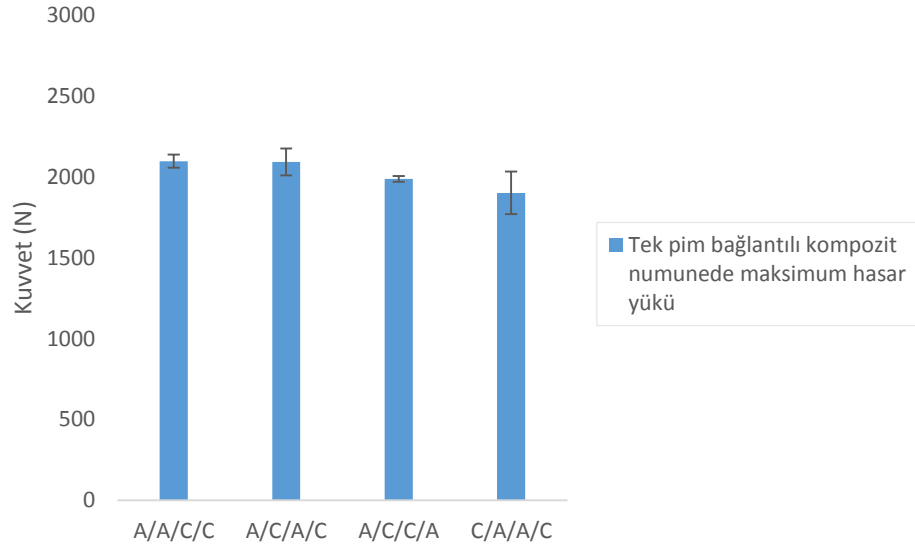
değişim ilişkisi Şekil 3.184 ile 3.186 arasında verilmiştir. A/H/H/A yerine A/H/A/H tabaka dizilimi kullanılması hasar yükündeki durumu etkilememiştir. Deliksiz numunede; H/H/A/A dizilimi yerine H/A/A/H dizilimi kullanmak arasında hasar yükünde %10'luk bir düşüş etkisi vardır. Tek pimli numune için; H/H/A/A dizilimine göre H/A/A/H dizilimi kullanmak hasar yükünde %6'luk bir azalma meydana gelmiştir. Maksimum hasar yükünün elde edildiği H/H/A/A dizilimi yerine A/H/A/H diziliminin hasar yükünde %24'lük bir azalma gerçekleşmiştir. Çift pimli numunede ise; H/H/A/A kullanmak yerine A/H/A/H dizilimi kullanılırsa hasar yükünde %27'lik bir azalma gözlemlenmiştir. Malzeme diziliminin etkisi çift pimde daha önemli bir parametredir.

Tablo 3.4. A/C/A/C, A/A/C/C, A/C/C/A ve C/A/A/C tabaka için hasar yükleri ve tipleri.

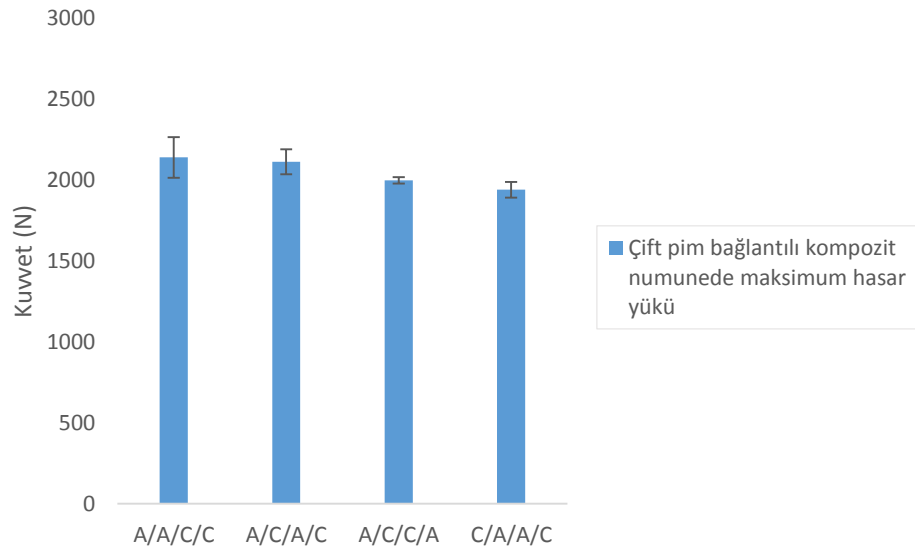
	Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü	Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
A/C/A/C	2129	2092	Delikte ezilme	2114	Delikte ezilme ve levhada yırtılma
A/A/C/C	2389	2097	Delikte ezilme	2141	Delikte ezilme ve levhada kesme
A/C/C/A	2004	1988	Delikte ezilme	1999	Delikte ezilme ve levhada kesme
C/A/A/C	1974	1901	Delikte ezilme	1941	Delikte ezilme ve levhada kesme



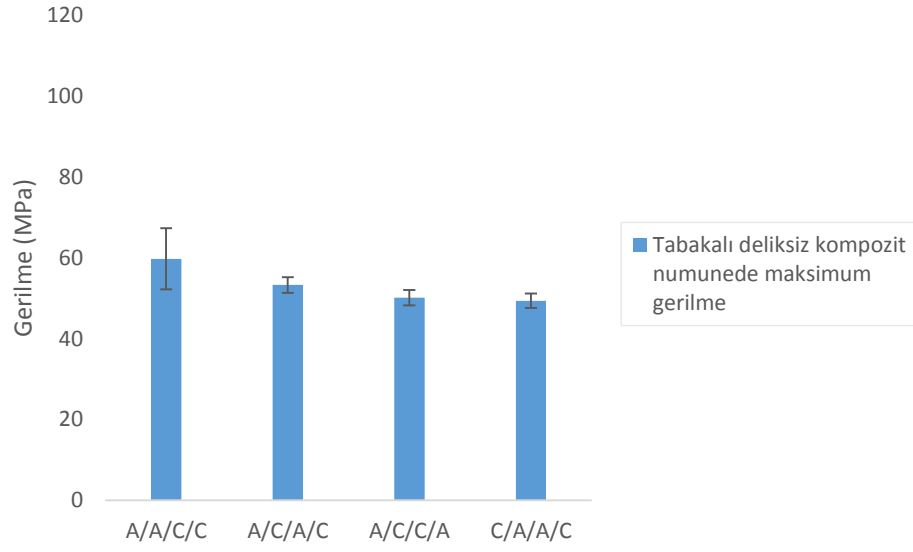
Şekil 3.187. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.



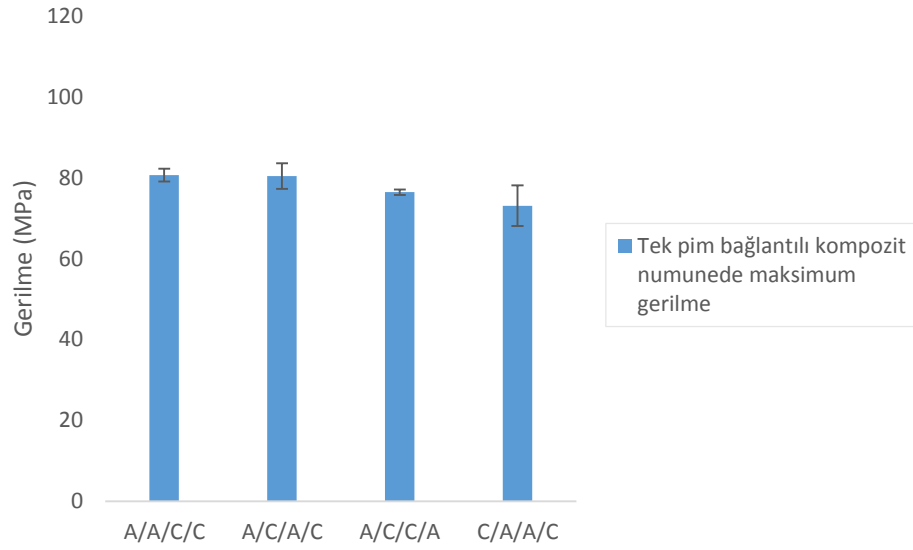
Şekil 3.188. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



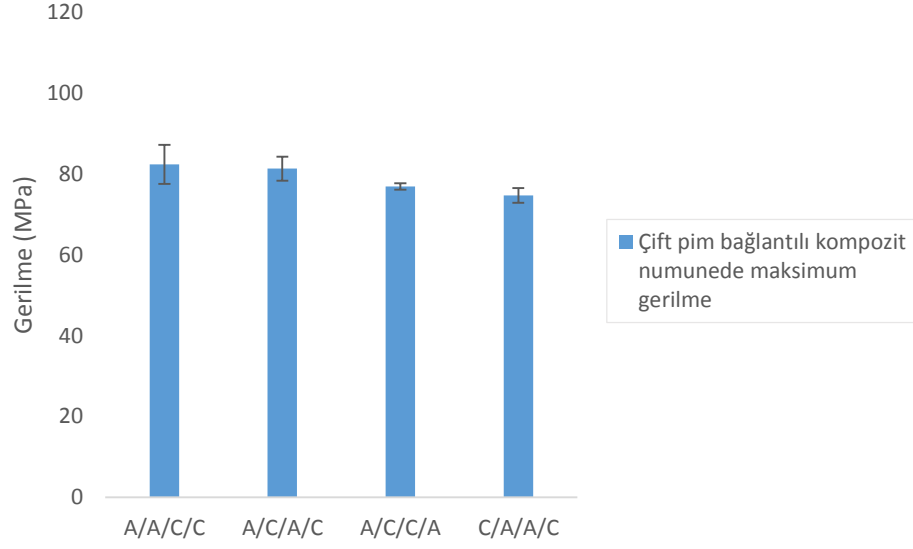
Şekil 3.189. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



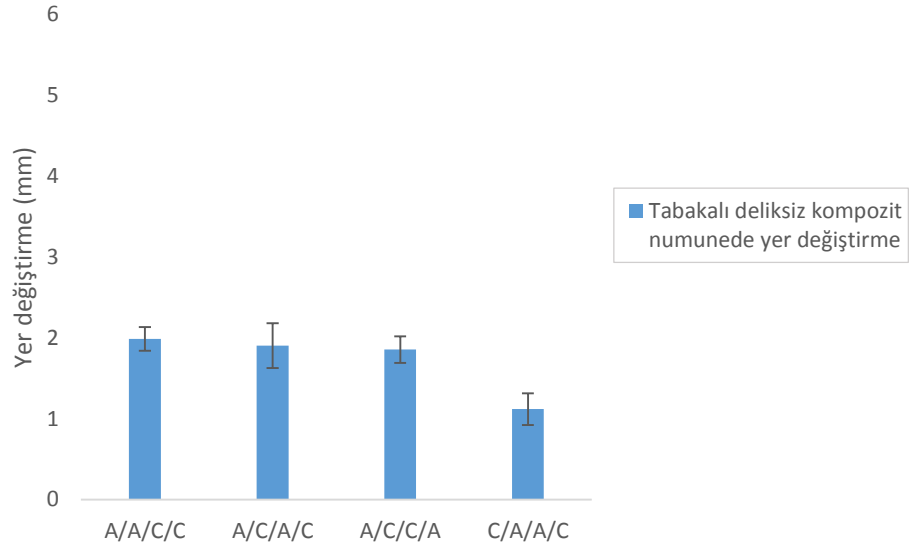
Şekil 3.190. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



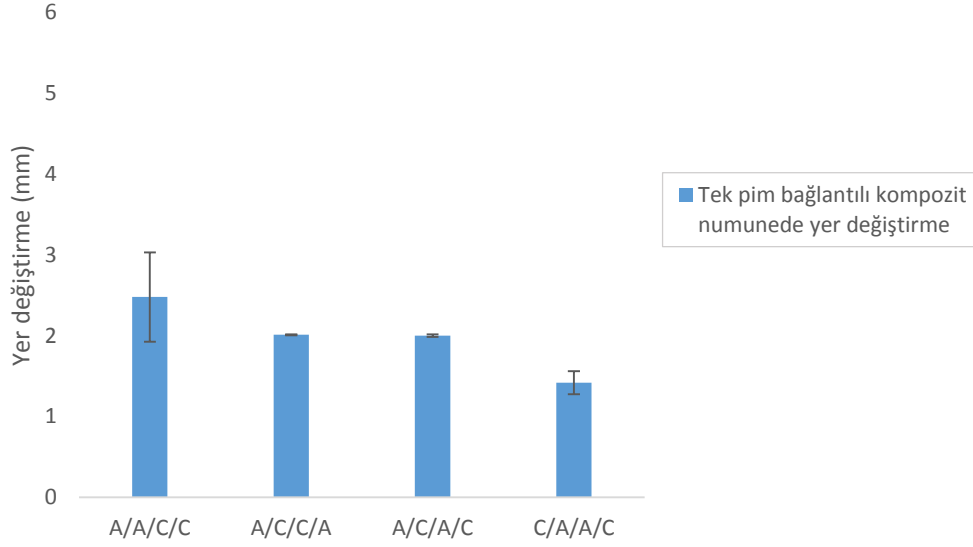
Şekil 3.191. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



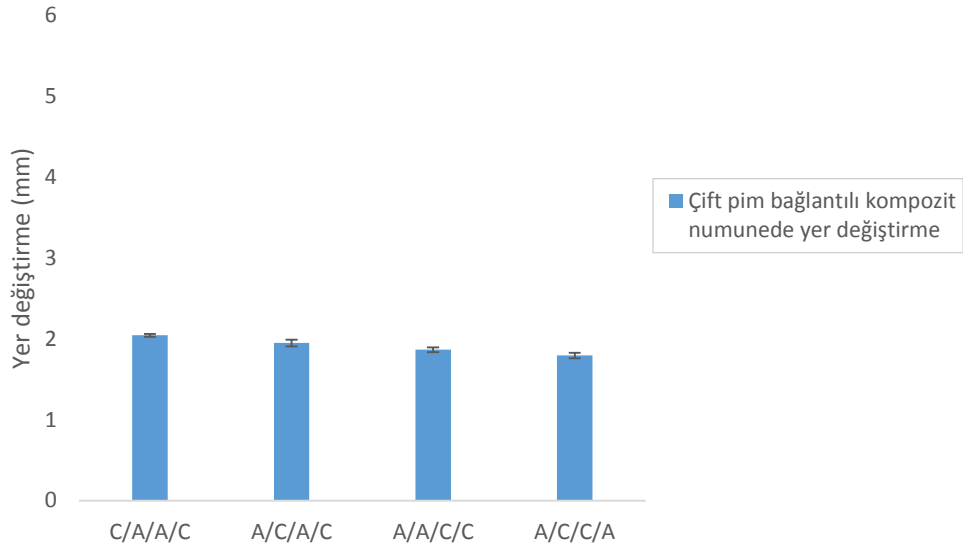
Şekil 3.192. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.193. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.



şekil 3.194. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.



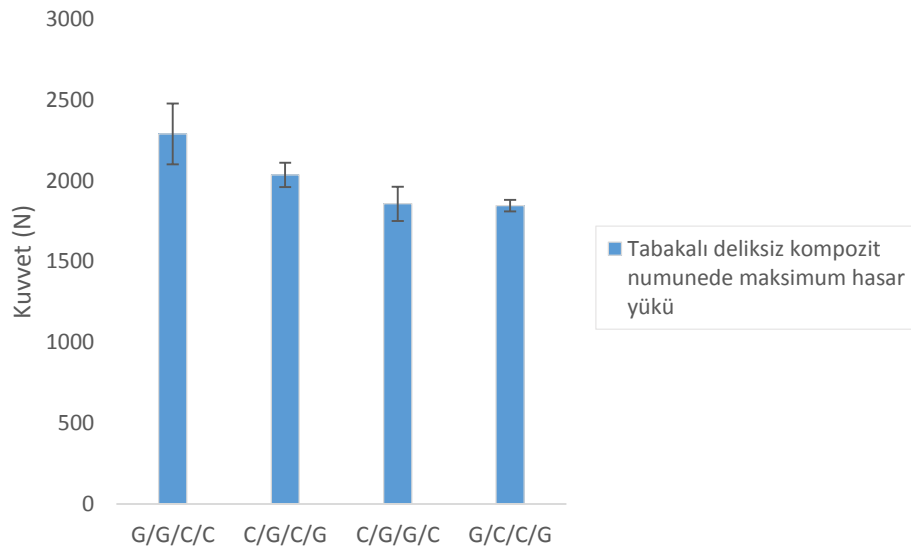
şekil 3.195. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

Tablo 3.4 A/A/C/C, A/C/A/C, C/A/A/C ve A/C/C/A dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri verilmiştir. şekil 3.187 ile 3.189 arasında sırasıyla deliksiz, tek pim, çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. şekil 3.190 ile 3.192 arasında maksimum hasar yükündeki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi verilmiştir. şekil 3.193 ile 3.195 arasında hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi verilmiştir. A/C/C/A dizilimi yerine C/A/A/C tabaka dizilimi kullanılması hasar yükündeki durumu etkilememiştir. Yani; karbon veya

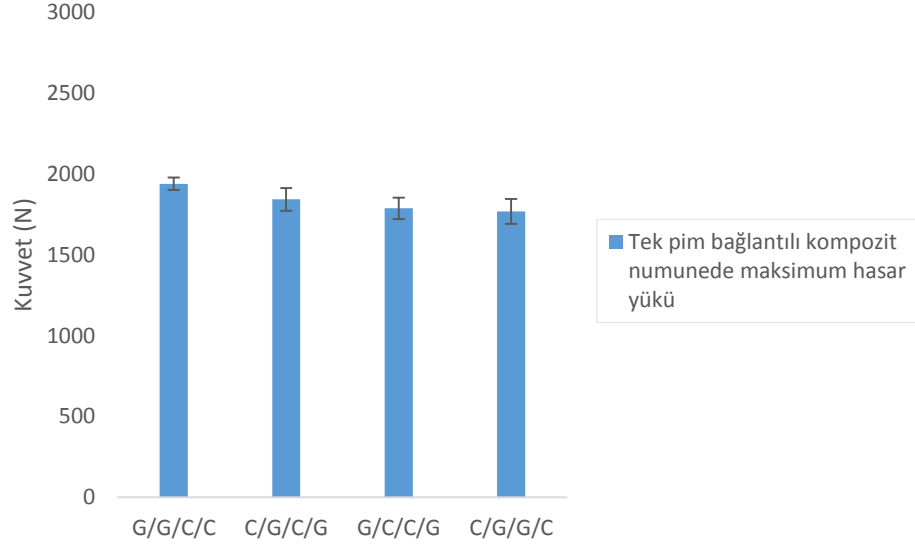
aramidin dizilimde içerde olması hasar yükünde aynı etkiyi yaratmıştır. Deliksiz numunede; A/A/C/C dizilimi yerine A/C/A/C dizilimi kullanmak arasında hasar yükünde %10'luk bir düşüş, maksimum hasar yükü olan A/A/C/C dizilimi yerine C/A/A/C dizilimi kullanmak %20'lik bir azalma etkisi vardır. Tek pimli numunede; maksimum hasar yükü A/A/C/C yerine C/A/A/C dizilimi kullanmak arasında hasar yükünde %9'luk bir azalma meydana gelmiştir. Çift pimli numunede ise; hasar yükünde A/A/C/C yerine C/A/A/C dizilimi %10'luk bir azalma meydana getirmiştir. Malzeme diziliminin etkisi deliksiz numunede daha önemli bir parametredir.

Tablo 3.5. G/C/G/C, G/G/C/C, C/G/G/C ve G/C/C/G tabaka için hasar yükleri ve tipleri.

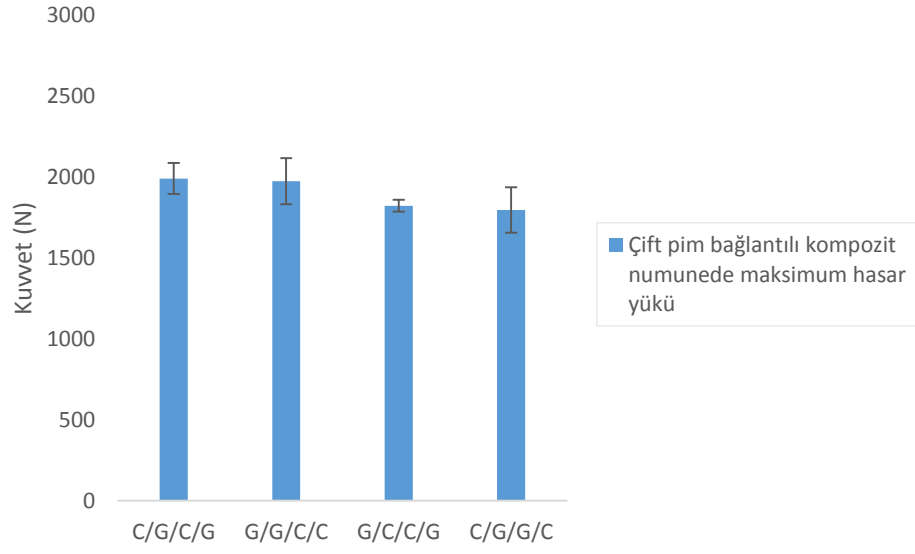
	Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü	Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
C/G/C/G	2035	1842	Delikte ezilme	1992	Delikte ezilme ve levhada kesme
G/G/C/C	2289	1938	Delikte ezilme ve levhada kesme	1976	Delikte ezilme ve levhada kesme
C/G/G/C	1856	1767	Delikte ezilme	1798	Delikte ezilme ve levhada kesme
G/C/C/G	1845	1787	Delikte ezilme ve levhada kesme	1824	Delikte ezilme ve levhada kesme



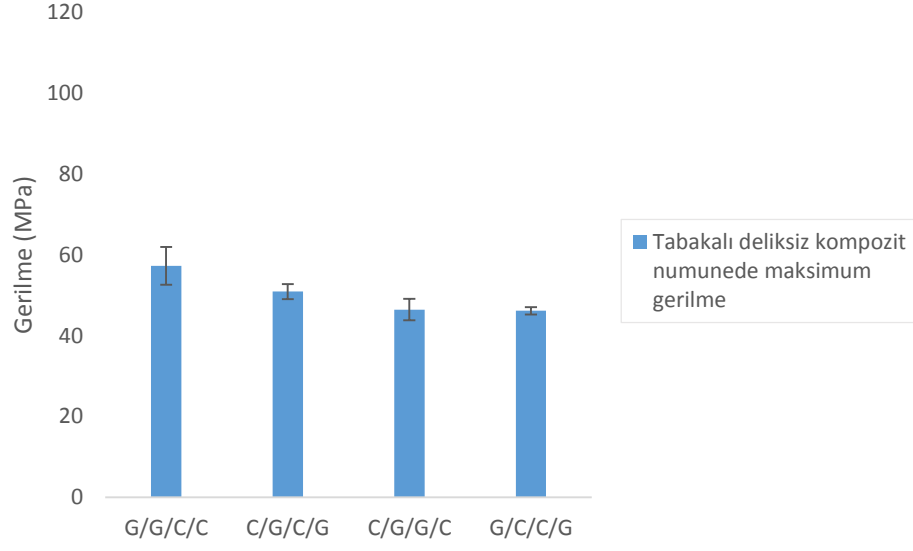
Şekil 3.196. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.



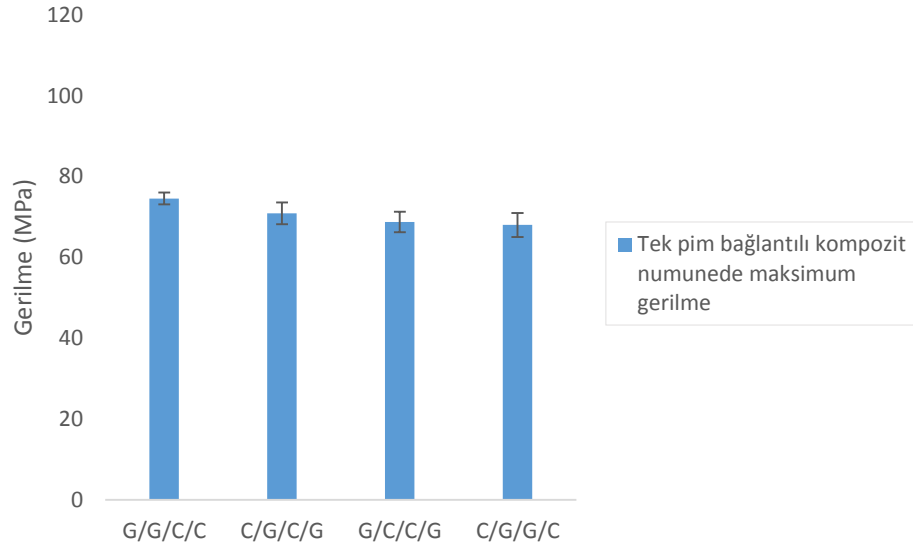
Şekil 3.197. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



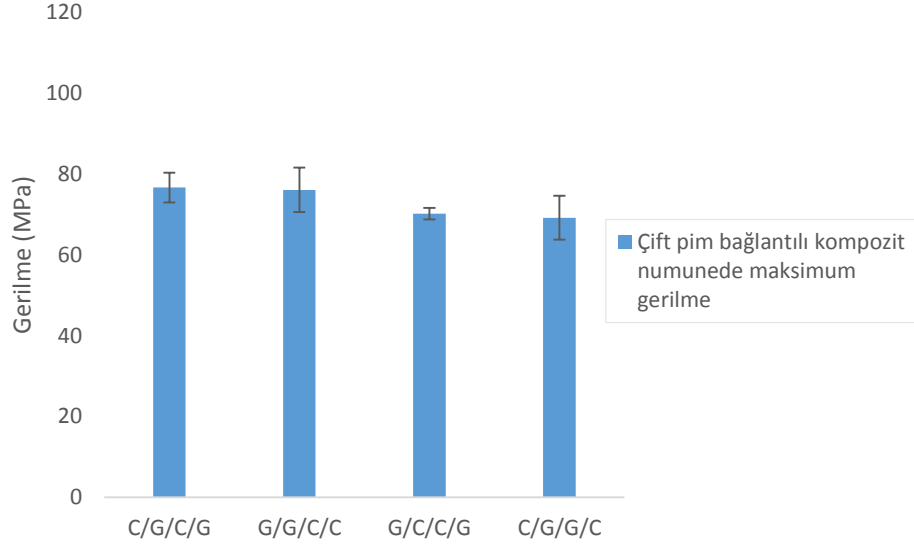
Şekil 3.198. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



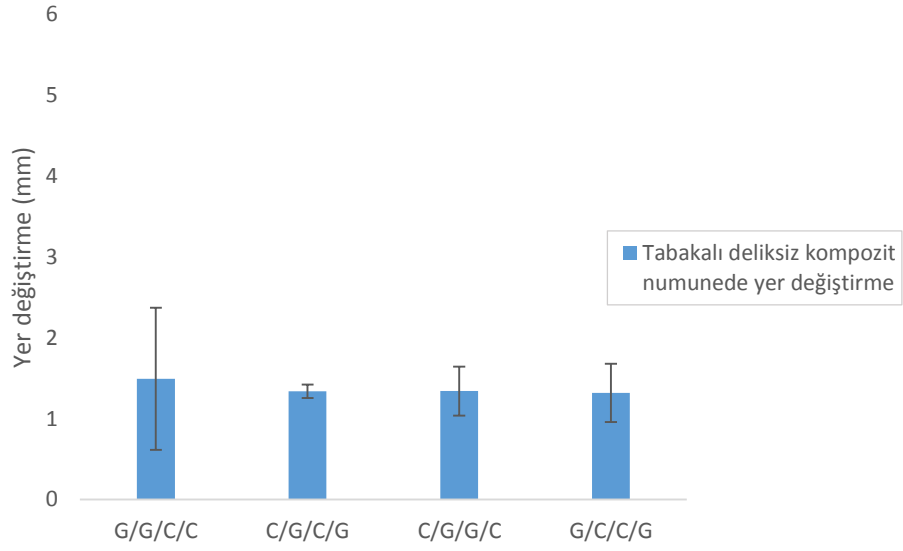
Şekil 3.199. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



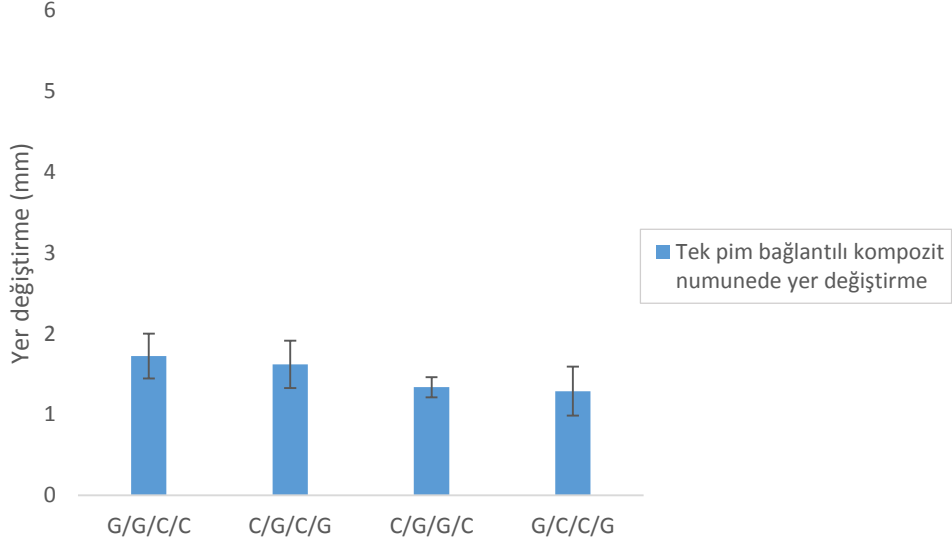
Şekil 3.200. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



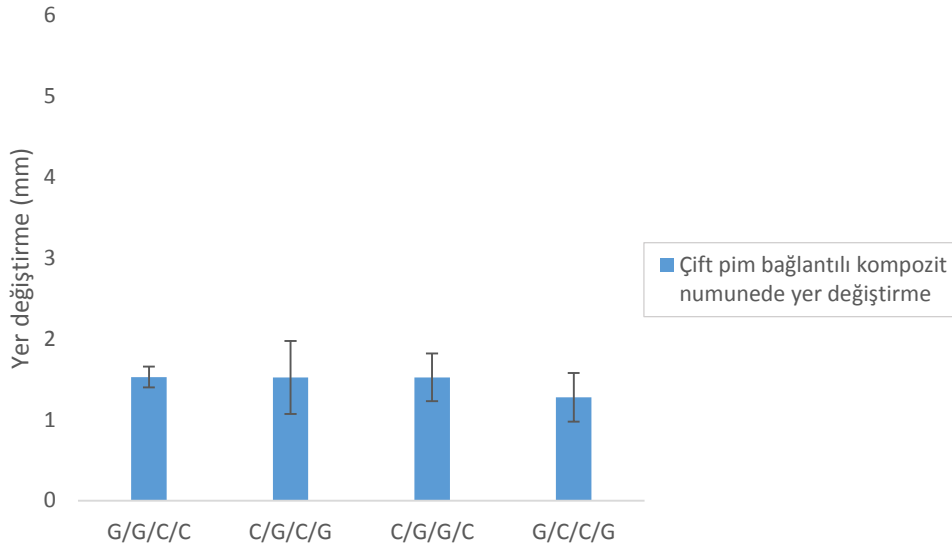
Şekil 3.201. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.202. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.



şekil 3.203. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.



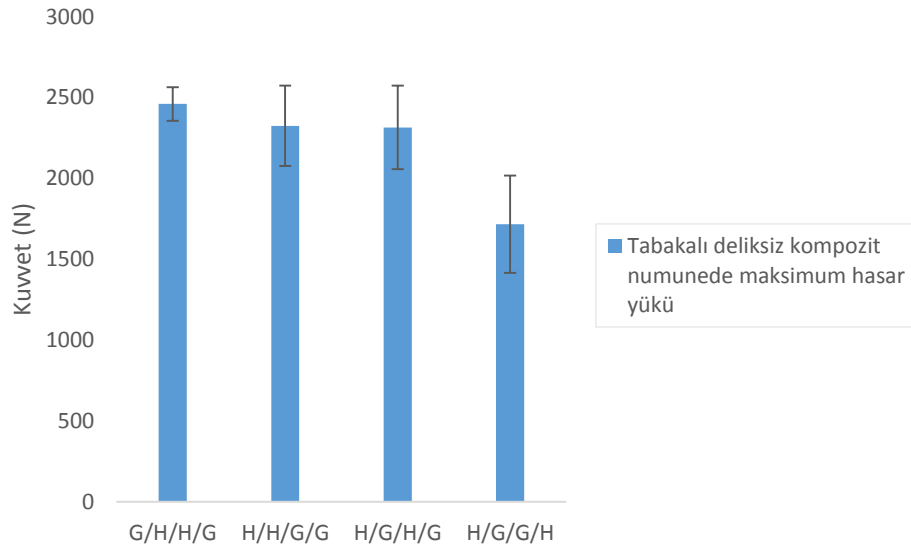
şekil 3.204. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

G/C/G/C, G/G/C/C, C/G/G/C ve G/C/C/G dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri Tablo 3.5 verilmiştir. şekil 3.196 ile 3.198 arasında sırasıyla deliksiz, tek pim, çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. şekil 3.199 ile 3.201 arasında maksimum hasar yükündeki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi gösterilmiştir. Hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi şekil 3.202 ile 3.204 arasında verilmiştir. C/G/G/C dizilimi yerine G/C/C/G tabaka dizilimi hasar yükü durumunu etkilememiştir. Yani; karbonun içerde camın dışarıda

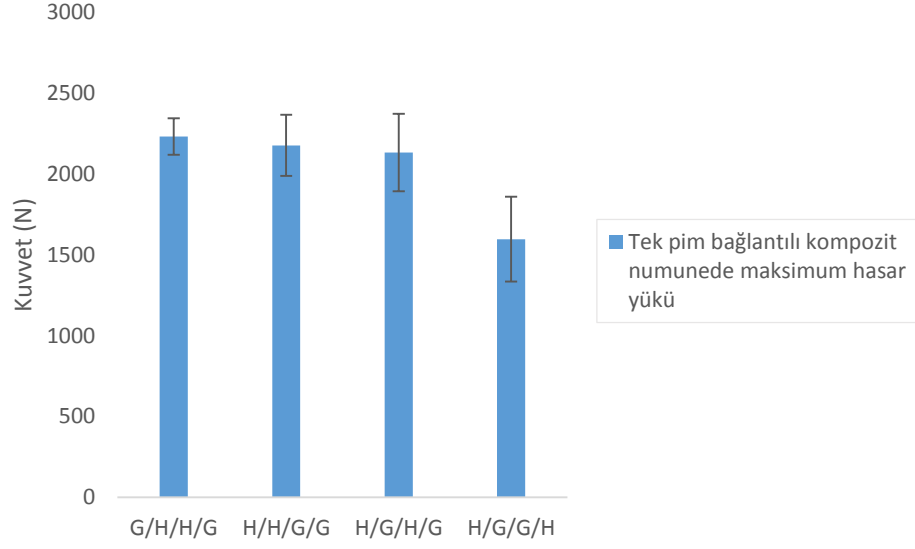
olması veya karbonun dışarıda camın içeride olması dizilimde hasar yükünde aynı etkiyi yaratmıştır. Deliksiz numunede; G/G/C/C dizilimine göre G/C/G/C diziliminin hasar yükünde %11’lik bir düşüş, maksimum hasar yükünün elde edildiği G/G/C/C dizilimi yerine G/C/C/G dizilimi kullanmak ise hasar yükünde %19’luk bir düşüş etkisi yaratmıştır. Tek pimli numune için; G/G/C/C diziliminin G/C/C/G dizilimi yerine hasar yükünde %8’lik bir azalma meydana gelmiştir. Çift pimli numunede ise; maksimum hasar yükü olan C/G/C/G dizilimine göre C/G/G/C diziliminin hasar yükünde %10’luk bir azalma meydana gelmiştir. Bu malzeme dizilimleri için deliksiz numunede hasar yükü daha etkili bir parametredir.

Tablo 3.6. H/G/H/G, H/H/G/G, H/G/G/H ve G/H/H/G tabaka için hasar yükleri ve tipleri.

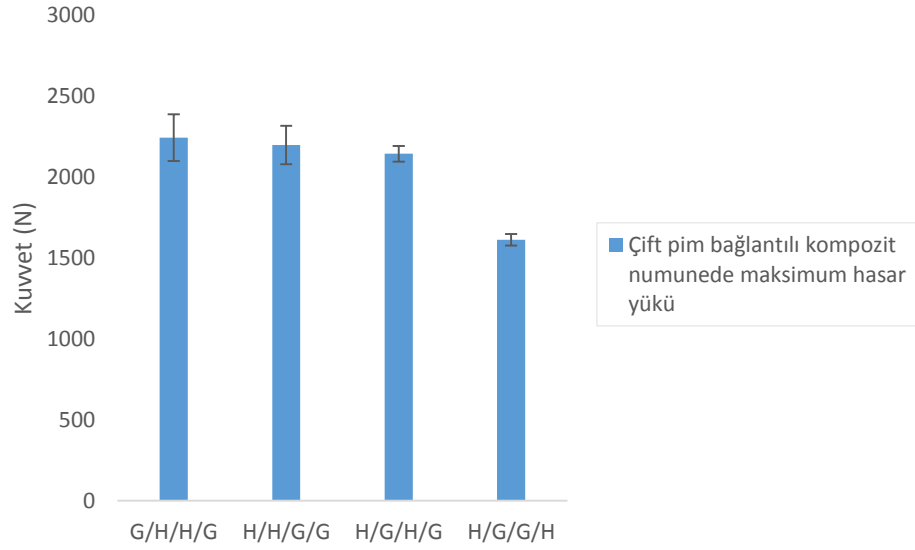
	Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü	Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
H/G/H/G	2315	2132	Delikte ezilme	2145	Delikte ezilme ve levhada kesme
H/H/G/G	2325	2176	Delikte ezilme	2200	Delikte ezilme ve levhada kesme
H/G/G/H	1716	1596	Delikte ezilme	1614	Delikte ezilme ve levhada kesme
G/H/H/G	2460	2231	Delikte ezilme	2245	Delikte ezilme ve levhada kesme



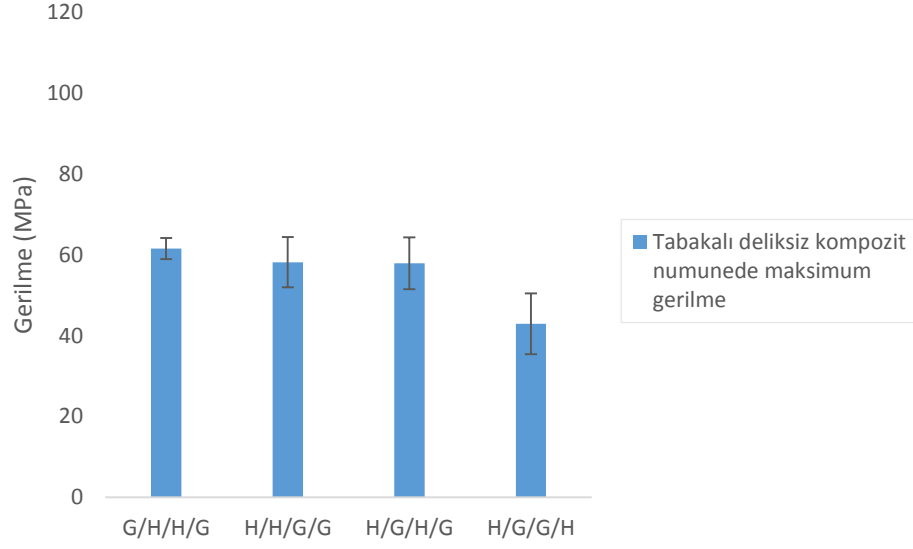
Şekil 3.205. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum hasar yükü.



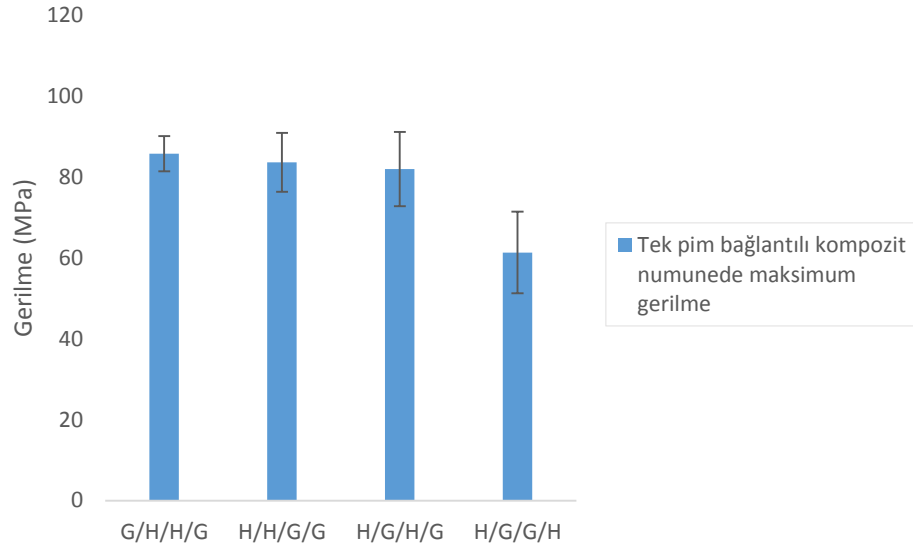
Şekil 3.206. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



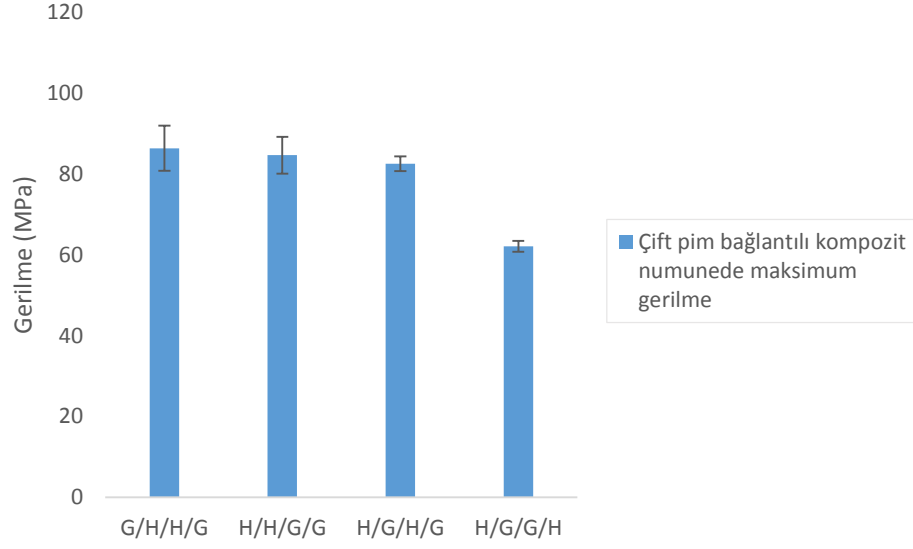
Şekil 3.207. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



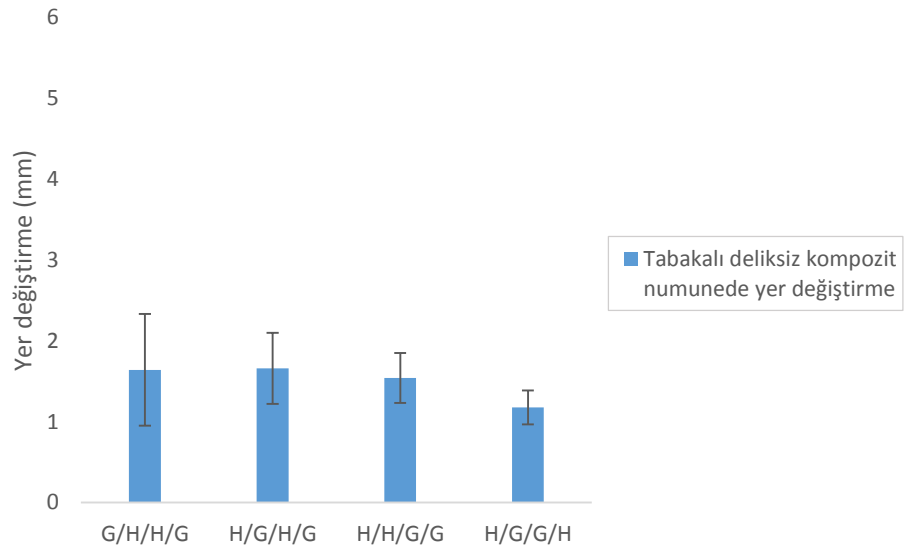
Şekil 3.208. Tabakalı deliksiz kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



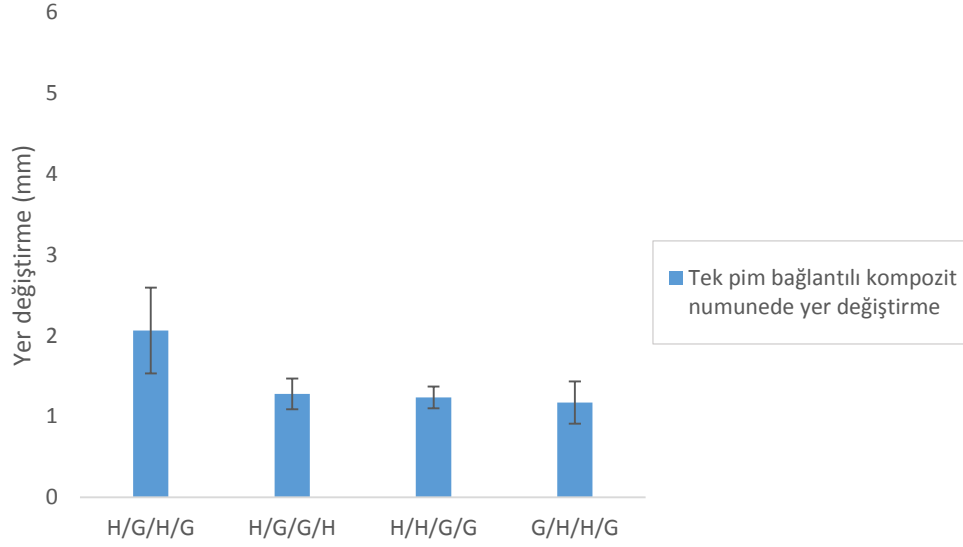
Şekil 3.209. Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



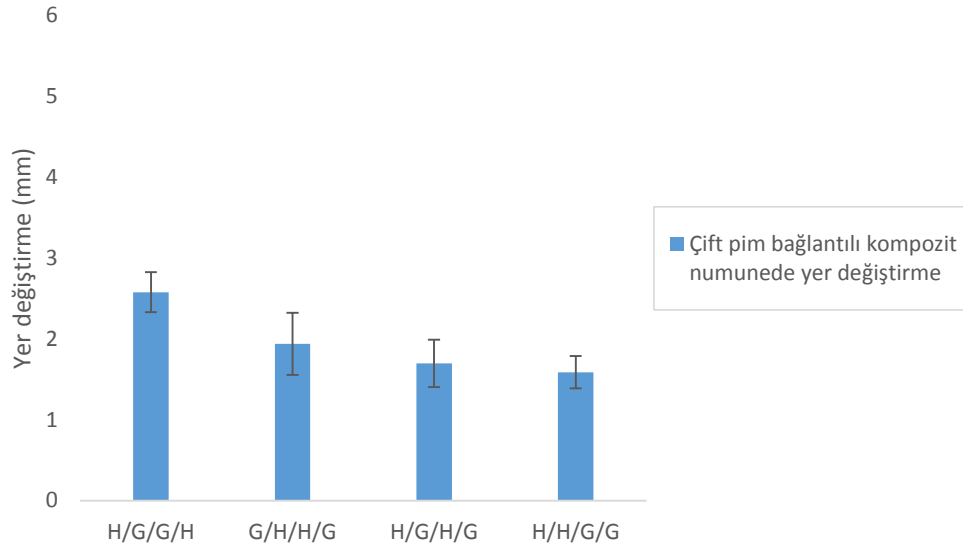
Şekil 3.210. Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.211. Tabakalı deliksiz kompozit numunede yer değiştirme.



şekil 3.212. Tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.



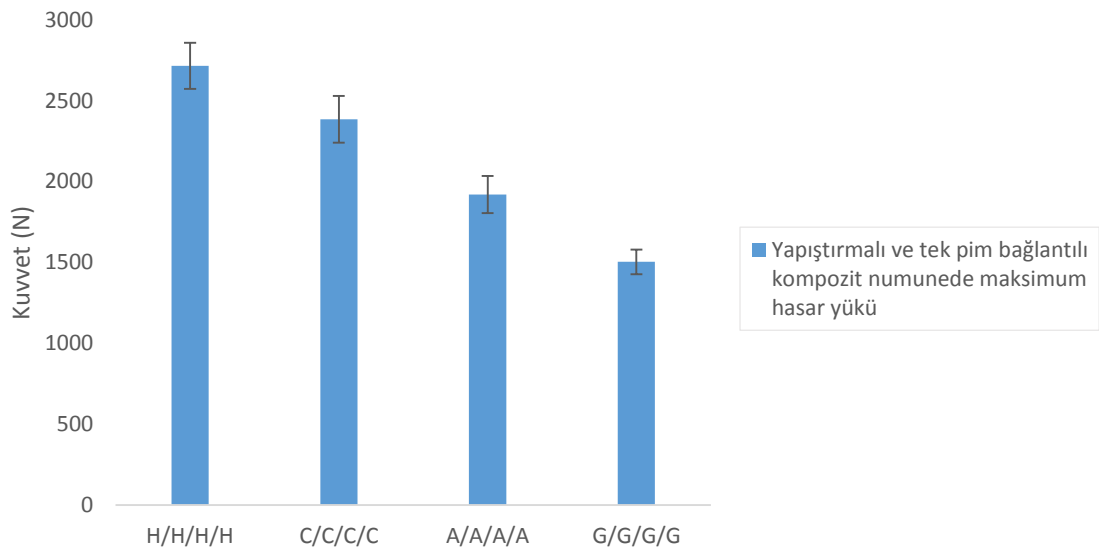
şekil 3.213. Çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

Tablo 3.6 H/G/H/G, H/H/G/G, H/G/G/H ve G/H/H/G dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri verilmiştir. şekil 3.205 ile 3.207 arasında sırasıyla deliksiz, tek pim, çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. şekil 3.208 ile 3.210 arasında maksimum hasar yükündeki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi gösterilmiştir. Hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi şekil 3.211 ile 3.213 arasında verilmiştir. Deliksiz numunede; maksimum hasar yükünün elde edildiği G/H/H/G dizilimine göre H/G/G/H diziliminin hasar yükünde

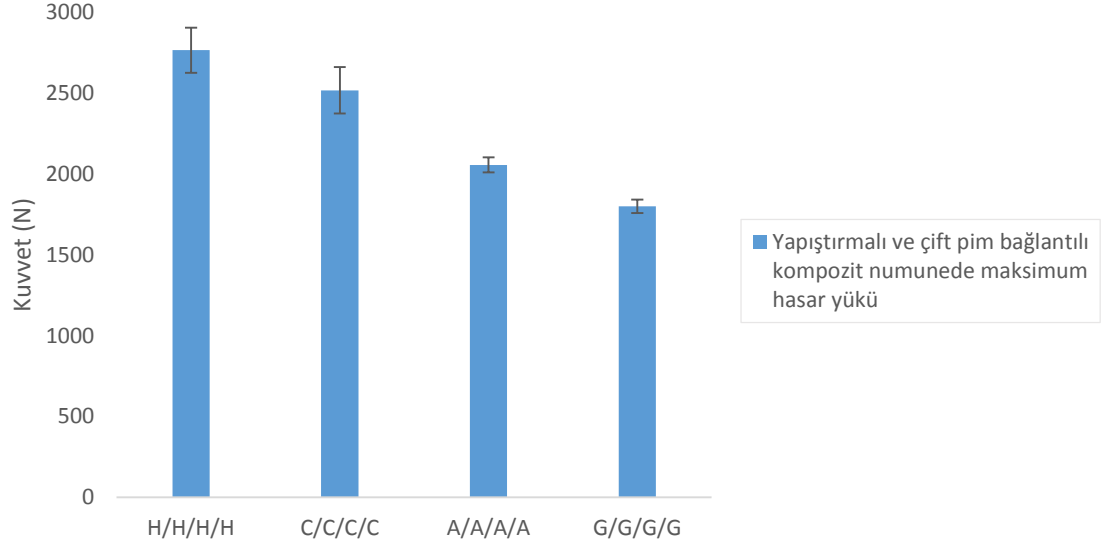
%30'luk bir düşüş, H/H/G/G dizilimi yerine H/G/G/H dizilimi kullanmak ise %26'lık bir düşüş etkisi yaratmıştır. Tek pimli numunede; H/H/G/G dizilimi yerine H/G/G/H dizilimi kullanmak arasında hasar yükünde %27'lik bir azalma meydana gelmiştir. Maksimum hasar yükü G/H/H/G dizilimi ile H/G/G/H dizilimi arasında hasar yükünde %28'lik bir düşüş etkisi vardır. Çift pimli numunede ise; maksimum hasar yükünün elde edildiği G/H/H/G dizilimi yerine minimum hasar yükü elde edilen H/G/G/H dizilimi arasında hasar yükünde %29'lık bir azalma meydana gelmiştir. H/H/G/G dizilimi yerine H/G/G/H dizilimi kullanıldığında hasar yükünde %28'lik bir azalma elde edilmiştir. Bu malzemeler için dizilimin hasar yüküne etkisinin olmadığı parametresi elde edilmiştir.

Tablo 3.7. G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için yapıştırırmalı ve pim bağlantılı numunelerde hasar yükleri ve tipleri.

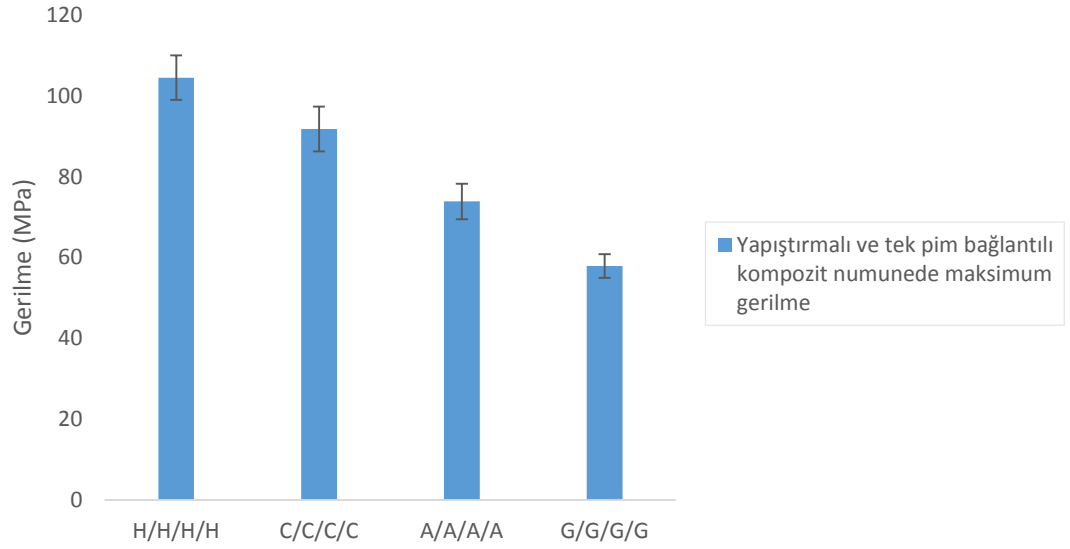
	Yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Yapıştırırmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
G/G/G/G	1504	Delikte ezilme ve levhada yırtılma	1799	Delikte ezilme ve levhada kesme-yırtılma
C/C/C/C	2385	Delikte ezilme ve levhada kesme	2517	Delikte ezilme ve levhada kesme-yırtılma
A/A/A/A	1920	Delikte ezilme ve levhada yırtılma	2055	Delikte ezilme ve levhada kesme
H/H/H/H	2716	Delikte ezilme ve levhada yırtılma	2765	Delikte ezilme ve levhada kesme



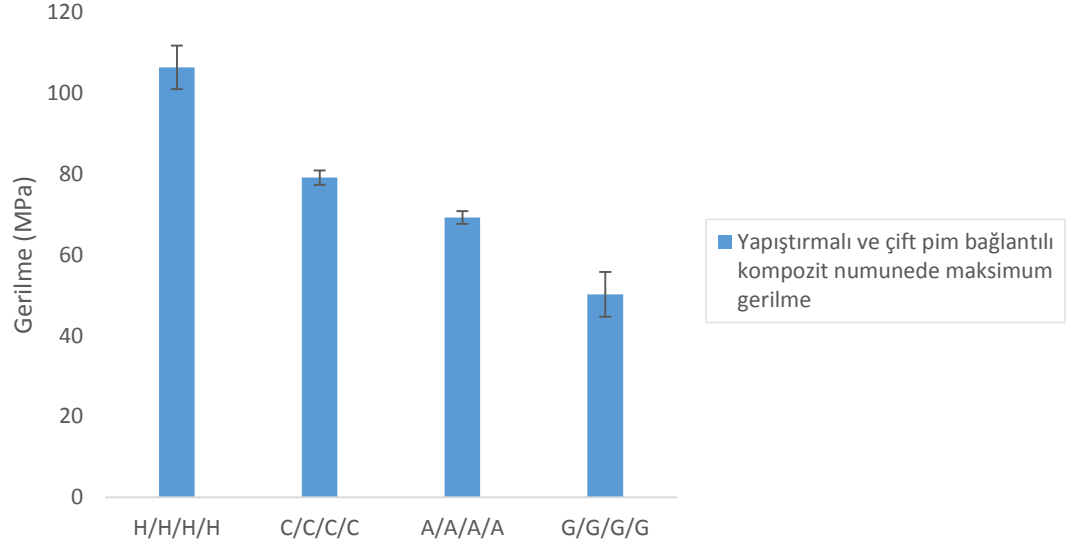
Şekil 3.214. Yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



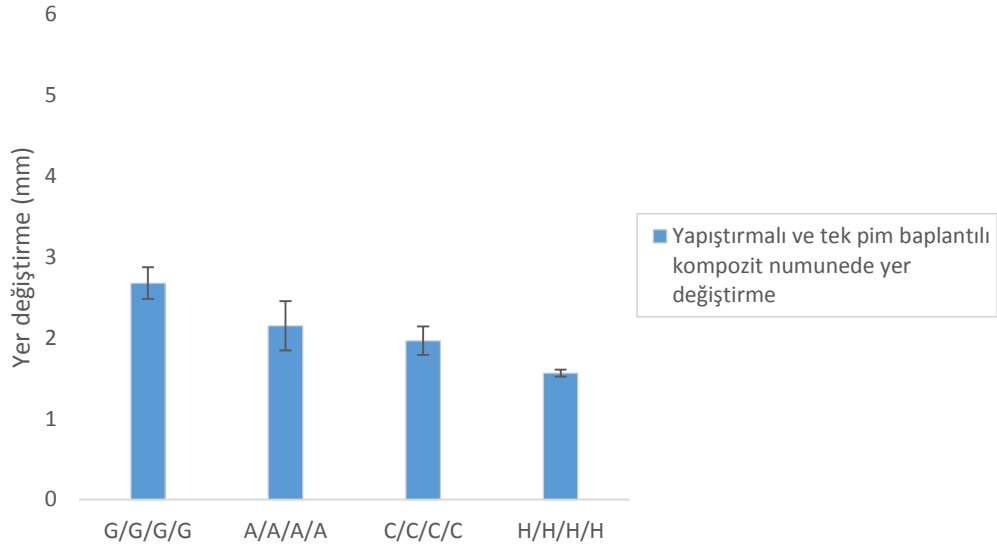
Şekil 3.215. Yapıştırılmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



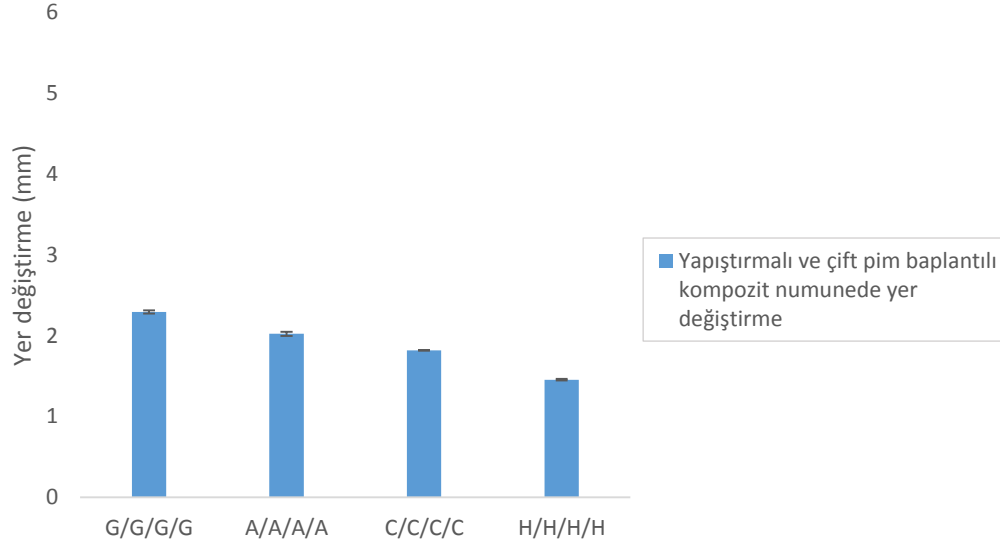
Şekil 3.216. Yapıştırılmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.217. Yapıştırılmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.218. Yapıştırılmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

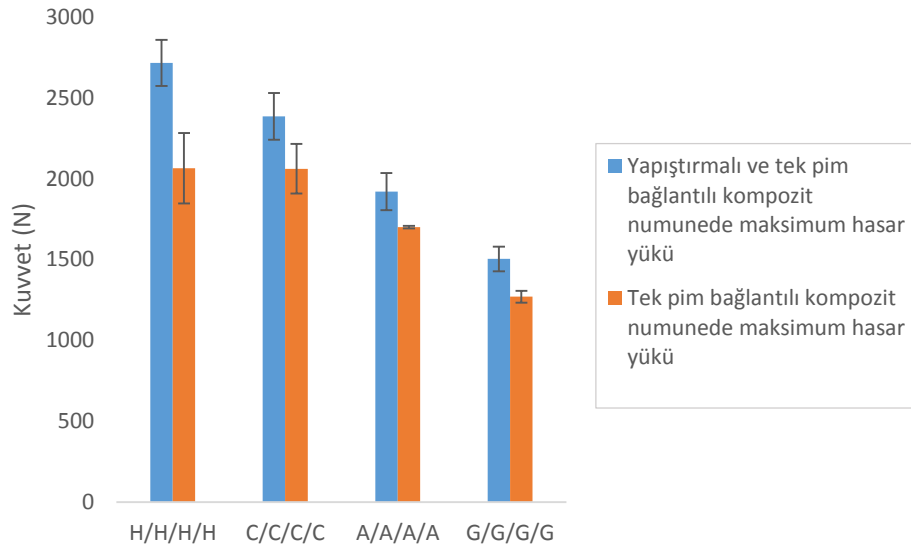


Şekil 3.219. Yapıştırılmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

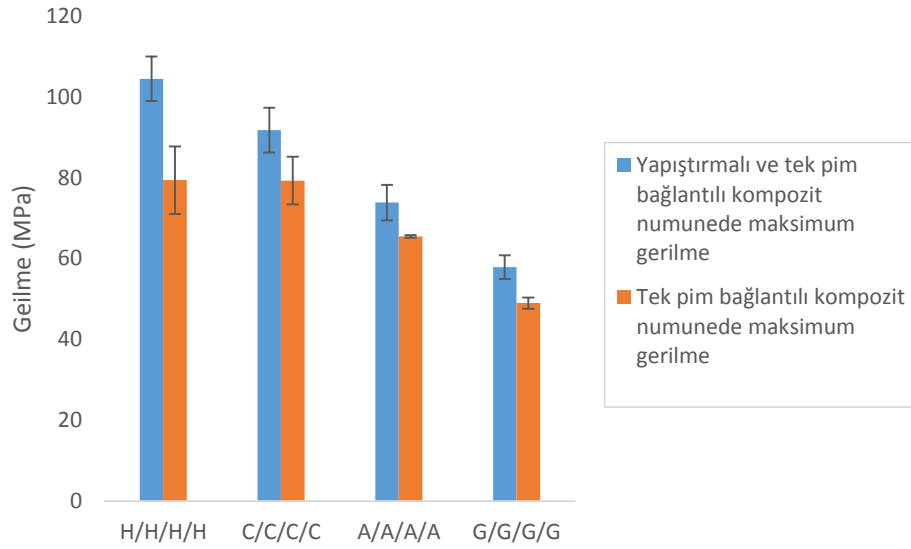
Tablo 3.7 H/H/H/H, A/A/A/A, C/C/C/C, G/G/G/G dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri verilmiştir. Şekil 3.214 ve 3.215 arasında sırasıyla yapıştırılmalı tek pim ve yapıştırılmalı çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. Şekil 3.216 ve 3.217 arasında maksimum hasar yükündeki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi verilmiştir. Şekil 3.218 ve 3.219 arasında hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi verilmiştir. Yapıştırılmalı ve tek pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede gerçekleşmiştir. H/H/H/H diziliminde minimum hasar yükü olan G/G/G/G dizilimine göre hasar yükünde %44'lük bir azalma meydana gelmiştir. Yapıştırılmalı ve çift pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede meydana gelmiş olup, hasar yükünde %35'lik bir azalma gerçekleşmiştir. Her iki numune için yapılan deneylerde dizilim olarak maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü ise G/G/G/G diziliminde meydana gelmiştir. Tabaka diziliminde malzeme değişiminin etkisi hasar yükünde yapıştırılmalı ve tek pim bağlantılı bağlantılarda daha etkili bir parametredir. Dolayısıyla hasar yükündeki bu etki gerilmede de aynıdır. Yer değiştirme büyükten küçüğe sırasıyla; G/G/G/G, A/A/A/A, C/C/C/C ve H/H/H/H şeklindedir. En yüksek yer değiştirme G/G/G/G, en düşük yer değiştirme ise H/H/H/H'de meydana gelmiştir. G/G/G/G dizilimi H/H/H/H dizilimine göre daha yumuşak bir malzeme olmasından dolayı daha fazla uzama meydana getirmiştir. H/H/H/H diziliminin ise daha gevrek bir malzeme olduğu görülmektedir.

Tablo 3.8. G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı numunelerde maksimum hasar yükleri ve tipleri.

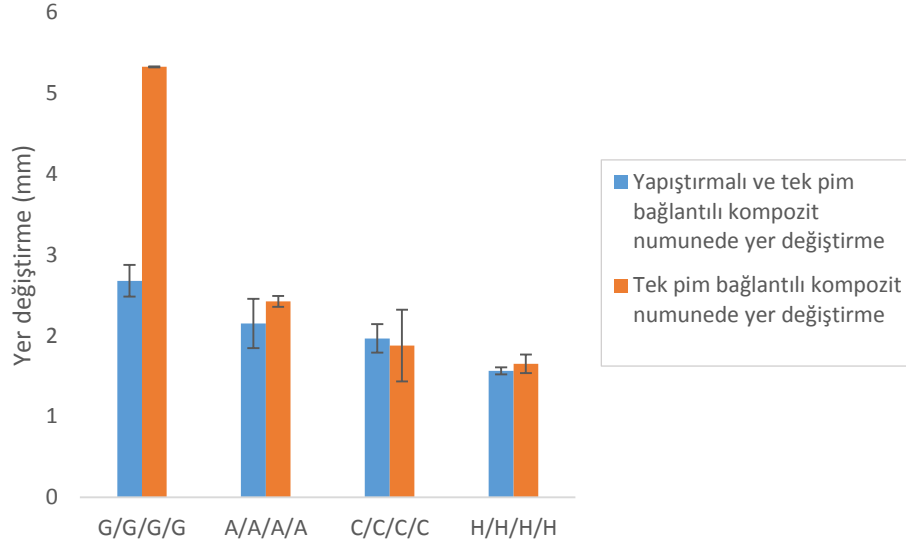
	Yapıştırırmalı ve tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
G/G/G/G	1504	Delikte ezilme ve levhada yırtılma	1270	Delikte ezilme ve levhada kesme
C/C/C/C	2385	Delikte ezilme ve levhada kesme	2061	Delikte ezilme
A/A/A/A	1920	Delikte ezilme ve levhada yırtılma	1701	Delikte ezilme
H/H/H/H	2716	Delikte ezilme ve levhada yırtılma	2064	Delikte ezilme



Şekil 3.220. Tek pim ve yapıştırırmalı-tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



Şekil 3.221. Tek pim ve yapıştırırmalı-tek pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.

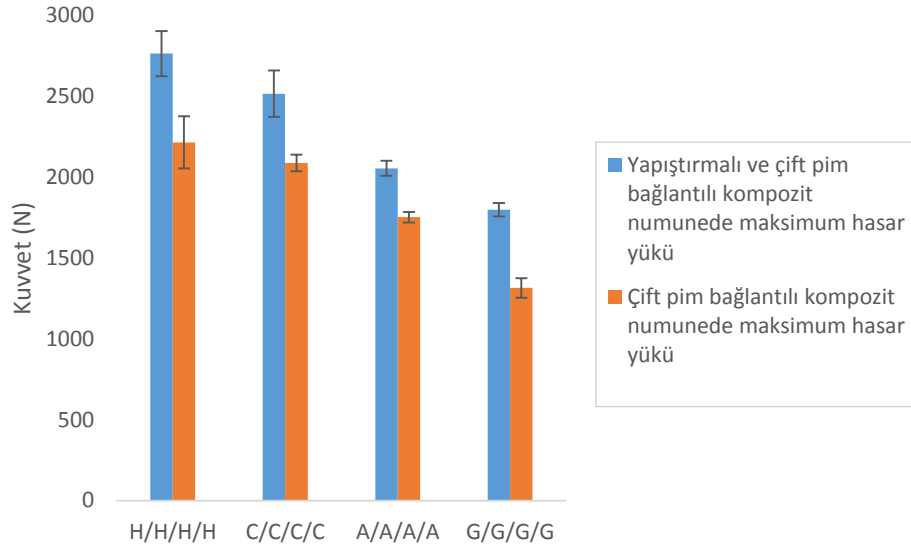


Şekil 3.222. Tek pim ve yapıştırılmalı-tek pim bağlantılı kompozit numunede yer değiştirme.

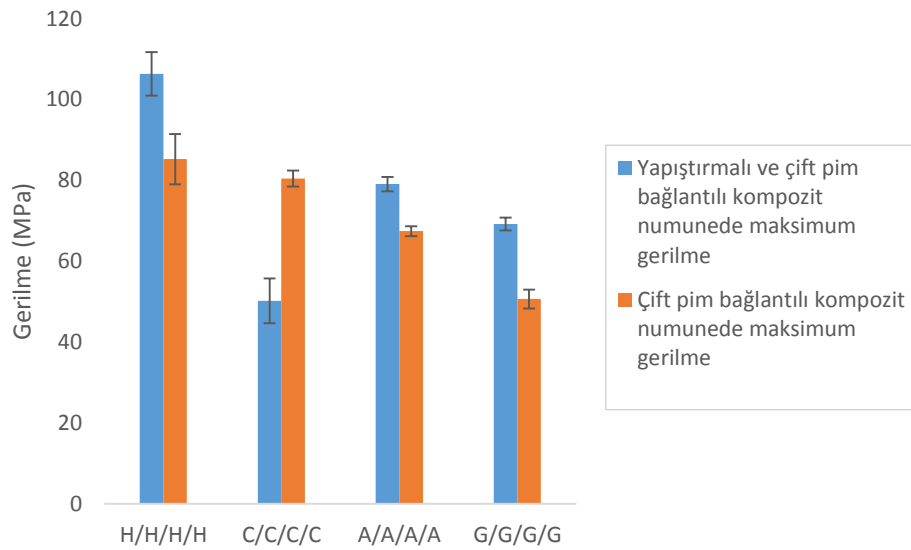
H/H/H/H, A/A/A/A, C/C/C/C, G/G/G/G tek delikli ve yapıştırılmalı tek delikli dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri Tablo 3.8’de verilmiştir. Şekil 3.220’de sırasıyla tek pim ve yapıştırılmalı tek pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. Şekil 3.221’de hasar noktasındaki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi verilmiştir. Şekil 3.222’de hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi verilmiştir. Tek pim ve yapıştırılmalı tek pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede gerçekleşmiştir. H/H/H/H dizilimli numunede tek pim bağlantı yapıştırılmalı tek pim bağlantıya göre hasar yükünde %2’lik bir artış, A/A/A/A diziliminde hasar yükünde %7’lik bir artış, C/C/C/C numunesinde %5’lik bir artış ve G/G/G/G diziliminde hasar yükünün %16’lık bir artış etkisi vardır. Bağlantı noktasında yapıştırıcının olması hasar noktasındaki kuvveti artırmıştır. Dolayısıyla bu etki hasar noktasındaki gerilmede de aynıdır. Yer değiştirme büyükten küçüğe sırasıyla; G/G/G/G, A/A/A/A, C/C/C/C ve H/H/H/H şeklindedir. En yüksek yer değiştirme G/G/G/G, en düşük yer değiştirme ise H/H/H/H’de meydana gelmiştir.

Tablo 3.9. G/G/G/G, C/C/C/C, A/A/A/A ve H/H/H/H tabaka için yapıştırma ve çift pim bağlantılı numunelerde hasar yükleri ve tipleri.

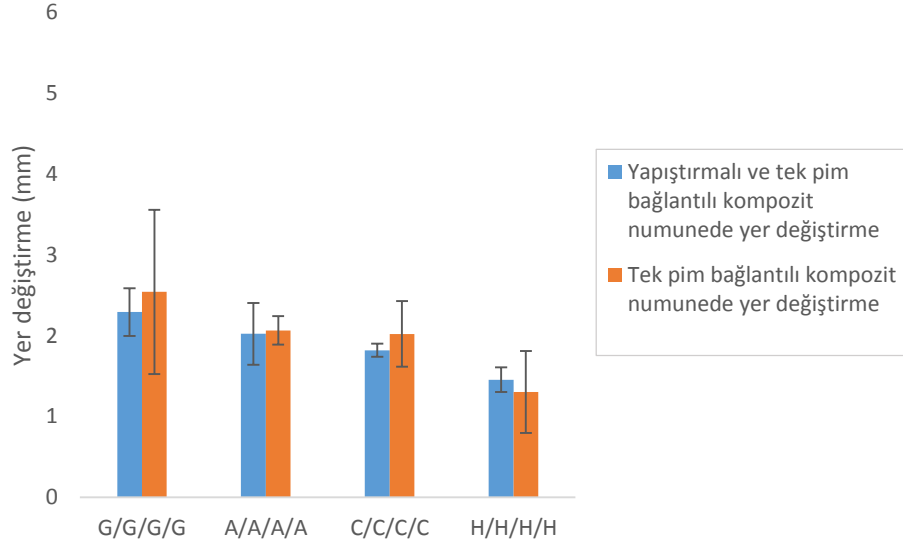
	Yapıştırılmalı ve çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi		Çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü ve hasar tipi	
G/G/G/G	1799	Delikte ezilme ve levhada kesme-yırtılma	1316	Delikte ezilme ve levhada kesme
C/C/C/C	2517	Delikte ezilme ve levhada kesme-yırtılma	2088	Delikte ezilme ve levhada kesme
A/A/A/A	2055	Delikte ezilme ve levhada kesme	1753	Delikte ezilme
H/H/H/H	2765	Delikte ezilme ve levhada kesme	2216	Delikte ezilme ve levhada kesme



Şekil 3.223. Çift pim ve yapıştırılmalı-çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum hasar yükü.



Şekil 3.224. Çift pim ve yapıştırılmalı-çift pim bağlantılı kompozit numunede maksimum gerilme değerleri.



Şekil 3.225. Çift pim ve yapıştırılmalı-çift pim bağlantılı kompozit numunede şekil değiştirme oranları.

H/H/H/H, A/A/A/A, C/C/C/C, G/G/G/G tek delikli ve yapıştırılmalı tek delikli dizilimi için maksimum yük ve hasar tipleri Tablo 3.9 verilmiştir. Şekil 3.223’de sırasıyla çift pim ve yapıştırılmalı çift pim bağlantılı numuneler için maksimum hasar yükünün malzeme tipiyle değişimi verilmiştir. Şekil 3.224’de hasar noktasındaki gerilme değerinin malzeme üzerindeki değişimi gösterilmiştir. Şekil 3.225’de hasar noktasındaki yer değişim ile malzeme arasındaki yer değişim ilişkisi verilmiştir. Çift pim ve yapıştırılmalı çift pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede gerçekleşmiştir. H/H/H/H numunesinde çift pim bağlantılı numune yapıştırılmalı çift pim bağlantılı numuneden hasar yükünde %24’lük bir artış, A/A/A/A diziliminde %12’lik bir artış, C/C/C/C numunesinde %14’lük bir artış ve G/G/G/G diziliminde %16’lık bir hasar yükü artış etkisi vardır. Bağlantı noktasında yapıştırıcının olması hasar noktasındaki kuvveti artırmıştır. Dolayısıyla bu etki hasar noktasındaki gerilmede de aynıdır. Yer değiştirme büyükten küçüğe sırasıyla; G/G/G/G, A/A/A/A, C/C/C/C ve H/H/H/H şeklindedir. En yüksek yer değiştirme G/G/G/G, en düşük yer değiştirme ise H/H/H/H’de meydana gelmiştir.

4.TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında farklı malzeme dizilimine sahip tabakalı kompozitlerin üretimi laboratuvar şartlarında elle yatırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Kompozit malzemede fiber olarak cam, aramid, karbon, hibrit ve matris malzemesi olarak epoksi kullanılmıştır. Tek ve çift pim bağlantıları gerçekleştirilen bu kompozitlerin çekme testi sonucu hasar yükleri ve uzama miktarları belirlenmiştir. Sonuçlar deliksiz kompozit numuneler ile karşılaştırılmıştır. Tabaka diziliminin hasar yükleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca numunelerde oluşan hasar şekilleri fotoğraflar halinde verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır;

- H/H/H/H, C/C/C/C, A/A/A/A ve G/G/G/G numunelerinde yapılan deneylerde deliksiz, tek pim bağlantı ve çift pim bağlantı için maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü ise G/G/G/G diziliminde meydana gelmiştir. Malzeme değişimi çift pim bağlantılı kompozitlerde maksimum hasar kuvveti üzerinde daha etkili bir parametredir. Bu etki gerilme için de aynıdır.
- Malzemenin hasara karşı gösterdiği tepki bağlantı tipinin değişimiyle değişmemektedir.
- İki farklı malzeme kullanımı sonucu, tabaka diziliminde malzeme sırasının değişimi hasar yükleri üzerinde belirli oranlarda etkili olduğu gözlemlenmiştir. Tüm malzeme dizilimleri içerisinde hasar yükündeki değişim çift pim bağlantısında H/H/H/H'den G/G/G/G'ye geçiş için %40 olarak elde edilmiştir. En düşük ise cam karbon diziliminde tek pim bağlantısı için C/C/G/G'den G/C/C/G'ye geçişte %8 olarak elde edilmiştir.
- En büyük hasar yükleri A/A/G/G, H/H/A/A, H/H/C/C dizilimleri için tüm bağlantı tiplerinde elde edilmiştir. G/G/C/C ve H/H/G/G dizilimlerinde ise bu değerler en büyük olmamasına rağmen maksimum yük değerine yakındır.
- Yer değiştirme büyükten küçüğe sırasıyla; G/G/G/G, A/A/A/A, C/C/C/C ve H/H/H/H şeklindedir. En yüksek yer değiştirme G/G/G/G, en düşük yer değiştirme ise H/H/H/H'de meydana gelmiştir. G/G/G/G, H/H/H/H dizilimine göre daha yumuşak bir malzeme olmasından dolayı daha fazla uzama meydana getirmiştir. HHHH ise gevrek bir malzeme olduğu için yer değiştirme en düşüktür.

- Aramid ve cam kompozitin tabakalı dizilimiyle elde edilen numunelerde; maksimum hasar yükü A/A/G/G'de minimum hasar yükü ise G/A/G/A'da gerçekleşmiştir. Deliksiz, tek pim ve çift pim dizilimde cam kompozitin dışarıda aramid kompozitin içeride olması (A/G/G/A) veya cam kompozitin içeride aramid kompozitin dışarıda olması (G/A/A/G) hasar yükü sonucunu değiştirmemiştir. Bu malzeme için diziliminin etkisi tek ve çift pimde daha önemli bir parametredir.
- Aramid ve hibrit kompozitin tabakalı dizilimiyle elde edilen numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/A/A'de minimum hasar yükü ise H/A/H/A'da gerçekleşmiştir. Malzeme diziliminin etkisi tek ve çift pimde daha önemli bir parametredir.
- Aramid ve karbon kompozitin tabakalı dizilimiyle elde edilen numunelerde; maksimum hasar yükü C/C/A/A'de minimum hasar yükü ise C/A/A/C'de gerçekleşmiştir. Dizilimde karbon kompozitin dışarıda aramid kompozitin içeride olması (C/A/A/C) veya karbon kompozitin içeride aramid kompozitin dışarıda olması (A/C/C/A) sonucu değiştirmemiştir. Bu malzemede malzeme diziliminin etkisi deliksiz numunede daha etkili bir parametredir.
- Cam ve karbon kompozitin tabakalı dizilimiyle elde edilen numunelerde; maksimum hasar yükü C/C/G/G'de minimum hasar yükü ise G/C/C/G'de gerçekleşmiştir. Dizilimde karbon kompozitin dışarıda cam kompozitin içeride olması veya karbon kompozitin içeride cam kompozitin dışarıda olması sonucu değiştirmemiştir (C/G/G/C veya G/C/C/G). Malzeme diziliminin etkisi deliksiz numunede daha etkili bir parametredir.
- Cam ve hibrit kompozitin tabakalı dizilimiyle elde edilen numunelerde; maksimum hasar yükü G/H/H/G'de minimum hasar yükü ise H/G/G/H'de gerçekleşmiştir. Malzeme değişiminin önemi yoktur.
- Yapıştırılmalı ve pim bağlantılı numunelerde; yapıştırılmalı tek pim ve yapıştırılmalı çift pim numuneleri için yapılan deneylerde dizilim olarak maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü ise G/G/G/G diziliminde meydana gelmiştir. Dolayısıyla hasar yükündeki bu etki gerilmede de aynıdır. Yer değiştirme büyükten küçüğe sırasıyla; G/G/G/G, A/A/A/A, C/C/C/C ve H/H/H/H şeklindedir. En yüksek yer değiştirme G/G/G/G, en düşük yer değiştirme ise H/H/H/H'de meydana gelmiştir.
- Tek pim ve yapıştırılmalı tek pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede gerçekleşmiştir. Bağlantı

noktasında yapıştırıcının olması hasar noktasındaki kuvveti artırmıştır. Dolayısıyla hasar yükündeki bu etki hasar noktasındaki gerilmede de aynıdır.

- Çift pim ve yapıştırmalı çift pim numunelerde; maksimum hasar yükü H/H/H/H, minimum hasar yükü G/G/G/G dizilimli numunede gerçekleşmiştir. Özetle yapıştırmalı bağlantıların hasar yükü davranışı yapıştırıcısız pim bağlantılarıyla benzerdir. Tek fark hasar yüklerinin daha yüksek olmasıdır.
- Tabaka dizilimin hasar tipi üzerinde etkili olmadığı gözlemlenmiştir. Aynı fiber takviye açısına sahip numunelerde farklı tabaka dizilimlerinde hasar yüklerinin değişmesine rağmen hasar tipi değişmemektedir. Tüm pim bağlantılarda; tercih edilebilir bir hasar şekli olarak kabul edilen delikte ezilme şeklinde bir hasarın olduğu görülmüştür. Farklı yapılardaki örgü kompozit kumaşlardan üretilen tabakalı hibrit kompozit plakalarda tespit edilen hasar yükleri yapıştırıcı kullanımına bağlı olarak küçük değişiklikler göstermiştir.
- Yapılan çalışma; mekanik özellikleri farklı kompozit malzemeler, farklı çözülebilir bağlantı türleri, çoklu bağlantılar ve tek tesirli bağlantılar için uygulanabilir. Dolayısıyla ileride yapılacak bu tür çalışmalara örnek olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Şahin, Y.**, 2006. “Kompozit Malzemelere Giriş”, *Seçkin yayıncılık*, Ankara.
- [2] **MORAIS, A.B. ve PEREIRA, A.B.**, 2007. Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates, *Composites: PartA*, 38, 785–794.
- [3] **Solmaz, M.Y.**, 2008. Yapıştırıcı ile birleştirilmiş bağlantıların mekanik analiz ve tasarımları, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi.
- [4] **Yazıcı M., Ülkü S.**, 2003. İki Boyutlu Rasgele Dağılı E-Cam Lifi/Polyester Matris Kompozitlerde Yük-leme Hızının Mukavemet Üzerine Etkisinin İncelenmesi, *Uludağ Üniv. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 8, Sayı 1.
- [5] **Palancıoğlu, H. Sen, F. Aldas, K.**, 2008. Yapıştırma Bağlantıları ve Uygulama Usulleri, *Makine Tek Dergisi, Bileşim Yayıncılık*, İstanbul, 1: 38-42.
- [6] **Silva, L.F.M., Adams, R.D.**, 2007. Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 27: 362-379.
- [7] **Gediktaş, M.**, 1972. Yapıştırma Bağlantıları, *Mühendis ve Makine*, 16: 178; 27-33.
- [8] **Mackerle, J.**, 1997. Finite element analysis and simulation of adhesive bonding, soldering and brazing: A bibliography (1976-1996), *Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 5: 159-185.
- [9] **Sen, F., Pakdil, M., Sayman O. and Benli, S.**, 2008. Experimental failure analysis of mechanically fastened joints with clearance in composite laminates under preload, *Materials & Design*, 29, 1159-1169.
- [10] **Aldas, K., Palancıoğlu, H. and Sen, F.**, 2009. Thermal stresses in adhesively bonded double lap joints by FEM, *Technological Researches*, 6/4, 55-64.

- [11] **Horng, L.T., Ju, H.S.**, 1999. Behaviors of a Single Crack in Multiple Bolted Joints, *International Journal of Solids and Structures*, *International Journal of Solids and Structures*, 36, 4055-4070.
- [12] **Pekbey, Y.**, 2007. Pim Bağlantılı Tabakalı Kompozit Plakada Ön Gerilme Momenti ile Geometrik Parametre Değişiminin Hasar Analizine Etkisi, 8. *Uluslar arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı*, 7-9 Kasım.
- [13] **Ersoy, Y.H.**, 2001. Kompozit Malzeme, *Literatür Yayıncılık*, İstanbul.
- [14] **Gören, A. and Sayman, O.**, 2010. Experimental Failure Analysis of Bolted Joints in Moisture- and Temperature- Induced Composite Laminates under Preload, *Polymer Composites*, 31:173-178.
- [15] **Karakuzu, R., İçten B.M. and Tekinşen, Ö.**, 2010. Failure Behavior of Composite Laminates with Multi-Pin Loaded Holes, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 29, No:2.
- [16] **Mallick, P.K.**, 1993. Fiber-Reinforced Composites Materials, Manufacturing and Design, Second Edition, Revised and Expanded, *Department of Mechanical Engineering University of Michigan-Dearborn*, Marcel Dekker All Rights Reserved.
- [17] **Jones, R.M.**, 1975. Mechanics of Composite Materials, Professor of Engineering Science and Mechanics Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia, by Hemisphere Publishing Corporation, USA.
- [18] **Matthews, F.L., Davies, G.A.O., Hitchings D., and Soutis, C.**, 2000. Finite Element Modelling of Composite Materials and Structures, *Woodhead Publishing Limited ad CRS Pres LLC*, Cambridge England.
- [19] **Seo, D.C., Lee, J.J.**, 2002. Fatigue Crack Growth Behavior of Cracked Aluminum Plate Repaired With Copmosite Patch, *Composite Structures*, 57: 1-4, 323-330.
- [20] **Dursun, T.**, 2006. Civata Bağlantılı Tabakalı Kompozit Levhalarda Hasar Analizi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [21] **Kanhoğlu, H.**, 1994. Environmental Effects on Pin-Loaded Laminated Composites, *Graduate School of Natural and Applied Sciences*, Dokuz Eylül University, June, İzmir.

- [22] **Isaac, M.D. and Ishai, O.**, 1994. Engineering Mechanics of Composite Materials, *New York Oxford*, Oxford University Pres.
- [23] **Carlsson, L.A. and Pipes, R.B.**, 1997. Experimental Characterization of Advanced Composite Materials, *Technomic Publishing Company*, Second Edition, U.S.A.
- [24] **Sayman, O. ve Aksoy, S.**, 1989. Kompozit Malzemeler, *Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Ders notları*, Bornova, İzmir.
- [25] **Gür, M. ve Turgut, A.**, 1991. Farklı iki malzemedan meydana gelen ve sıcaklık etkisine maruz düzlem levhalarda ısı gerilmelerin ve şekil değıştirmelerin sonlu elemanlar metodu ile analizi, 5. *Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu*.
- [26] **Turan, K.**, 2009. Çözülebilan Bağlantılı Kompozit Plakaların Mekanik Davranışlarının Analizi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [27] **Kılıç, E.**, 2006. Kompozit Malzemelerden Yapılan Yaprak Yayların Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir.
- [28] **Aktaş, A., Demircioğlu, K.T., Arslan, M. ve Soutis, C.**, 2010. Cıvata Bağlantılı Karbon/Epoksi Kompozit Plakaların Kademeli Hasar Analizi, 2. *Ulusal Tasarım İmalatve Analiz kongresi*, 11-12 Kasım, Balıkesir.
- [29] **Chang, F.K., Chang, K.Y.**, 1987. A Progressive Damage Model for Laminated Composites Containing Stress Concentrations, *Journal of Composite Materials*, 21: 834-855.
- [30] **Chang, F.K., Chang, K.Y.**, 1987. Post-Failure Analysis of Bolted Composite Joints in Tension or Shear-out Mode Failure, *Journal of Composite Materials*, 21; 809-833.
- [31] **Dano, M.L., Gendron, G. and Picard, A.**, 2000. Stress and Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints in Composite Laminates, *Composite Structures*, 50: 287-296.
- [32] **Lessard, L., Shokrieh, M.M.**, 1995. Two-Dimensional Modelling of Composite Pinned-Joint Failure, *Journal of Composite Materials*, 29: 671-697.

- [33] **Ayatollahi, M.R., Hashemi, R.,** 2007. Mixed Mode Fracture in an Inclined Center Crack Repaired by Composite Patching, *Composite Structures*, 81(2): 264-273.
- [34] **Belhouari, M., Bouiadjra, B.B., Megueni, A. and Kaddouri, K.,** 2004. Comparison of Double and Single Bonded Repairs to Symmetric Composite Structures: A Numrical Analysis, *Composite Structures*, 65(1): 47-53.
- [35] **Bouiadjra, B.B., Belhouari, M., Serier, B.,** 2002. 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.
- [36] **Turgut, A., Gür, M.,** 1994. Statik Sürtünmeli Temas Problemlerinin Sonlu Elemanlar Metoduyla Çözümü, Tr. *Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 18: 119-125.
- [37] **Okutan, B.,** 2003. The strength of pinned joints in laminated composites, *Composites Science and Technology*, 63: 893-905.
- [38] **Turgut, A. Geçit, R.,** 1987. Extention of Finite Strip Bonded to Rigid Support, *Computational Mechanics*, 3: 398-410.
- [39] **Turgut, A., Arslan, N., Kaman, M.K.,** 2000. Düzlem Kafes Sistemlerinin Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analizi, *Fırat Üniv. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12: 209-217.
- [40] **Saçak, M.,** 2013. Polimer Teknolojisi, *Gazi Kitabevi*, Ankara, 277-278, 292-294, 226-227.
- [41] **Soykok, I.F.,** 2015. End geometry and pin-hole effects on axially loaded adhesively bonded composite joints, *Composites Part B: Engineering*, 77: 129-138.
- [42] **Turgut , A., Gür, M., ve Arslan, N.,** 1994. Kompozit Malzemelerde Arafazın Mukavemet Özelliklerinin Isıtma Şartlarına Bağlı Olarak Araştırılması, 6. *Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi*, ODTÜ , Ankara 149-157.
- [43] **Turan, K.,** 2003. Kompozit Levhalarda Fiber-Matriks Ara Yüzeyinde Gerilme Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- [44] **Gür, M., Turgut, A., ve Sancaktar, E.,** 1995. The effect of fiber type on the level of stress concentration created in filleted composite rectangular bars in bending, *International mechanical Engineering Congress and Exposition*, ASME, 49-55
- [45] **Gamdani, F., Boukhili, R. and Vadean, A.,** 2015. Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates, *Materials & Design*, 88: 702-712.
- [46] **Whitworth H.A., Aluko, O., Tomlinson, N.A.,** 2008. Application of the point stress criterion to the failure of composite pinned joints Author links open overlay panel, *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 1829-1839.
- [47] **Nerilli, F., Marino, M., Vairo, G.,** 2015. A Numerical Failure Analysis of Multi bolted Joints in FRP Laminates Based on Basalt Fibers, *Procedia Engineering*, 109: 492-506.

ÖZGEÇMİŞ

Esin ERHAN 1982 yılında Elazığ'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2001 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazanarak 2006 yılında mezun oldu.

2006 yılından itibaren Makina Mühendisleri Odası Elazığ İl Temsilciliğinde Teknik Görevli olarak halen çalışmaktadır.

