



**ÜÇ BOYUTLU DOKUMA CAM FİBER/EPOKSİ
KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Sümeyye ERDEM

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Mete Onur KAMAN**

ELAZIĞ-2019

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÜÇ BOYUTLU DOKUMA CAM FİBER/EPOKSİ KOMPOZİTLERİN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Mak. Müh. Sümeyye ERDEM
(151120113)

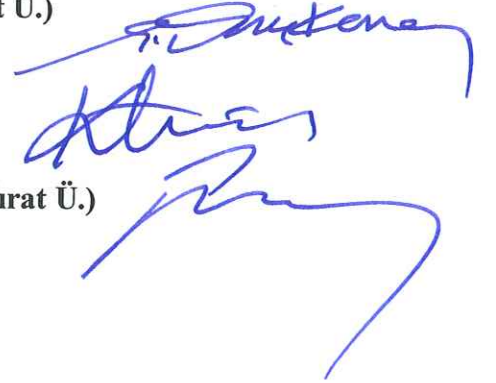
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 14.05.2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 31.05.2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mete Onur KAMAN (Fırat Ü.)

Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Kadir TURAN (Dicle Ü.)

Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ (Fırat Ü.)



MAYIS-2019

TEŞEKKÜR

Mesleki kariyerimde önemli bir basamak olan yüksek lisans eğitiminin son aşamasına gelmiş bulunmaktayım. Ülkeme ve insanlara faydalı olmak ve mesleğimi daha iyi icra edebilmek için henüz başında bulunduğum yolda birçok engelin bulunduğunun da bilincinde olarak;

Bu çalışmanın başlangıcından tamamlanmasına kadarki süreçte her zaman yardım ve desteğini esirgemeyen, bilgileriyle karşılaştığım sorunların üstesinden gelmemi sağlayan, ahlaki ve insani yönünü takdir ettiğim ve örnek aldığım, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum ve çalışma sürecinde bana olan yaklaşımıyla çalışma azmimi arttıran değerli hocam Prof. Dr. Mete Onur KAMAN'a teşekkür ederim.

Benden yardım ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Serkan ERDEM'e, Doç. Dr. Murat Yavuz SOLMAZ'a, Doç. Dr. Kadir TURAN'a ve Dr. Öğrt. Üyesi Mustafa GÜR'e teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni koruyan, maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve hep yanımda olan aileme teşekkür ederim.

Sümeyye ERDEM

Makine Mühendisi

Elazığ-2019

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET VII	
ABSTRACT.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIV
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XV
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XVI
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. KOMPOZİT MALZEMELER	11
3.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri	11
3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması.....	12
3.2.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	13
3.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	14
3.2.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler	14
3.2.4. Karma (Hibrid) Kompozit Malzemeler	14
3.3. Kompozitlerin Yapısında Kullanılan Temel Malzemeler	15
3.3.1. Matris	15
3.3.1.1. Epoksi Reçineler.....	15
3.3.1.2. Polyester Reçineler.....	16
3.3.1.3. Vinilester Reçineler.....	16
3.3.1.4. Metal Matrisler	16

3.3.2.	Elyaf	17
3.3.2.1.	Cam Elyaf lar	17
3.3.2.2.	Bor Elyaf lar	18
3.3.2.3.	Alumina Elyaf lar	19
3.3.2.4.	Grafit (Karbon) Elyaf lar	19
3.3.2.5.	Aramid Elyaf lar	20
3.4.	Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri.....	20
3.4.1.	Elle Yatırma Yöntemi	20
3.4.2.	Püskürtme Yöntemi.....	20
3.4.3.	Elyaf Sarma Yöntemi.....	21
3.4.4.	Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi	21
3.4.5.	Hazır Kalıplama Yöntemi	22
3.4.6.	Vakum Bağlaması Yöntemi	22
3.4.7.	Otoklav Bağlaması Yöntemi.....	22
4.	DOKUMA KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT YAPILAR.....	24
4.1.	Tek Yönlü (UD) Dokuma Kumaş lar.....	24
4.2.	İki Boyutlu (2D) Kumaş lar	25
4.2.1.	2D Dokuma Kumaş lar	25
4.2.2.	2D Örme Kumaş lar	26
4.2.3.	2D Braiding	27
4.1.3.	Üç Boyutlu (3D) Dokuma Kumaş lar	28
4.1.3.1.	3D Dokuma	29
4.1.3.2.	3D Örme	30
4.1.3.3.	3D Braiding	33
5.	MATERYAL VE METOD	35
5.1.	Problemin Tanımı.....	35

5.2.	Deneysel Çalışmalar	40
5.2.1.	Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Numunelerin Üretimi	44
5.2.2.	Delme İşlemi	49
5.2.2.	Çekme Testi	50
5.2.3.	Darbe Testi	53
6.	SONUÇLAR	57
6.1.	2D İki Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları.....	58
6.1.1.	Çentikli Numuneler	58
6.1.2.	Tek Pim Bağlantılı Numuneler	61
6.1.3.	Çift Pim Bağlantılı Numuneler	64
6.2.	2D Dört Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları.....	67
6.2.1.	Çentikli Numuneler	67
6.2.2.	Tek Pim Bağlantılı Numuneler	70
6.2.3.	Çift Pim Bağlantılı Numunelere ait Çekme Deneyi Sonuçları.....	73
6.3.	3D Tek Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları ve Hasar Tipleri ..	75
6.3.1.	Çentikli Numuneler	75
6.3.2.	Tek Pim Bağlantılı Numuneler	78
6.3.3.	Çift Pim Bağlantılı Numunelere ait Çekme Deneyi Sonuçları.....	80
6.4.	3D İki Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları ve Hasar Tipleri	82
6.4.1.	Çentikli Numuneler	82
6.4.2.	Tek Pim Bağlantılı Numuneler	84
6.4.3.	Çift Pim Bağlantılı Numuneler	87
6.5.	CORE3D Numunesine ait Çekme Deneyi Sonuçları	90
6.5.1.	Çentikli Numuneler	90
6.5.2.	Tek Pim Bağlantılı Numunelere	92
6.5.3.	Çift Pim Bağlantılı Numuneler	95

6.3.	Darbe Testi Deneyi Sonuçları.....	101
6.3.1.	2D 4 Tabakalı Numuneye ait Darbe Testi Sonuçları.....	101
6.3.2.	3D2T Numunesine ait Darbe Testi Grafiği.....	104
6.3.3.	CORE3D Numunesine ait Darbe Testi Grafiği	107
7.	TARTIŞMA VE ÖNERİLER	111
	KAYNAKLAR	115
	ÖZGEÇMİŞ	121



ÖZET

Üç Boyutlu Dokuma Cam Fiber/Epoksi Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

Bu çalışmada otomotiv, makine ve yapı üretiminde yeni yeni tercih edilen üç boyutlu dokuma cam fiber epoksi kompozitlerin mekanik özellikleri belirlenmiş, iki boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozit malzemelerin mekanik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Bu amaçla vakum infüzyon yöntemi kullanılarak çalışma materyali olan üç boyutlu dokuma cam fiber epoksi kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretim işleminin ardından elde edilen üç boyutlu dokuma cam fiber epoksi kompozit malzeme numunelerinin çentik ve pim bağlantı mukavemeti, mekanik özellikleri çekme testleri ile tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar iki boyutlu dokuma ile iki ve üç boyutlu dokuma kumaşlardan oluşan hibrit numunelerin mekanik performansı ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta çentik ve pim bağlantı geometrisinin hasar tipi ve mukavemeti üzerine etkisi iki boyutlu, üç boyutlu ve hibrit numuneler için incelenmiştir. Ayrıca levha kalınlığı boyunca örgünün darbe davranışı üzerine etkisi, düşük hızlı serbest düşme testleri ile belirlenmiştir. Üç boyutlu dokuma kumaşlarda, düzlem dışı fiber kullanımı çekme dayanımını, iki boyutlu kumaşlara göre arttırmıştır. Darbe testleri ise üç boyutlu kumaş kullanımının levhanın enerji sömürme miktarını arttırdığını ve delaminasyon oluşumunu engellediğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam fiber epoksi kompozit, üç boyutlu dokuma, çekme, darbe, pim bağlantısı

ABSTRACT

Investigation of Mechanical Properties of Three Dimensional Woven Glass Fiber/Epoxy Composites

In this study, the mechanical properties of the three dimensional woven glass fiber epoxy composites in automotive, machine and building production are determined and compared with the mechanical properties of two dimensional woven fabric reinforced composite materials. For this purpose, three dimensional woven glass fiber epoxy composite materials have been produced by using vacuum infusion method. The tensile strength of the three dimensional woven glass fiber epoxy composite material is obtained after the production process and the pin are strength and mechanical properties are determined by tensile tests. The results were compared with the mechanical performance of two dimensional and three dimensional woven fabrics. As a result, the effect of the notch and pin connection geometry on the failure type and strength is investigated for two dimensional, three dimensional and hybrid samples. In addition, the effect of three dimensional knitting on impact behavior is determined by low velocity impact tests. In three dimensional woven fabrics, the use of out of plane fibers increases the tensile strength compared to two dimensional fabrics. Additionally impact tests have shown that the use of three dimensional fabric increases the amount of energy absorption of the plate and prevents the delamination zone.

Key Words: Glass fiber epoxy composites, three dimensional woven, tensile, impact, pin joint

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1.	Kompozit malzemelerin sınıflandırılması 13
Şekil 4.1.	Tek yönlü dokuma yapıları..... 25
Şekil 4.2.	Kompozitleri güçlendirmede kullanılan dokuma kumaş yapıları 25
Şekil 4.3.	Araştırmada kullanılan 2D kumaşlar 26
Şekil 4.4.	Kompozit güçlendirmesinde kullanılan örme kumaşlar (a) atkı örme kumaş, (b) çözgü örme kumaş, (c) atkı ve çözgü ipliği yatırımlı çözgü örme kumaş 27
Şekil 4.5.	İki boyutlu braiding kumaş üretim prosesleri (a) tüp braiding (b) düz braiding (c) dolgu içeren (triaksiyal) braiding..... 28
Şekil 4.6.	Üç boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozit malzeme örnekleri 30
Şekil 4.7.	Multiaksiyal çözgü örme kumaş takviyeli kompozit malzeme görüntüsü 32
Şekil 4.8.	Şekillendirilmiş üç boyutlu örme kumaş takviyeli kompozit örnekleri 32
Şekil 4.9.	Üç boyutlu braiding takviyeli kompozit örnekleri 33
Şekil 4.10.	3D dokuma kumaşların sınıflandırılması 34
Şekil 5.1.	Deliksiz kompozit numune boyutları 36
Şekil 5.2.	Dairesel delikli kompozit numune boyutları 36
Şekil 5.3.	U kenar çentikli kompozit numune boyutları 36
Şekil 5.4.	Yarım daire kenar çentikli kompozit numune boyutları..... 36
Şekil 5.5.	Tek pim delikli kompozit numune boyutları a) $E/D = 1$, b) $E/D = 2$, c) $E/D = 3$, d) $E/D = 4$ 38
Şekil 5.6.	Çift pim delikli kompozit numune boyutları ($E/D=2$) a) $M/D = 1.5$, b) $M/D = 2$, c) $M/D = 2.5$ 39
Şekil 5.7.	Numune üretiminde kullanılan 2D dokuma cam fiber kumaşlar 41
Şekil 5.8.	Araştırmada kullanılan 3D dokuma kumaş a) genel, b) tabakalar arası ve c) modelleme görünümü 41
Şekil 5.9.	Çalışmada kullanılan boşluklu 3D kumaşların a) atkı yönünde, b) çözgü yönünde görünümü 42
Şekil 5.10.	3D boşluklu dokuma kumaş yapısı [29] 43
Şekil 5.11.	3D boşluklu kumaş üretimi 43

Şekil 5.12.	Kompozit malzeme üretiminde kullanılan reçine ve sertleştirici	44
Şekil 5.13.	Vakum infüzyon yönteminin gerçekleştirildiği kontrol panelli ısıtıcı masa	45
Şekil 5.14.	Kontrol üniteli ısıtıcı masa yüzeyine ayırıcı film serilmesi ve çevresinin kağıt bantlarla sarılması.....	45
Şekil 5.15.	Release film üzerine kompozit fiber ve peel ply serilmesi.....	46
Şekil 5.16.	Akış filesinin (mesh) peel ply üzerine serilmesi ve spiral hortumun yapıştırılması	46
Şekil 5.17.	Reçine ve vakum hatlarının oluşturulması	47
Şekil 5.18.	Vakum torbasının kurulan sistem üzerine serilmesi.....	47
Şekil 5.19.	Vakum ve reçine hattı hortumlarının takılması	48
Şekil 5.20.	Kompozit numunelerde pim deliği açma işlemi.....	49
Şekil 5.21.	Çekme testi cihazından bir görünüm	50
Şekil 5.22.	Numunelerin çekme testi makinesine bağlanması.....	51
Şekil 5.23.	Kompozit numunelerin pim bağlantı aparatı ile çekme testi cihazına bağlanması.....	51
Şekil 5.24.	Deney sonrası numuneye ait çekme testi grafiği	52
Şekil 5.25.	Darbe testi cihazı ve deneyi düzeneği	54
Şekil 5.26.	Kompozit numunenin darbe cihazı haznesine yerleştirilmesi ve sabitlenmesi	55
Şekil 5.27.	Darbe testi cihazına kompozit numunelerin darbe testi sonrası grafiklerinin elde edilmesi	55
Şekil 6.1.	2D2T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)	58
Şekil 6.2.	Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi	59
Şekil 6.3.	2D2T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$)	61
Şekil 6.4.	Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi	62

Şekil 6.5.	$E/D=2$ için 2D2T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5 ($M/D=1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D=2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D=2.5$) 64
Şekil 6.6.	Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi 65
Şekil 6.7.	2D4T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD) 67
Şekil 6.8.	Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi 68
Şekil 6.9.	2D4T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$) 70
Şekil 6.10.	Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi 71
Şekil 6.11.	$E/D=2$ için 2D4T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5 ($M/D=1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D=2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D=2.5$) 73
Şekil 6.12.	Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi 74
Şekil 6.13.	3D1T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD) 75
Şekil 6.14.	Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi 76
Şekil 6.15.	3D1T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$) 78
Şekil 6.16.	Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi 79
Şekil 6.17.	$E/D=2$ için 3D1T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5 ($M/D=1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D=2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D=2.5$) 80
Şekil 6.18.	Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi 81

Şekil 6.19.	3D2T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)	82
Şekil 6.20.	Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi	83
Şekil 6.21.	3D2T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$)	84
Şekil 6.22.	Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi	85
Şekil 6.23.	$E/D=2$ için 3D2T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5 ($M/D=1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D=2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D=2.5$)	87
Şekil 6.24.	Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi	88
Şekil 6.25.	CORE3D numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)	90
Şekil 6.26.	Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi	91
Şekil 6.27.	CORE3D tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$)	92
Şekil 6.28.	Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi	93
Şekil 6.29.	CORE3D çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikler $E/D=2$ için a) ÇE2M1.5 ($M/D=1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D=2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D=2.5$)	95
Şekil 6.30.	Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi	96
Şekil 6.31.	Deliksiz numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri	97
Şekil 6.32.	Çentikli numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri.....	98
Şekil 6.33.	Tek pim bağlantılı numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri..	99
Şekil 6.34.	Çift pim bağlantılı numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri	100

Şekil 6.35.	2D4T numunesine ait (a) kuvvet-yer değiştirme, (b) kuvvet-zaman, (c) enerji-zaman grafikleri (20 J)	101
Şekil 6.36.	3D2T numunesine ait (a) kuvvet-yer değiştirme, (b) kuvvet-zaman, (c) enerji-zaman grafikleri (30 J)	104
Şekil 6.37.	CORE3D numunesine ait (a) kuvvet-yer değiştirme, (b) kuvvet-zaman, (c) enerji-zaman grafikleri (20 J)	107
Şekil 6.38.	Darbe test maksimum hasar yükü (20 J)	108
Şekil 6.39.	Darbe test maksimum hasar yükü (30 J)	109



TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 5.1. Kompozit malzeme grupları ve çizimleri	35
Tablo 5.2. Kompozit numunelerin boyutları.....	37
Tablo 5.3. Tek ve çift pim delikli kompozit numunelerin boyutları	39
Tablo 5.4. Kompozit numunelere ait gösterim ve tanımlar	40
Tablo 5.5. Tek ve çift pim delikli numunelere ait ölçüler.....	50
Tablo 6.1. Çekme deneyi sonrası 2D2T numunelerde oluşan hasar resimleri.....	60
Tablo 6.2. Çekme deneyi sonrası 2D4T numunelerde oluşan hasar resimleri.....	63
Tablo 6.3. Çekme deneyi sonrası 3D1T numunelerde oluşan hasar resimleri.....	77
Tablo 6.4. Çekme deneyi sonrası 3D2T numunelerde oluşan hasar resimleri.....	86
Tablo 6.5. Çekme deneyi sonrası CORE3D numunelerde oluşan hasar resimleri.....	94
Tablo 6.6. 2D4T numuneler için darbe deneyi sonrası oluşan hasar resimleri	103
Tablo 6.7. 3D2T numuneler için darbe deneyi sonrası oluşan hasar resimleri	106
Tablo 6.8. CORE3D numuneler için darbe deneyi sonrası oluşan hasar resimleri.....	110
Tablo 7.1. Hasar resimleri.....	111
Tablo 7.2. Tabaka dizilimlerine göre malzemelerin mekanik özellikleri	114

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Kırılma enerjisi
E	: Elastisite modülü
F	: Maksimum yük
K	: Ani darbe mukavemeti
L	: Numunenin ilk uzunluğu
m	: Yük-uzama eğrisinin elastik bölgeye ait eğimi
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Paskal
t	: Numune kalınlığı
Δl	: Kopma uzama miktarı
ε	: Şekil değiştirme oranı
μm	: Mikron metre
w	: Numune genişliği
σ	: Çekme mukavemeti

KISALTMALAR LİSTESİ

2D	: 2 Dimensional (2 Boyutlu)
3D	: 3 Dimensional (3 Boyutlu)
PAN	: Poliakrilonitril
RTM	: Resin Transfer Mold (Reçine Transfer Kalıplama)
Micro-CT	: Micro Computed Tomography (Mikro Bilgisayarlı Tomografi)
H3DWTC	: Hybrid 3D Woven Textile Composites (Hibrid 3D Dokuma Tekstil Kompozitler)
SRCT	: Synchrotron Radiation Computed Tomography (Synchrotron Radyasyon Bilgisayarlı Tomografi)

1. GİRİŞ

İnsanların günlük yaşantılarında karşılaştıkları problemlere çözüm bulabilmek amacıyla farklı fiziksel özelliklere sahip en az iki malzemeyi çeşitli yollarla birleştirilerek elde ettikleri malzemeler kompozit malzeme olarak tanımlanmaktadır. Kompozit malzeme üretiminde malzemeler makro boyutta birleştirildiklerinden, söz konusu malzemelerin çıplak gözle ya da mikroskop yardımı ile görülebilmesi mümkündür [1]. Kompozit malzemelerin tarihi çok eski dönemlere dayanmaktadır. Geçmiş dönemde insanlar hassas ve kırılgan malzemelere hayvansal veya bitkisel kaynaklı ya da sentetik lifler ekleyerek daha sert ve sağlam malzemeler üretmişlerdir. İnsanoğlunun geçmiş dönemlerde yapmış olduğu kerpiç evler kompozit malzemelerin ilk üretimine örnek olarak verilebilir. Saman ve kilin karıştırılmasıyla elde edilen çamurla sağlam ve dayanıklı evler yapabilmışlardır. İnsanoğlu zayıf özelliğe sahip bir malzeme ile güçlü ve sağlam özelliğe sahip başka bir malzemeyi bir araya getirerek sağlam ve dayanıklı yeni bir malzeme üretmeyi amaçlamıştır. Günümüzde de yaygın bir kullanım alanına sahip olan kompozit malzemeler, hemen hemen endüstrinin tüm alanlarına girmiştir. Özellikle yüksek rijitlik ve mukavemet ihtiyacı olan yapılarda kompozit malzemeler, metallerin yerine sıklıkla tercih edilmektedir [2].

Yüksek mukavemet ve sertlik değerine sahip olan kompozit malzemeler, yoğunluklarının düşük olması, yorulma dayanıklılığının yüksek olması ve enerji absorpsiyon düzeyinin yüksek olması nedeniyle tercih edilirler. Kompozit malzemeler, günümüzde yeni gelişen farklı alanlarda da kullanılmaktadır [3]. Bu bağlamda kompozit malzemelerin geleceğin malzemesi olduğunu söylemek mümkündür.

Farklı ara yüzeyler içeren bir matris içerisinde mukavemet düzeyi yüksek modüllü fiberler ile birleşen kompozitler fiber takviyeli kompozit malzemeleri oluşturmaktadır. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyan fiber ve matrisler, kurdukları birliktelik ile yalnız başlarına sahip olamadıkları özelliklere sahip yeni bir malzeme oluştururlar [4]. Fiber takviyeli kompozit malzemelerde asıl yük taşıyıcı unsurlar fiber yapılar olup, matrisler ise yük aktarımı yaparlar. Ayrıca matrisler, fiberlerin nem ve yüksek sıcaklık değerlerinden olumsuz yönde etkilenmesini önleyici olarak da görev yapmaktadır [5].

Fiber takviyeli kompozit malzeme üretiminde matris tabakalarının ya da ince lif yapılarının üst üste konularak belli bir kalınlıkta bir araya getirilmesi en sık tercih edilen üretim yöntemidir. Fiber takviyeli kompozit malzeme üretiminde kullanılan lif tabakalarının birbirleriyle olan uyumu ve istifleme şekilleri değiştirilerek farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip malzemeler üretilebilmektedir [6]. Delaminasyon problemi, kompozit malzeme hasarı olarak en fazla karşılaşılan problemdir. Kullanım aşamasında tabakalar arasında kesintili ve uyumsuz bölgelerin oluşması delaminasyon hatası olarak adlandırılmaktadır. Delaminasyon hatası tabakalı kompozit malzeme üretiminde de sıklıkla karşılaşılan bir problem olup, tabakaların ayrışmasına neden olmaktadır. Delaminasyon hatası başka bir biçimde tanımlanacak olursa tabakaların birbirleriyle kaynaşmaması olduğu söylenebilir. Delaminasyon hatası, tabakalı kompozit malzemelerde yalnızca bir tabakada ortaya çıkabildiği gibi birden fazla tabakada da görülebilmektedir. Üretim aşamasında vakumlama sırasında yapı içerisine hava girmesi, reçinenin yapı üzerine homojen bir şekilde dağılmaması veya yapı içerisinde yabancı bir maddenin kalması gibi durumlar tabakalı kompozit malzemelerde delaminasyon hatasının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Farklı fiber takviye açılarında tabakalandırılmış kompozit malzemelerde, tabakaların mukavemet değerleri ve fiziksel özellikleri birbirinden farklıdır. Bu durum da delaminasyon hatasını ortaya çıkarabilmektedir [7].

İki boyutlu (2D) örgü kumaş tabakaları ile üretilmiş kompozit malzemeler, seramik ve metallere oranla ağırlıklarının daha düşük olması ve mukavemet değerlerinin daha yüksek olması nedeniyle avantaj sağlarlar. Ancak kalınlık yönündeki mukavemet değerlerinin düşük olması bu tip malzemelerin en önemli dezavantajıdır. (2D) kompozit malzemelerin sahip olduğu önemli dezavantajlı durum tabakaların ayrışması problemi olan delaminasyon hatasının sıklıkla görülebilmesidir. (2D) kompozit malzemelerin söz konusu dezavantajları, (3D) örgü kumaşların üretilmesindeki en önemli etken olmuştur. Yüksek mukavemet değerlerinden dolayı tercih edilen yeni tip (3D) örgü fiber kumaştan üretilmiş kompozit malzemelerin kullanım alanı diğer kompozit malzemelere göre daha kısıtlıdır. (3D) dokuma kumaşlar, son yıllarda havacılık, uzay, savunma ve medikal endüstrisi gibi alanlarda tercih edilmektedir. (3D) dokuma kumaşlar, kalınlıkları yönünde yüksek mukavemet değerlerine sahip olmasından dolayı kompozit malzemede delaminasyon hasarının oluşumunu engeller [8].

Bu çalışmada otomotiv, denizcilik ve yapı endüstrisinde kullanılan, (3D) dokuma fiber epoksi kompozit yapıların, mekanik performanslarının belirlenebilmesi için çekme ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla kompozit levhalar üretilmiş ve üretilen kompozit levhalarda çentikler ve pim delikleri oluşturulmuştur. Darbe ve çekme testleri ile (3D) dokuma cam fiber epoksi kompozit malzemelerin mukavemet değerleri belirlenmiştir. Gerçekleştirilen testler sonucunda elde edilen veriler (2D) dokuma kumaşlarla karşılaştırılmıştır.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmada çentiksiz, yarım daire kenar çentikli, U çentikli, dairesel delikli, tek ve çift pim bağlantılı (3D) dokuma cam fiber epoksi kompozit malzeme örneklerinin çekme ve darbe mukavemeti araştırılmıştır. (3D) dokuma kumaşlar ile üretilen kompozit malzeme numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi konusunda yapılan deneysel çalışma sonucunda sayısal veriler elde edilerek, üretilen kompozit malzemelerin mukavemet düzeyine yönelik bir sonuca ulaşılmıştır. 2D ve 3D kumaşlarla üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve kullanım alanlarının araştırılmasına yönelik gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda sıralanmıştır.

Örme sandviç kumaşların kompozit malzeme üretiminde kullanılabilme durumunu inceleyen Verpoest [9], çalışmasında (3D) çözgü örme sandviç kumaşlar kullanarak kompozit malzeme üretmeyi ve ürettiği bu malzemenin karakterizasyonunu elde etmeyi amaçlamıştır. Çalışmada 3D örme kumaşlar ile üretilen kompozit malzemelerin mekanik özellikleri araştırılmıştır. Numune üretiminde kullanılan örme sandviç kumaşların ilmek yapıları değiştirilmiş, hibrid iplikler kullanılmış ve üst yüzeylerine cam lifler eklenmiştir. Üretilen kompozit numunelerin birim hücre yapıları ve bu yapılara etki eden unsurlar kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Araştırma kapsamında geliştirilen analitik model ile numune üretiminde kullanılan örme sandviç kumaşların yüzey ve bağlantı tabakasının yapısı tanımlanmıştır. Çalışmada kompozit malzeme üretim aşamasında kullanılan reçine miktarının ve dağılımının, bağlama ipliği çapının ve uzunluğunun, kompozit malzemenin basma testi mukavemetine etkisi araştırılmıştır. Kompozit malzeme üretim sürecinde reçine dağılımının ve bağlama ipliği özelliğinin, malzemenin basma testi mukavemetini arttırdığı tespit edilmiştir. Çalışmada farklı yapılara sahip sandviç kumaşlar kullanılarak yüksek mukavemete ve düşük maliyete sahip kompozit malzemelerin üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Reçine transfer kalıplama yöntemi kullanılarak üretilmiş altı tip 3D dokuma karbon-fiber epoksi kompozitin çekme, basma ve eğilme performansı Dai vd. [10] tarafından araştırılmıştır. Mekanik performansın, reçine zengini bölgelerin dağılımından ve yük taşıyıcı liflerin dalgalanmasından etkilendiği tespit edilmiştir. Reçine bakımından zengin bölgelerdeki bağlantı noktalarının, tüm yükleme koşullarında tüm

dokuma tiplerinde, hem görsel gözlem hem de dijital görüntü korelasyonu grafikleri ile doğrulanan hasar başlangıç bölgeleri olduğu belirlenmiştir.

Philips vd. [11] sandviç kumaşların yapısında monofilament ve multifilament bağlama iplikleri kullanımının, bu kumaşlarla üretilen kompozit yapıların mukavemet değerleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda reçine dağılımının multifilament bağlama iplikleri kullanılarak örülen sandviç kumaşlarda daha homojen bir reçine dağılımı gerçekleştiği ancak yüksek rijitlik değerine ve ezilme mukavemetine sahip kompozit numunelerin üretiminde monofilament iplikler kullanılarak örülen sandviç kumaşların daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada örme kumaşların iç yapısında monofilament bağlama iplikleri, dış yüzeyinde ise multifilament bağlama iplikleri kullanımı ile daha yüksek mukavemet düzeyine sahip kompozit malzeme üretilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca sandviç kumaş yüzeylerindeki birim hücre boyutunun küçülmesinin, kompozitlerin mekanik özelliklerine olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir. Çalışmada örme sandviç kumaşlar gerdirilerek birim hücre boyutu küçültülmüş ve bu yöntemle daha sert kompozit malzeme üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Philips and Verposet [12], 3D çözgü örme sandviç kumaşlar kullanarak ürettiği kompozit malzemelerin eğilme mukavemetlerini incelediği çalışmada, 3D dokuma sandviç kumaşların ve 3D çözgü örme sandviç kumaşların yüksek delaminasyon direncine ve kolay şekil alabilme özelliğine dikkat çekmiştir. Çalışmada üretilen üç farklı tipteki 3D sandviç kumaşlarda; birinci grupta monofilament polyester bağlama ipliği, ikinci grupta multifilament polyester bağlama ipliği ve üçüncü grupta ise cam lifleri kullanılmıştır. Araştırmada cam liflerin üretilen kompozit malzemenin mukavemetini alan yoğunluğunu ve sertlik değerine büyütürken arttırdığı tespit edilmiştir.

3D dokuma sandviç kumaşların dolgu malzemesi olarak kompozit malzemelerde kullanılabilme durumunu araştıran Van Vuure vd. [13], 3D dokuma sandviç kumaşların mekanik davranışlarını belirlemiştir. Çalışmada polyester bağlama iplikleri, epoksi reçineler ve köpük bulunan ve bulunmayan farklı yapıları kompozit malzemeler üretilmiştir. Çalışma kapsamında üretilen kompozit malzemelerin arasına köpük dolgusu yapılmasının, kompozitlerin mekanik özelliklerine olumlu yönde etki ettiği

belirlenmiştir. Çalışma sonucunda düşük maliyetle güçlü yüzey-dolgu bağlanma dayanımına sahip 3D dokuma kompozit malzeme üretilebileceği tespit edilmiştir.

Trumper vd. [14] bağlantı tabakaları kullanarak dokuma sandviç ve düz örme kumaşların fonksiyonel özelliklerini arttırmayı amaçlamışlardır. Örgü makineleri modifiye edilerek cam ve karbondan üretilen iplikler kullanılarak düz örme ve dokuma sandviç kumaşlar üretilmiştir. Çalışma sonucunda üretilen düz örme ve dokuma sandviç kumaşların yeniden üretilebilir olma ve bu alanda farklı malzemeler ile birlikte birleştirilebilme özelliğine sahip oldukları tespit edilmiştir.

Sun ve Gu [15], çalışmalarında E-cam lifleri kullanarak biaksiyal 3D atkı örme sandviç kumaşlar üretmiş ve VARIM metodu ile vinil ester reçinesi kullanarak yeni bir kompozit numune üretmişlerdir. Çalışmada üretilen kompozitlerin, yarı statik ve yüksek deformasyon hızlarında baskı kayması davranışları incelenmiştir. Araştırma sonucunda üretilen kompozit malzemelerin ilmek sırası ve ilmek çubuğu yönlerinde hasar gerilmesi ve kayma rijitliğine duyarlı oldukları tespit edilmiştir.

Menges [16], çözgü örme kumaşların dolgu malzemesi olarak kullanıldığı kompozit malzemelerin üretimini ve tasarımını gerçekleştirmiştir. Mimari alanlarda önem arz eden kumaş dolgu malzemeli kompozitler bütünsel bir yaklaşımla iki farklı prototipte üretilmiştir. Çalışma sonucunda üretilen kompozitlerin uygun maliyetli ve yüksek rijitlik değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

E-cam lifleri kullanılarak üretilen tek katmanlı ve çok katmanlı sandviç kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini geliştirmeyi amaçlayan Wang vd. [17], vakum infüzyon yöntemi kullanarak sandviç kumaşların üst yüzeylerine serdiği dokuma kumaş katmanlarıyla yeni kompozit malzemeler üretmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirlemek için üç nokta eğme ve basma testleri uygulanmıştır. Çalışmada üretilen tek katmanlı ve çok katmanlı sandviç kompozit malzemelerin test sonuçları karşılaştırılmış ve dokuma kumaşların, sandviç kumaş yüzeylerine serilmesi ile hem tek katmanlı hem de çok katmanlı fiber malzemelerin mukavemetini arttırdığı tespit edilmiştir.

Liu vd. [18] E-tipi cam fiberlerden oluşan 3D biaksiyal örme sandviç tekstillerden üretilmiş kompozit malzemelerin düzlem içi ve düzlem dışı basma özelliklerini araştırmışlardır. Kompozit üretimi, vinilester reçine ile RTM (Resin

Transfer Mold) metoduna göre gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin düzlem içi ve düzlem dışı basma özellikleri için yapılan deneysel çalışma sonucunda kompozitin hem düzlem içi hem de düzlem dışı basma rijitliği, hasar gerilmesi ve deformasyonunun, deformasyon hızına duyarlı olduğu belirlenmiştir.

Yan vd. [19], 3D dokuma kompozit T-bağlantılarının fiber mimarisinin mekanik performans üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 3D dokuma T-bağlantılarının eşdeğer 2D laminatlar üzerinde sunabileceği faydaları anlamak için, iki tip 3D dokumadan üretilmiş T-bağlantıları üzerinde deneysel testler yapmışlardır. Çalışmada yarı-statik çekme yükü seçilmiştir. 3D dokuma kompozit T-bağlantılarının nihai güç ve hasar toleransı açısından önemli avantajları alternatif 2D kompozitlere göre tanımlanmıştır. Bu çalışma, fiber mimarisindeki değişimin, rijitlik ve başlangıçtaki hasar yükünü hafifçe arttırmasının yanı sıra, delaminasyon direnci ve hasara karşı toplam enerji emilimi gibi özellikleri de önemli ölçüde arttırabildiğini göstermiştir. Deneysel veriler, 3D dokuma takviyelerin kullanılmasının, kompozit T-bağlantılarının laminatlar üzerindeki yük taşıma kapasitesini geliştirmek için etkili bir yol olduğunu ve ayrıca bu tip örgü kumaşların fiber mimarisi açısından optimize edilebileceğini göstermiştir.

Zhang vd. [20], çalışmalarında eksen dışı açıların 3D karbon epoksi kompozitlerin eğilme davranışları üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı açılarda, (0° , 30° , 45° ve 90°) dört tür numune tipi deneysel olarak üç nokta eğme metodu ile test edilmiştir. Ultrason görüntüleme ve mikro bilgisayarlı tomografi (Micro-CT) teknikleri deformasyonu araştırmak için kullanılmış ve kırılmış numunelerdeki hasar mekanizmaları araştırılmıştır. Sonuçlar, eksen üzerindeki (0° ve 90°) numunelerin gerilme sapmalarının belirgin yarı-kırılgan davranışlar sergilediğini, eksen dışı (30° ve 45°) numunelerin ise önemli sünek özellikler gösterdiğini göstermiştir.

Patel vd. [21], çalışmalarında hibrid 3D dokuma tekstil kompozitlerin (H3DWTC'ler) basma tepkisini deneysel olarak incelemişlerdir. H3DWTC'ler, karbon, cam ve kevlar elyaf telleri ve bir polimer matris malzemesinden oluşmuştur. Modelleme yaklaşımı mikro düzeyde geometrik kusurların, dahil edilmesiyle yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, karbon fiber basma kuvvetinin, karbon çekme noktalarındaki eğilme bandının bozulma başlangıcını belirlerken, cam elyaf çekme kuvvetinin ulaşılacak maksimum yükü belirlediğini göstermiştir.

Li vd. [22], 3D dokunmuş karbon fiber takviyeli kompozitlerin düzlemsel hasar davranışı üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. 3D dokuma karbon fiber takviyeli kompozitlerin tahribatsız gözlemini gerçekleştirmek için yeni bir deneysel yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde, 3D çatlak başlama ve yayılma davranışının synchrotron radyasyon bilgisayarlı tomografi (SRCT) tarayıcı tarafından sürekli olarak kaydedilmesinin mümkün olduğu belirlenmiştir. Özellikle, arayüz özelliğinin, düzlem dışı dayanımları etkileyen ana faktör olduğu görülmüştür. Ayrıca, örgü açısının farklı yönlerdeki düzlem dışı kuvvetler üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Hasar modlarına göre, örgü açısının artmasıyla birlikte, düzlem dışı gerilmenin artacağı, ancak düzlem dışı kesme kuvvetinin azalacağı sonucuna ulaşılmıştır.

Zhong vd. [23], çalışmalarında 3D dokuma kompozitlerin rijitliğini ve dayanımını araştırmak için elyaf ipliklerinin rastgele dağılımını göz önüne alan rastgele bir örgü modeli önermişlerdir. Elyaf ipliklerinin rastgele dağılımının gerçek istatistiklerine dayanarak, 3D dokuma kompozitlerin mukavemet davranışının tahmin edilebileceği ve eşdeğer deneylerin de gerçekleştirilebileceğini ifade etmişlerdir. Tahmin edilen sonuçların deneysel sonuçlarla iyi bir şekilde uyduğu görülmüştür.

Mack ve Smith [24], 3D çözgü örme sandviç kumaşların kompozit malzemelerde dolgu malzemesi olarak kullanılmasıyla daha yüksek rijitlik ve mukavemet düzeyine sahip kompozit malzeme üretilebileceğini ifade etmişlerdir. 3D sandviç kumaşların kompozit malzeme üretiminde kullanılması ile tabakaların daha iyi bir şekilde birbirlerine bağlandığı ve kavisli bölge ihtiva eden kalıplarda istenilen şeklin verilmesine imkân sağladığını belirtmişlerdir.

Shiah vd. [25], 3D dokuma sandviç kumaşlar kullanılarak üretilen kompozit malzemelerin enerji sönümleme özelliklerini araştırdıkları çalışmalarında cam lifleri kullanılarak 3D sandviç kumaşlar üretmişlerdir. 3D sandviç kumaşların gözenekli yapıları, reçine infüzyonunun daha etkili bir biçimde yapılmasına imkân tanımış ve ağırlık oranının yüksek olması nedeniyle gazların ve kimyasalların depolandığı alanlarda kullanılan kompozitlerin yapısında kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Tita vd. [26], ince kompozit levhaların darbe mukavemetini belirlemek amacıyla gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, numunelere serbest düşme testi uygulamış ve birtakım sayısal veriler elde etmişlerdir. Araştırma sonucunda kompozit plakaların

dinamik tepkisinin, çarpma enerjisi düzeyi ve istifleme sekansı değişkenlerinden etkilendiğini tespit etmişlerdir.

Sayman vd. [27], yapıştırılmış kompozit numunelere enine darbe testi ve farklı sıcaklık değerlerinde kesme testi uygulayarak mekanik özelliklerini belirledikleri deneysel çalışmalarında, darbe uygulanmayan oda sıcaklığındaki kompozitlerin yük taşıma mukavemetinin diğer numunelere oranla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.

Turan ve Kaman [28], iki kompozit levhanın yapıştırıcı ile birleştirilmesiyle elde edilen numunelerin deneysel ve sayısal metotlar yardımıyla hasar analizi gerçekleştirmişlerdir. Araştırmada epoksi reçine matrisli ve dört tabakalı karbon fiber takviyeli kompozitler, epoksi reçine yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Çalışma sonucunda hasar yüklerinin yapışma yüzey alanındaki değişimlerden etkilendiği tespit edilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, yapılan çalışmalarda elle yatırma yöntemi ile üretilmiş 3D dokuma cam fiber takviyeli çentiksiz kompozitlerin çekme, basma, eğilme ve darbe gibi hasar davranışlarının incelendiği görülmüştür. Ancak bu çalışmada vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiş 3D dokuma cam fiber epoksi tabakalı kompozitlerin çentik ve pim bağlantı mukavemeti, çekme testleri ile tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar (2D) dokuma ile (2D) ve (3D) dokuma kumaşlardan oluşan hibrit numunelerin mekanik performansı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca (3D) tabakalı kompozitlerin düşük hızlı darbe testleri de yapılarak, elde edilen enerji sönümleme performansları, (2D) fiberlerden üretilmiş kompozitlerin darbe davranışı ile mukayese edilmiştir.

Bu amaçla 1. Bölüm’de çalışmaya genel bir “Giriş” yapılmıştır. 2. Bölüm’de literatür araştırmasına yer verilmiştir. 3. Bölüm’de kompozit malzemeler hakkında genel bilgiler verilerek kompozit malzemeleri oluşturan yapılar incelenmiştir. 4. Bölüm’de dokuma kumaşlar, yapıları ve türleri incelenmiştir. 5. Bölüm’de problemin tanımlanması ve deneysel çalışmaların yer aldığı “Materyal ve Metod” kısmı bulunmaktadır. 6. Bölüm’de kompozit numunelere uygulanan çekme ve darbe testi sonuçlarına, bu sonuçların karşılaştırılmalarına ve çalışmada elde edilen sonuçların literatürde yer alan diğer çalışmalarla benzerlik ve farklılıklarına yer verilmiştir. Son

bölüm olan 7. Bölüm’de ise “Tartışma ve Öneriler” başlığı altında elde edilen sonuçlara göre genel sonuçlar özet halinde sunularak gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.



3. KOMPOZİT MALZEMELER

Farklı özelliklere sahip iki ya da daha fazla malzemenin, çeşitli yöntemlerle makro düzeyde bir araya getirilerek, bu malzemelerin en iyi özelliklerini bir arada bulunduran kompozit malzemeler [20] günümüz teknolojisi ile gelişimini sürdürmeye devam etmektedir. 3D dokuma fiber veya yüksek mukavemetli matris kullanımı bu gelişimlerin en önemlileri arasındadır.

Farklı malzemenin bir araya getirilmesiyle oluşturulması, üç boyutlu bir yapıya sahip olması ve kendini oluşturan malzemelerin sahip oldukları en iyi özellikleri tek başına taşıması gibi özellikler, kompozit malzemelerin tipik özellikleridir. Kompozit malzemeler mikro düzeyde heterojen bir yapıya sahipken, makro düzeyde homojen bir yapıya sahip malzemelerdir [29].

3.1. Kompozit Malzemelerin Özellikleri

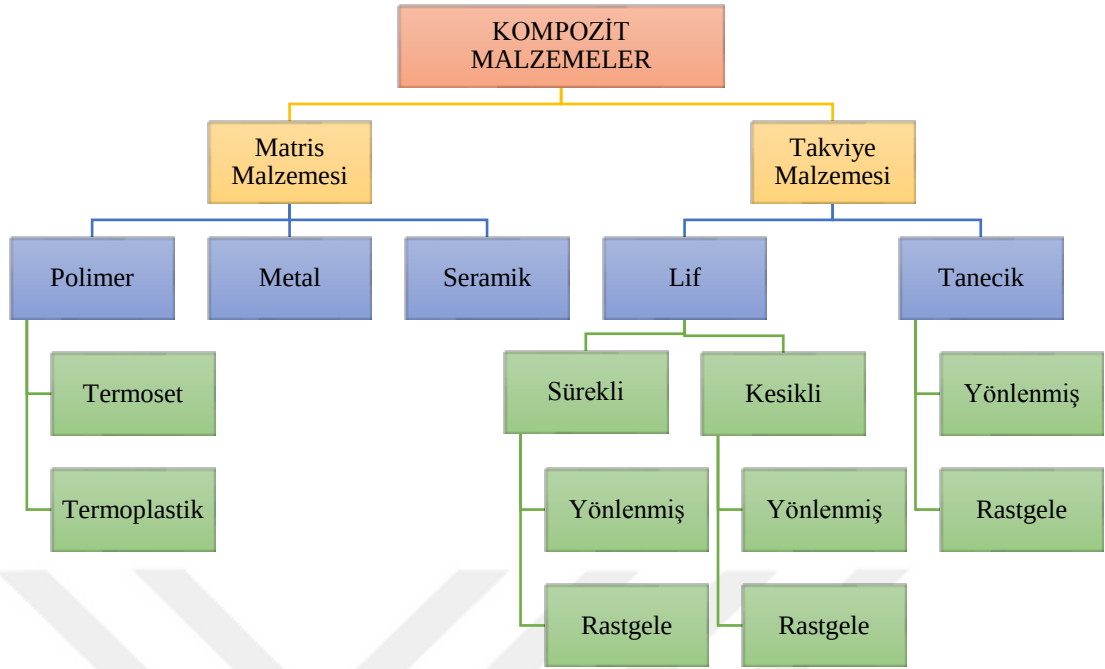
Kompozit malzemeler sahip oldukları birçok avantajdan dolayı çeşitli endüstriyel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Kompozit malzemelerin pozitif özelliklerini aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür [29]:

- Kompozit malzemeler, arzu edilen sayıda malzemelerin bir araya getirilmesine uygun olması nedeniyle metal malzemelerden daha fazla avantaja sahiptirler. Bu durum kompozit malzeme oluşumunda kullanılan malzemelerin sayısını ve türünü değiştirme imkânı sağlamaktadır. Böylece mukavemet değeri yüksek, hafif, istenilen ölçülerde ve elektrik yalıtımı özelliklerine sahip yeni bir malzeme elde edilebilmektedir.
- Kompozit malzemelerin sahip olduğu avantajlardan biri de korozyona karşı dayanıklı olmasıdır.
- Alaşımlara oranla daha kolay birleştirilebilmesi ve tek parça halinde kalıplanabilmesi kompozit malzemelerin tercih edilmesindeki bir diğer etkidir.
- Kompozit malzemedeki matris olarak kullanılan reçineler renklendirilerek, istenilen renkte kompozit malzeme üretimin gerçekleştirilebilmektedir.

- Kompozit malzemelerin saydam olarak üretilebilmesi seralarda ve güneş kolektörü üretiminde tercih edilebilirliğini artırmaktadır.
- Kompozitlerin beton, ahşap ve demir yüzeylere etkili bir şekilde yapışması ve kompozit malzeme üretiminde kullanılan reçinenin bu yapıların içerisine sızarak malzemenin bu yüzeylerle kaynaşması, yapı sektöründe kompozit malzemelere kullanım alanı sağlar.
- Yanma özelliği göstermeyen matris kullanılarak üretilen kompozit malzemeler aynı zamanda yanmazlık özelliğine sahip olabilmektedirler. Ayrıca bu malzemeler ısıya dayanıklı olduğundan yüksek ısı karşısında şekil değiştirme ve yumuşamaya neden olmaz.
- Hasar gören kompozit malzemelerin onarımı mümkündür. Ancak özen gerektirir.
- Kompozit malzemeler elmas veya sert çelik uçlu malzemelerle delinebilir ve kesilebilirler.

3.2. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler takviye elemanları (fiber) ve bu takviye elemanlarını saran matris adı verilen malzemeler kullanılarak üretilmektedir. Kompozit malzemeler çeşitli özelliklerine göre farklı sınıflandırılmaktadırlar (Şekil 3.1). Yapılan bu sınıflandırmalar, genellikle kompozit malzemelerin yapısında kullanılan takviye ve matris malzemesi türüne göredir [30].



Şekil 3.1. Kompozit malzemelerin sınıflandırılması [30]

3.2.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Kompozit yapının mukavemet düzeyi, matris içerisine yerleştirilen elyafların pozisyonuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Matris içerisine yerleştirilen uzun elyafların birbirlerine paralel doğrultuda tek yönde yerleştirilmesiyle oluşan kompozit malzemelerin fiber takviye doğrultudaki mukavemeti oldukça yüksek olurken, fiber takviyeye dik doğrultudaki mukavemeti düşük seviyede olur. İki boyutlu dokuma elyafların kullanılmasıyla üretilen kompozitlerin hem dikey hem de yatay doğrultudaki mukavemet düzeyleri eşit olurken, kısa elyafların matris boyunca homojen dağılmasıyla izotrop bir yapı elde edebilmek mümkün olmaktadır. Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin mukavemeti, kullanılan elyafların mukavemet düzeyine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Matrisin elyaflara ilettiği yük miktarı, kompozit malzeme üretiminde kullanılan elyafların uzunluk/çap oranlarıyla doğru orantılı olarak değişmektedir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan elyafların yapısında hata bulunmaması da malzemelerin mukavemet düzeyinin artmasında etkili olmaktadır. Matris ile elyaf arasındaki temasın kesintisiz olması ise kompozit malzemelerin mukavemetinin artmasını sağlamaktadır [31].

3.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Kompozit malzeme üretiminde yüksek mukavemet düzeyine sahip parçacıkların matris içerisine yerleştirilmesiyle elde edilen kompozit malzemelerdir. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan parçacıkların sertlik düzeyleri, malzemenin mukavemet düzeyinin artmasını sağlamaktadır. Plastik matris içerisine metal parçacıkları konularak üretilen kompozit malzemeler iletken bir yapıya sahiptirler. Uçak motoru için tercih edilen metal matris içerisine seramik parçacıkları yerleştirilerek üretilen kompozit malzemeler yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve mukavemet düzeyleri oldukça yüksektir [32].

3.2.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Geçmişte çok eskiye dayanan tabakalı kompozit malzemeler, kullanım alanı en geniş olan kompozit yapılar arasında yer almaktadır. Tabakalı kompozit yapılarda takviye malzemesi olarak kullanılan elyafların farklı yönlerde birleştirilmesiyle yüksek mukavemet düzeyine sahip kompozit malzemeler üretilmektedir. Bu yapılar yüksek düzeyde ısı ve nem dayanıklılığına sahiptirler. Tabakalı kompozit malzemelerin mukavemet düzeyi metallere göre daha yüksek olup aynı zamanda ağırlıkları metallere göre daha azdır. Uçak gövdesi üretiminde sıklıkla tercih edilen sandviç yapılı kompozitler tabakalı kompozit malzemelere örnek olarak gösterilebilir [33].

3.2.4. Karma (Hibrid) Kompozit Malzemeler

Birden fazla elyaf çeşidinin takviye malzemesi olarak kullanıldığı kompozit malzemeler karma (hibrid) kompozit malzemeler olarak adlandırılmaktadır. Farklı yapıya sahip yeni tip kompozit malzemelerin üretilmesine imkân tanıyan bu üretim yöntemi sayesinde yüksek maliyetli, basma mukavemeti düzeyi yüksek ve tokluk düzeyi düşük olan grafit ile düşük maliyetli, tokluk düzeyi yüksek ve basma mukavemeti düzeyi düşük olan kevlarların bir araya getirilmesiyle düşük maliyetli, yüksek tokluk ve basma mukavemeti düzeyine sahip yeni bir kompozit malzeme üretilmektedir [31].

3.3. Kompozitlerin Yapısında Kullanılan Temel Malzemeler

3.3.1. Matris

Matrislerin, kompozit malzemelerde elyafları bir arada tutmak, elyafları dış etkilere korumak ve etki eden yükün homojen bir şekilde elyaflara dağıtılmasını sağlamak gibi üç temel görevi bulunmaktadır. Matrisler tüm elyafları çevreleyebilmek için düşük viskoziteye sahip olmalı, sonraki süreçte ise elyafları bir arada tutabilmek ve sağlam bir yapı oluşturabilmek için katı bir yapıya geçebilmelidir [32]. Kompozit malzemelerin yapısında bulunan yük taşıyıcı elemanlar olan elyafların görevlerini etkili bir biçimde yerine getirebilmeleri açısından matrisler önemli rol oynamaktadır. Matrisler yükün tüm elyaflar tarafından taşınmasını ve yükün homojen bir biçimde dağılmasını sağlayan kompozit malzeme elemanıdır. Elyaf ile matris arasında etkili bir yapışmanın gerçekleşmesi, kompozit malzemelerin yüksek mukavemete sahip olmasını sağlayabilmektedir. Kompozit malzemelerin mukavemet değeri üzerinde etkili olan unsurlardan biri de matris ile elyaf arasındaki bağın kuvveti ve matrislerin mekanik özellikleridir. Elyaflara göre daha esnek ve zayıf bir yapıya sahip olan matris, elyaf tasarımları üzerinde etkili olmaktadır. Matris ile elyaf arasında kuvvetli bağa ve yüksek kesme mukavemetine sahip olan kompozit malzemelerde matris ya da elyafta meydana gelen bir çatlağın malzeme boyunca aynı yönde ilerlemesi mümkün olabilmektedir [33]. Bu nedenden dolayı kompozit malzeme tasarımlarında matris ve elyafların mekanik özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Epoksi, vinilester, polyesterler ve fenolik reçineler, kompozit malzeme üretiminde sıklıkla kullanılan matris malzemeleridir. Polyester reçineler, yüksek mukavemet düzeyine sahip olmayan kompozit malzeme üretiminde en fazla tercih edilen matrislerdir. Epoksi reçineler ise yüksek mukavemet düzeyine sahip gelişmiş kompozit malzeme üretiminde sıklıkla tercih edilmektedir. Günümüzde yüksek sıcaklığa dayanıklı ve nem duyarlılığı düşük olan kompozit malzeme üretimine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır.

3.3.1.1. Epoksi Reçineler

İki ya da daha fazla epoksinin bir araya gelmesiyle oluşan epoksiler, bazik koşullarda epiklorid ile polifenolün tepkimeye girmesi sonucunda elde edilmektedirler.

Epoksiler çeşitli işlemlerden geçirilerek 150-200 °C sıcaklığa kadar dayanım sağlayabilirler ve büzülme değerleri %2'nin altındadır.

Epoksi reçineler, elyaflarla kuvvetli bağlar kurarak, yüksek aşınma ve kopma mukavemetine sahip kompozitlerin üretimini sağlarlar. Yüksek kimyasal dirençlere sahip olup, farklı sıcaklık değerlerinde sertleşebilme özelliklerine sahiptirler. Polyestlere oranla daha maliyetlidirler ve düşük viskozite değerine sahiptirler. Karbon elyaflar başta olmak üzere farklı elyaf türleriyle kullanılabilmesi ve sahip olduğu avantajların çokluğu nedeniyle birçok endüstriyel alanda kullanılabilmektedir [34].

3.3.1.2. Polyester Reçineler

Dihidrik fenoller veya dihidrik alkollerin, dibazik asitler ile karıştırılması ile elde edilen polyester matrislerin esneklik düzeyleri ve kopma mukavemeti birtakım işlemlere tabi tutularak arttırılabilir. Uygun maliyet, düşük viskozite, yüksek mukavemet ve düşük nem değerlerine sahip olma gibi durumlar polyester reçinelerin sahip olduğu avantajlardan bazılarıdır [35].

3.3.1.3. Vinilester Reçineler

Polyester reçineler ile benzer özelliklere sahip olan vinilester reçineler, elyaf malzemeler ile arasında kuvvetli bağlar kurabilmektedirler. Dihidrik alkollerin yerine polyesterler ile doymamış hidrosilik bileşenlerin bir araya getirilmesiyle üretilirler. Korozyon mukavemeti yüksek plastik malzeme üretiminde sıklıkla tercih edilen vinilester reçineler ayrıca kimya endüstrisinde kimyasal etkilere dayanıklı malzeme üretiminde, depolama tanklarında ve tahliye borularında sıklıkla tercih edilmektedirler [35].

3.3.1.4. Metal Matrisler

Polimer matrislere oranla daha yüksek mukavemet değerlerine sahip metal matrisler kompozit malzemeleri bir arada tutarak yüksek taşıyıcılık mukavemetine sahip kompozit üretimini sağlamaktadırlar. Yüksek maliyete ve zorlu üretim koşullarına sahip olan metal matrisler, yüksek sıcaklık dayanımına ve tokluğa sahip kompozitlerin üretilmesini sağlamaktadır. Alüminyum, bakır, gümüş, titan ve nikel gibi metaller, kompozit üretiminde sıklıkla tercih edilen metallerdir. Metal matrisler katı halde, levha

halinde, erimiş halde ve moleküler yapıda olabilmekte ve elyaflarla elektroliz yoluyla kaplama, dökme, presleme, karıştırma ve haddeleme metotlarıyla bir araya getirilebilmektedirler. Bor ve bor içeren elyaflar, metal matrislerle en sık kullanılan elyaflardır. 300 °C sıcaklığa kadar özelliğini kaybetmeyen metal matrislerle üretilen kompozitler, sıcak presleme yöntemiyle 450-500 °C arasındaki sıcaklıkta üretilmektedirler [36].

3.3.2. Elyaf

Kompozit malzemelerin mukavemet düzeyini belirleyen temel elemanlardır. Yüksek sertlik ve elastikliğe sahip olan elyaflar, düşük yoğunluğa sahip olmaları nedeniyle hafif ve kimyasal korozyona karşı dayanıklı kompozit malzeme üretimini sağlamaktadır. Günümüzde modern yapılarda sıklıkla tercih edilen kompozitlerin üretiminde takviye malzemesi olarak genellikle elyaflar tercih edilmektedirler. Endüstriyel alanda çok eski dönemlerden beri kullanılan cam elyafların yanı sıra karbon, bor, karbür, silisyum ve aramid elyaflar da kompozit üretiminde kullanılan diğer takviye malzemeleridir. Düşük çaplı ince elyafların üretilmesi ile büyük boyutlu kompozit malzemelerin üretiminde hata payı oranının düşmesi sağlanmıştır. Elyaflar, küçük tane boyutları, farklı boyutlarda kompozit malzeme üretimine elverişliliği, üstün mikroyapısal özellikleri ve yüksek elastisite modülleri nedeniyle mühendislik alanında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler [37].

3.3.2.1. Cam Elyaflar

Cam elyaflar, sıradan bir şişe camından yüksek saflıktaki kuartz camına kadar pek çok tipte imal edilirler. Cam amorf bir malzemedir ve polimerik yapıdadır. Üç boyutlu moleküler yapıda, bir silisyum atomu dört oksijen atomu ile çevrilmiştir. Silisyum metalik olmayan hafif bir malzemedir. Doğada genellikle SiO₂ şeklinde bulunur. Camın elde edilmesi için silis kumu, katkı malzemelerle birlikte kuru halde iken 1260 °C civarına kadar ısıtılır ve soğumaya bırakıldığında sert bir yapı elde edilir. Cam elyafların bazı özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir [38]:

- Birim ağırlık başına düşen çekme mukavemeti çelikten yüksektir.
- Isıl dirençleri düşük olduğu için yanmazlar ancak yüksek sıcaklıkta yumuşarlar.

- Kimyasal malzemelere karşı dirençlidirler.
- Nem absorbe etme özellikleri yoktur. Ancak cam elyaflı kompozitlerde matris ile cam elyaf arasında nemin etkisi ile bir çözülme olabilir. Özel elyaf kaplama işlemleri ile bu etki ortadan kaldırılabilir.
- Elektriksel yalıtımın önemli olduğu uygulamalarda güvenle kullanılmaktadır.

Dört farklı tipte cam elyaf mevcuttur. Bunlar;

a. A (Alkali) Camı: Bu elyafların elektriksel yalıtkanlık özelliği yüksek oranda alkali içerdiğinden dolayı oldukça kötüdür. Yüksek kimyasal dirence sahip olan bu camlar yaygın olarak bulunmaktadır.

b. C (Korozyon) Camı: Yüksek düzeyde kimyasal çözelti direncine sahiptir.

c. E (Elektrik) Camı: Elektriksel yalıtkanlık özelliği, düşük alkali oranına sahip olması nedeniyle diğer cam türlerine göre daha iyidir. Oldukça yüksek mukavemet düzeyine sahip olan E-camı aynı zamanda yüksek düzeyde su direncine de sahiptir. E camı genellikle nemli ortamlarda kullanılmak üzere geliştirilen kompozit malzemelerin yapısında kullanılır.

d. S (Mukavemet) Camı: Mukavemet düzeyi yüksek olan bir cam türü olan S Camı, E camına göre %33 oranda daha fazla çekme mukavemetine sahiptir. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda oldukça iyi bir yorulma direncine sahiptir. Bu özellikleri nedeniyle havacılıkta ve uzay endüstrisinde tercih edilir. Genellikle epoksi reçine ve plastiklerle birlikte kullanılan cam elyaflar yüksek yorulma direncine sahip olmaları nedeniyle havacılık ve uzay endüstrilerinde sıklıkla tercih edilirler [37].

3.3.2.2. Bor Elyaflar

Bor elyaflar aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek olarak adlandırılan ince bir flamanın üzerine bor kaplanarak imal edilirler. Çekirdek genellikle tungstendir. Karbon çekirdek de kullanılabilir. Bor-Tungsten elyaflar, sıcak Tungsten flamanın hidrojen ve borklorür (BCl_3) gazından geçirilmesi ile üretilirler. Böylece Tungsten flamanın dışında bor plaka oluşur. Bor elyaflar değişik çaplarda (0.05-0.2 mm) üretilirler. Tungsten çekirdek ise daima 0.01 mm çapında üretilir. Bor elyaflar

yüksek çekme mukavemetine ve elastisite modülüne sahiptirler. Çekme mukavemetleri 2758-3447 MPa arasındadır. Elastite modülü ise 400 GPa' dır. Bu değer S camının elastisite modülünden beş kat fazladır. Üstün mekanik özelliklere sahip olan bor elyaflar, uçak yapılarında kullanılmak üzere geliştirilmişlerdir. Ancak, maliyetlerinin çok yüksek olması nedeniyle, son yıllarda yerlerini karbon elyaflara bırakmışlardır. Bor elyafların Silisyum Karbür (SiC) veya Bor Karbür (B₄C) ile kaplanmasıyla yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı artar. Özellikle bor karbür kaplanması ile çekme mukavemeti önemli ölçüde artırılabilir. Bor elyafların erime sıcaklıkları 2040 °C civarındadır [38].

3.3.2.3. Alumina Elyaflar

Alumina, Alüminyum Oksitin (Al₂O₃) kısaltılmış hali olarak tanımlanabilir. Elyaf formundaki alumina, 0.02 mm çapındaki alumina flamanın Silisyum Dioksit (SiO₂) kaplanması ile elde edilir. Alumina elyafların çekme mukavemetleri yeterince yüksek değildir. Ancak basma mukavemetleri yüksektir. Örneğin, alumina epoksi kompozitlerin basma mukavemetleri 2275-2413 MPa arasındadır. Yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle uçak motorlarında kullanılmaktadırlar.

3.3.2.4. Grafit (Karbon) Elyaflar

Karbon, yoğunluğu 2.268 gr/cm³ olan kristal yapıda bir malzemedir. Karbon elyaflar cam elyaflardan daha sonra gelişen ve çok yaygın olarak kullanılan bir elyaf grubudur. Hem karbon hem de grafit elyaflar aynı esaslı malzemeden üretilirler. Bu malzemeler hammadde olarak bilinirler. Karbon elyafların üretiminde üç adet hammadde mevcuttur. Bunlardan ilki rayondur (suni ipek). Bu hammadde inert bir atmosferde 1000–3000 C⁰ civarına ısıtılır ve aynı zamanda çekme kuvveti uygulanır. Bu işlem mukavemet ve tokluk sağlar. Ancak yüksek maliyet nedeniyle rayon elyaflar uygun değildirler. Elyaf imalatında genellikle rayonun yerine poliakrilonitril (PAN) kullanılır. PAN esaslı elyaflar 2413-3102 MPa değerinde çekme mukavemetine sahiptirler ve maliyetleri düşüktür.

Karbon elyafların en önemli özellikleri düşük yoğunluğun yanı sıra yüksek mukavemet ve tokluk değerleridir. Bu elyaflar, nemden etkilenmezler ve sürünme mukavemetleri çok yüksektir. Aşınma ve yorulma mukavemetleri oldukça iyidir. Bu

nedenle askeri ve sivil uçak yapılarında yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Karbon elyaflar çeşitli plastik matrislerle ve en yaygın olarak epoksi reçinelerle kullanılırlar. Ayrıca alüminyum ve magnezyum gibi metal matrislerle de kompozit yapı oluşturabilirler [39].

3.3.2.5. Aramid Elyaflar

Aramid “aromatik polyamid”in kısaltılmış adıdır. Polyamidler uzun zincirli polimerlerdir. Aramidin moleküler yapısında altı karbon atomu birbirine hidrojen atomu ile bağlanmıştır. İki farklı tip aramid elyaf mevcuttur. Bunlar *Du Pont* firması tarafından geliştirilen Kevlar 29 ve Kevlar 49’dur. Aramidin mekanik özellikleri grafit elyaflarda olduğu gibi elyaf eksenine doğrultusunda çok iyi iken elyaflara dik doğrultuda çok zayıftır. Aramid elyaflar düşük ağırlık, yüksek çekme mukavemeti ve düşük maliyet özelliklerine sahiptir. Darbe direnci yüksektir, gevrekliği grafitin gevrekliğinin yarısı kadardır. Bu nedenle kolay şekil verilebilir. Doğal kimyasallara dirençlidir ancak asit ve alkalilerden etkilenir [39].

3.4. Kompozit Malzeme Üretim Yöntemleri

İstenilen özelliklerde ve biçimde kompozit malzeme üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır.

3.4.1. Elle Yatırma Yöntemi

Dokuma veya kırılmış elyaflarla hazırlanmış takviye kumaşları, hazırlanmış olan kalıp üzerine elle yatırılır sonrasında da sıvı reçine elyaf katmanlarına emdirilir. Elyaf yatırılmadan önce, kalıplar temizlenerek jelkot sürülür. Jelkot sertleştikten sonra elyaf katları yatırılır. Reçine ise kompozit malzemenin hazır olması için en son sürülür. Bu işlemde elyaf kumaşına reçinenin iyi nüfuz etmesi önemlidir. Elle yatırma tekniğinde en çok polyester ve epoksi ile birlikte vinilester ve fenolik reçineler tercih edilmektedir. Elle yatırma yoğun işçilik gerektirmesine rağmen düşük sayıdaki üretimler için çok uygundur [40].

3.4.2. Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi, elle yatırma yönteminin aletli şekli olarak kabul edilebilir. Kırılmış elyaflar kalıp yüzeyine, içine sertleştirici katılmış reçine ile birlikte özel bir

tabanca ile püskürtülür. Elyafın kırılma işlemi tabanca üzerinde bulunan ve bağımsız çalışan bir kırpıcı sayesinde yapılır. Püskürtme işlemi sonrası yüzeyin bir rulo ile düzeltilmesiyle ürün hazırlanmış olur [40].

3.4.3. Elyaf Sarma Yöntemi

Bu yöntem özel biçime sahip ürünlerin seri üretimine uygundur. Elyaf sarma yöntemi sürekli elyaf liflerinin reçine ile ıslatıldıktan sonra bir makaradan çekilerek dönen bir kalıp üzerine sarılmasıdır. Sürekli liflerin farklı açılarla kalıba sarılmasıyla farklı mekanik özelliklerde ürünler elde edilebilir. Yeterli sayıda elyaf katının sarılmasından sonra ürün sertleşir. Ardından döner kalıp ayrılır. Bu yöntemle yapılan ürünler arasında silindirik borular, araba şaftları, uçak su tankları, yat direkleri ve dairesel basınç tankları sayılabilir.

3.4.4. Reçine Transfer Kalıplama Yöntemi

Bu kompozit üretim yöntemi, elle yatırma sistemlere göre daha hızlı ve uzun ömürlü olmakla birlikte iki parçalı kalıp kullanmak gereklidir. Kalıbın kompozit malzemeye yapılması maliyetinin çeliğe göre daha düşük kalmasına neden olmaktadır. RTM (Reçine Transfer Kalıplama) yönteminde takviye malzemesi olarak kuru keçe, kumaş veya ikisinin kombinasyonu kullanılır. Takviye malzemesi önceden kalıp boşluğunu dolduracak şekilde kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Elyaf lar matris içinde geç çözünen reçinelerle kaplanarak kalıp içerisinde sürüklenmesi önlenir.

Reçine basınç altında kalıba pompalanır. Bu süreç daha fazla zaman ister. Matris enjeksiyonu soğuk, ılık veya en çok 80 °C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Bu yöntemde içerideki havanın dışarı çıkarılması ve reçinenin elyaf içine iyi işlemesi için vakum kullanılabilir. Elyafın kalıba yerleştirilmesi zorunlu olduğu için uzun sayılabilecek bir işçilik gerektirir. Kalıp kapalı olduğundan zararlı gazlar azalır ve gözeneksiz bir ürün elde edilebilir. Bu yöntemle karmaşık parçalar üretilir. *Concorde* uçaklarında, *F1* arabalarında bazı parçalar bu yöntemle hazırlanmaktadır [41].

3.4.5. Hazır Kalıplama Yöntemi

Hazır kalıplama; bünyesinde cam elyaf, reçine, katkı ve dolgu malzemeleri içeren kalıplamaya hazır kompozit malzemelerin sıcak pres kalıplarla ürüne dönüştürülmesidir. Karmaşık şekillerin üretilebilmesi, metal parçaların bünye içine gömülebilmesi, farklı cidar kalınlıkları gibi avantajları bulunmaktadır. Diğer kompozit malzeme üretim tekniklerinin olanak vermediği delik vb. karışık şekiller elde edilebilmektedir. Iskarta oranı düşüktür. Bu yöntemin dezavantajları; kalıplama bileşimlerinin buzdolaplarında saklanma gerekliliği, kalıpların metal olmasından dolayı diğer kalıplardan daha maliyetli olması ve büyük parçaların üretimi için büyük ve pahalı preslere ihtiyaç olmasıdır. Bu yöntemde kullanılan bileşimler içeriklerine göre çeşitlilik göstermekle beraber en çok iki tür hazır kalıplama bileşimi kullanılmaktadır [41].

3.4.6. Vakum Bağlaması Yöntemi

Kompozit malzeme (genellikle geniş sandviç yapılar) önce bir kalıba yerleştirilir, ardından bir vakum torbası, en üst katman olarak yerleştirilir. İçerideki havanın emilmesiyle vakum torbası, yatırılan malzemenin üzerine 1 atmosferlik basınç uygulayarak aşağıya çekilir. Sonraki aşamada tüm bileşim bir fırına yerleştirilerek reçinenin kür işlemi için ısıtılır. Bu yöntem sıklıkla elyaf sarma ve yatırma teknikleri ile bağlantılı olarak uygulanır. Kompozit malzeme tamir işlemlerinde de kullanılmaktadır [42].

3.4.7. Otoklav Bağlaması Yöntemi

Termoset kompozit malzemelerin performanslarını artırmak için elyaf/reçine oranını artırmak ve malzeme içinde oluşabilecek hava boşluklarını tamamen gidermek gerekmektedir. Bunun sağlanması, malzemenin yüksek ısı ve basınca maruz kalmasıyla sağlanabilir. Vakum bağlaması yöntemindeki gibi sızdırmaz bir torba ile elyaf/reçine yatırmasına basınç uygulanabilir. Fakat 1 atmosferden fazla düzenli ve kontrol edilebilir bir basıncın uygulanabilmesi için dış basınca ihtiyaç duyulur. Bu uygulama için otoklav bağlaması yönteminde de uygulanan ve kompleks şekillerde en çok kontrol edilebilen metot, dışarıdan sıkıştırılmış gazın kompozit malzemenin içinde bulunduğu kaba verilmesidir. Otoklav bağlaması yönteminde basıncın, ısının ve emişin kontrol edilebildiği bir basınçlı kap kullanılmaktadır. Vakum bağlaması yöntemi ile benzerdir.

Fırın yerine bir otoklav tankı kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır [42].



4. DOKUMA KUMAŞ TAKVİYELİ KOMPOZİT YAPILAR

Kompozitlerin güçlendirilmesinde, lifler veya tekstil yüzeyleri kullanılır. Lifler (kesikli veya filament) ve bunlardan üretilen matlar, kompozit güçlendirmede uzun zamandır bilinmektedir. Ancak tekstil yüzeylerinin güçlendirme malzemesi olarak kullanımı son yıllarda yaygınlaşmıştır. Tekstil malzemeleri 1800'li yıllardan beri kompozit takviyesinde kullanıldığı halde, son 30 yılda lifli matların yerine tekstil yüzeylerinin kullanımı ile ilgili büyük bir gelişme yaşanmaktadır [35].

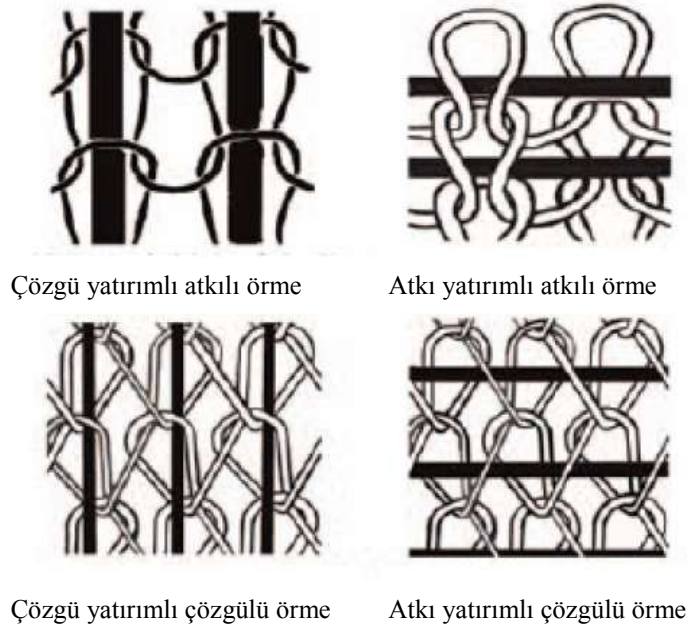
Tekstil yüzeyleri ile güçlendirilmiş kompozitlerin üretimi, lif veya şerit takviyeli kompozitlere göre daha kolaydır. Ayrıca tekstil yüzeyi üreticileri birçok farklı matris malzemesi için uygun özellikte tek bir ürün üretebilmekte ve bu sayede stok ve üretim maliyetlerinin azalması sağlanmaktadır [36]. Yapısal uygulamalar için kompozitlerde sertlik, mukavemet, hasar/çatlak büyümesi direnci önemlidir. Kompozit malzemelerde güçlendirme materyali olarak tekstil malzemelerinin kullanımı, nihai ürünün sertliğinin, mukavemetinin ve dayanımının istenilen değerlerde olmasını sağlamaktadır [35].

Tekstil yüzeylerinin, kompozitlerin güçlendirilmesi için kolay işlem görme, şekillendirilebilme, geniş tasarım olanakları gibi avantajları bulunmaktadır. Dokuma, örme, saç örgüsü (braiding), dikim veya iğneleme teknolojileriyle üretilen kumaşlar veya bunların kombinasyonları kompozitlerin güçlendirilmesinde kullanılabilir [29].

Tekstil malzemeleri geleneksel olarak iki ve üç boyutlu (2D ve 3D) olmak üzere iki gruba ayrılabilir ve her ikisi de kompozit güçlendirmede kullanılabilir [37].

4.1. Tek Yönlü (UD) Dokuma Kumaşlar

Atkılı veya çözgülü örme ile tek doğrultuda yatırım iplikleri atılarak elde edilen yapılara tek yönlü (UD-Uni Directional) dokuma kumaş denilmektedir. Şekil 4.1'de tek yönlü dokuma yapılar olan atkı yatırımı atkılı örme yapısı, çözgü yatırımı atkılı örme yapısı, atkı (weft) yatırımı çözgülü örme yapısı, çözgü (warp) yatırımı çözgülü örme yapısı gösterilmiştir [38-39].



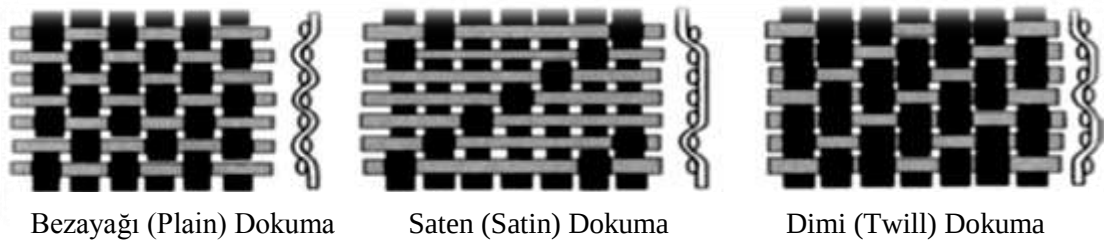
Şekil 4.1. Tek yönlü dokuma yapıları [39]

4.2. İki Boyutlu (2D) Kumaşlar

İki boyutlu (2D) kumaşlar 2D dokuma (2D weaving) ve 2D örme (2D knitting) kumaşlar olmak üzere iki grupta incelenmiştir.

4.2.1. 2D Dokuma Kumaşlar

Dokuma kumaşlar iki veya daha fazla iplik sisteminin birbirleri arasından geçmesiyle üretilmektedir. Dokuma kumaşlar, özellikle cam, karbon ve aramid takviyeli kompozitlerde yaygın olarak kullanılır. Dokuma takviye malzemelerinin atkı ve çözgü yönündeki stabilitesi ile kumaş kalınlığıyla bağlantılı olarak örtücülük faktörü oldukça yüksektir. Dokuma kumaşların kullanım alanlarının genişlemesi, 1980'li yılların başında cam liflerine göre daha yüksek dayanıklılığa sahip karbon ve aramid liflerinin geliştirilmesiyle mümkün olmuştur [40]. Şekil 4.2'de kompozit güçlendirmesinde kullanılan bazı iki boyutlu dokuma kumaş yapıları gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kompozitleri güçlendirmede kullanılan dokuma kumaş yapıları [41]

Dokuma kumaşlar, dokusuz yüzeylerden daha üstün özelliklere ve dökümlülüğe sahiptir. Dokuma kumaş takviyeli kompozitlerin çarpmaya karşı direnci ve çarpmadan sonra mukavemetleri dokusuz yüzey takviyeli kompozitlere göre oldukça yüksektir [40].

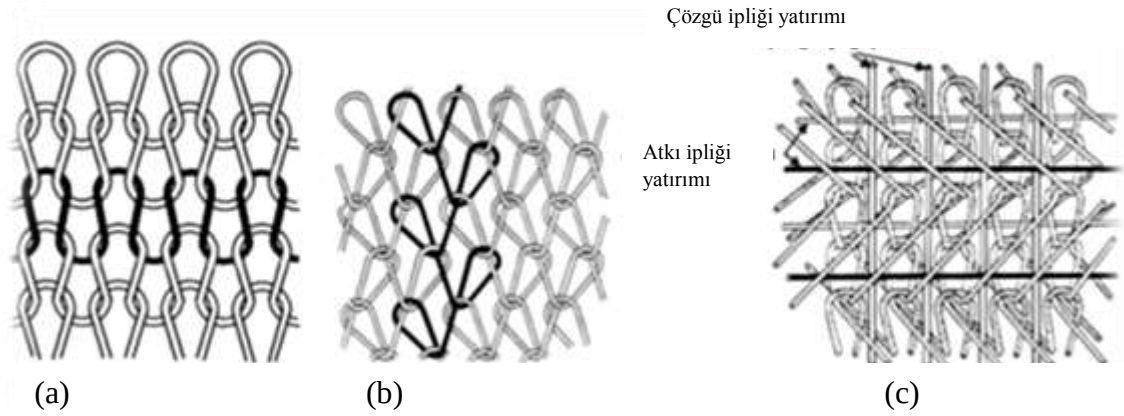


Şekil 4.3. Araştırmada kullanılan 2D kumaşlar

Dokuma kumaşlarda iplik büzülme oranı (ipliğin kumaş içerisindeki uzunluğu ve gerçek uzunluğu arasındaki oran) kompozit malzemenin lif hacim oranını, kalınlığını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Dokuma kumaşta kesişme noktalarının sayısı artarsa, kumaşın büzülme oranı artar ve bu nedenle kompozitin özellikleri etkilenir. Dokuma kumaşlar ile fiber hacim oranı %65'e kadar olan kompozit malzemeler üretilir. Dokuma kumaşların kullanımı, şerit halindeki liflerin kullanımına göre maliyet açısından avantaj sağlar [41].

4.2.2. 2D Örme Kumaşlar

Örme kumaşlar, ipliklerin birbirine ilmekler ile bağlandığı kumaşlardır. Kompozit malzemelerde örme kumaşların kullanımı diğer tekstil teknolojilerine göre daha az gelişmesine rağmen özel avantajlar ve birçok farklı uygulama olanakları sunmaktadır. Örme makinelerinde minimum atık miktarı ile yüksek hızlar ile örme kumaş üretimi gerçekleştirilebilir. Örme kumaşlara boyut stabilitesinin kazandırmak için duran iplik yatırımları yapılabilmektedir [41, 42]. Şekil 4.3'te atkı ve çözgü örme kumaşlar ile iplik yatırımlı çözgü örme kumaş gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Kompozit güçlendirmesinde kullanılan örme kumaşlar (a) atkı örme kumaş, (b) çözgü örme kumaş, (c) atkı ve çözgü ipliği yatırımı çözgü örme kumaş [42]

İplikler örme kumaş yapısı içerisinde kavisli (ilmek formundan dolayı) bir şekilde bulunur. Bu kumaşa esnek ve eğilebilir bir yapı sağlar ki özellikle kompleks şekilli bileşenlerin üretiminde önemli avantaj sağlar. Ayrıca bu iplik formu kompozit yapının darbe dayanımını arttırmaktadır [42].

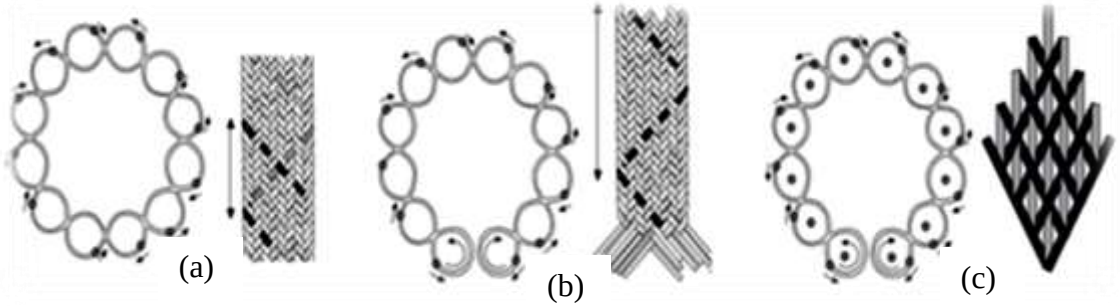
Örme kumaşların şekillendirilebilmesi oldukça kolay olduğu halde, örme kumaş ile güçlendirilmiş kompozitlerin özellikle düzlem içi mekanik özelliklerinin konvansiyonel kompozitlere göre daha düşük olması, en önemli dezavantajıdır [43]. Örme kompozitlerin düzlem içi mekanik özellikleri genellikle anizotropiktir (ölçüm eksenine ve yönüne bağlı olarak özellikleri değişir). Bunun nedeni örme kumaş yapısına ve sıklığına bağlı olarak örme kumaş içerisindeki liflerin oranlarının değişmesidir. Ancak, örme kompozitler bası altında gerilim altındakine nazaran (matris özelliklerinin ön plana çıkması nedeniyle) daha izotropik özellik gösterir [35].

Son yıllarda yapılan çalışmalarda, çok katmanlı örme kumaşlardan üretilen kompozitlerin çekme, basma dayanımlarının, kırılma sertliklerinin ve darbe penetrasyon direncinin, tek tabakalı laminasyonlara göre daha iyi olduğu belirlenmiştir [39]. Bunun özellikle arttırılmış lif içeriği ve komşu katmanlar arasındaki bağlantılardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Örme kompozitlerin özelliklerini ayrıca örme kumaşın ilmek uzunluğu, ilmek sıklığı gibi tekstil üretim parametreleri de etkilemektedir [36].

4.2.3. 2D Braiding

Braiding kumaşlar üç veya daha fazla ipliğin, birbiri üzerinden geçirilerek birleştirilmesi ile üretilen yapılardır. İki boyutlu braiding kumaşlar genel olarak düz

braiding kumaşlar (dar düz şerit halinde) ve tüp braiding kumaşlar (içerisinde bir öz malzemesi veya boşluk içerir) olmak üzere ikiye ayrılabilir [42]. Şekil 4.4'te iki boyutlu braiding kumaş üretim prosesi verilmiştir.



Şekil 4.5. İki boyutlu braiding kumaş üretim prosesi (a) tüp braiding (b) düz braiding (c) dolgu içeren (triaksiyal) braiding [43]

İki boyutlu braiding kumaşlardan üretilen kompozit malzemeler spor malzemelerinden, uzay malzemelerine kadar çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Braiding prosesi, karmaşık preformların üretiminde uygulanmakta ve genellikle cam, aramid, seramik ve metal lifleri kullanılmaktadır [44].

Braiding kumaşlar tüp formunda üretildiği için genellikle filament sarma yöntemi ile karşılaştırılmaktadır. Braiding kumaşlar ile üretilen kompozitlerin maliyeti bu yöntemle göre daha düşüktür. Braiding kumaşlar kompozit üretiminden önce daha esnek bir yapı sergilemekte ve bu nedenle çok farklı şekiller verilebilmektedir [45].

4.1.3. Üç Boyutlu (3D) Dokuma Kumaşlar

Kompozit malzemenin güvenilirliği veya sağlamlığı, güçlendirme elemanının -x, -y ve -z doğrultularındaki mukavemetine yani lif dağılımına ve lif miktarlarına bağlıdır. Ayrıca yapıdaki lifler veya iplikler arasında da bağlantı olması, yani yapının bütünleşmiş olması gerekir. Üç boyutlu tekstil yapıları, lif sürekliliği, yapıda istenen doğrultuda iplik veya liflerin çok katmanlı olarak yatırılabilmesi ve doğrultularının kontrol edilebilmesi, yapıdaki lif veya ipliklerin kesişimlerinin yeterli olması nedeniyle yük taşıyan elemanların imalatı için en uygun güçlendirme malzemesi olarak kabul edilmektedirler. Bu yapılarda katmanlar arası delaminasyon ve ayrılma riski ortadan kaldırılmaktadır [46].

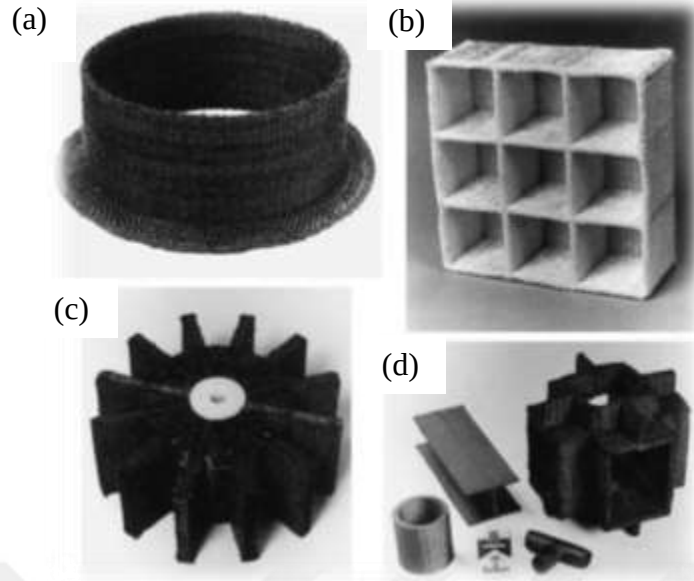
Üç boyutlu tekstiller ile güçlendirilmiş kompozitler, 1970'li yılların başında geliştirilmelerine rağmen, ancak 1990'lı yıllarda bu alanda önemli gelişmeler yaşanmıştır. Üç boyutlu tekstillerin kompozitlerde kullanımı, üretim maliyetlerinin azaltılması, kalınlık yönündeki mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve darbe hasar toleransının artırılması ihtiyacı sonucunda gerçekleşmiştir. Özellikle uzay endüstrisinde ve uçak sanayinde yüke dayanımlı yapılar istendiğinden ilk uygulamaları bu alanda yapılmıştır. Ayrıca denizcilik, otomobil ve inşaat sanayi gelişmeleri desteklemiştir. Dokuma, örme, saç örme ve iğneleme gibi teknikler ile üretilen üç boyutlu tekstiller kompozit güçlendirmesinde kullanılmaktadır (Şekil 4.10). Üç boyutlu kompozitlerin üretimi için ilk olarak braiding tekniği kullanılmış, bunu üç boyutlu dokuma kompozitler izlemiştir. Günümüzde her iki teknoloji birçok alanda kullanılmaktadır [45].

4.1.3.1. 3D Dokuma

Kırılgan matrisli kompozit malzeme üretiminde 1970'li yılların başlarında kullanılmaya başlayan üç boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozitler, kompozit üretiminde kullanılan diğer malzemelere oranla nispeten daha düşük maliyetli olması nedeniyle polimer matrisli kompozit malzeme üretiminde de yaygın bir şekilde kullanılmıştır.

Konvansiyonel dokuma makinelerinde üretilen ilk üç boyutlu dokuma kumaşlar, uçak fren sistemlerinde ve endüstriyel kayış üretiminde kullanılmıştır. Ancak bu makinelerin adaptasyon gerektirmesi ve üretim hızlarının düşük olması nedeniyle, daha sonra üç boyutlu dokuma kumaşlar için özel dokuma makineleri geliştirilmiştir. Son yıllarda farklı kesitlere ve şekillere sahip çok katmanlı dokuma kumaşların üretimi mümkündür [47].

Genel olarak üç boyutlu dokuma kumaşlar: Tabaka-tabaka dokuma, kalınlık yönünde dokuma ve XYZ dokuma olmak üzere üç gruptan oluşmaktadır (Şekil 4.10). Şekil 4.6'de üç boyutlu dokuma kumaş ile güçlendirilmiş kompozit malzeme örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.6. Üç boyutlu dokuma kumaş takviyeli kompozit malzeme örnekleri [47]

Dokuma işlemi sırasında her üç yönde şekil verilebilmesi ve böylece doğrudan kalıba yerleştirilebilecek şekilli kumaşların üretilmesi bu yöntemin en önemli avantajıdır. Üç boyutlu dokuma kumaşlarla güçlendirilmiş kompozitlerin, yapılarındaki çözgü iplikleri ve dolgu ipliklerinin ortogonal yerleşimi nedeniyle, düzlem içi çekme dayanımları yüksektir. Bu yapılar ile %65'in üzerinde lif hacim oranına sahip kompozitler üretilmektedir. Yapılarında -z yönünde yerleşen iplikler, iyi hasar toleransı sağlamaktadır [36].

Dokuma yöntemiyle üç boyutlu sandviç tekstiller de üretilir. Özel dokuma makinelerinde üretilen bu kumaşlar birbirine dokuma yüzeyleri ile bağlanmıştır [43].

4.1.3.2. 3D Örme

Literatürde iki boyutlu örme kumaşlar ile güçlendirilmiş kompozitler ile ilgili araştırmalar mevcutken, üç boyutlu örme kompozitlerin uygulamaları ve mekanik özellikleri ile ilgili çok az bilgi bulunmakta, ancak son yıllarda bu konuda yoğun araştırmalar yapılmaktadır [44].

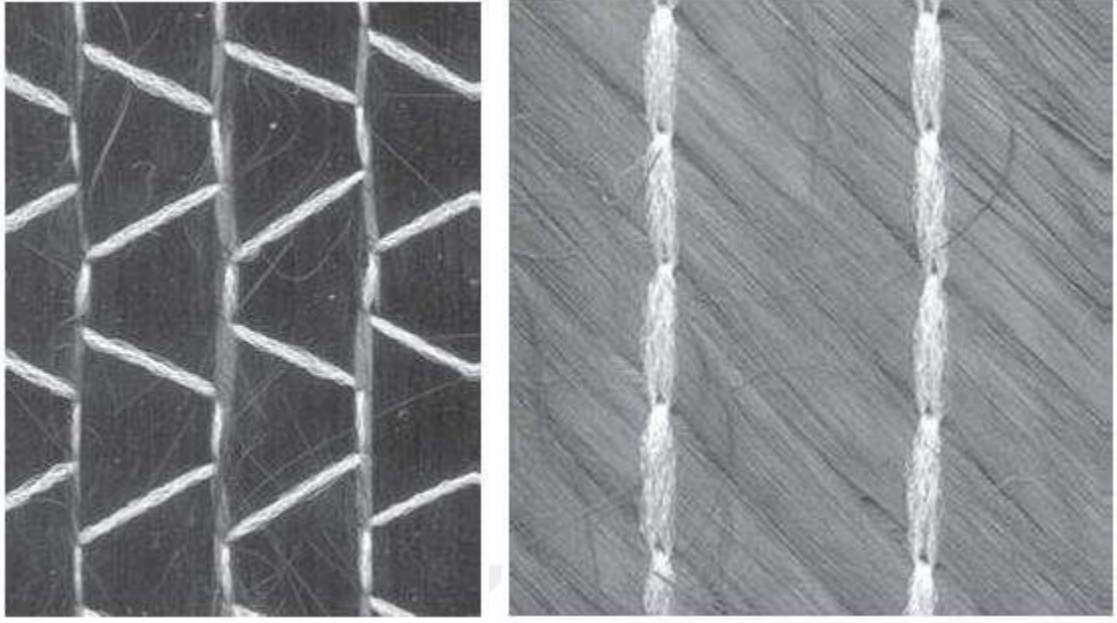
Kompozitlerde kullanılan üç boyutlu örme kumaşlar; multiaksiyal çözgü örme (non-crimp) kumaşlar, şekillendirilmiş (near-net shape) kumaşlar ve sandviç tekstiller olmak üzere üç grupta toplanabilir [39].

a) Multiaksiyal çözgü örme (non-crimp) kumaşlar

Multiaksiyal çözgü örme kumaşlar oldukça yeni bir ürün grubunu oluşturmaktadır. Bu kumaşlar, triko ilmekleri ile birbirine bağlanan, çözgü iplikleri (0° iplikleri), atkı iplikleri (90°) ve çapraz ipliklerini ($\pm\theta^\circ$) içermektedirler. Kalınlık yönünde kompozitin sertliğini ve dayanımını arttıran bu yapılar özellikle tek yönlü (unidirectional) kumaşların yerini almaya başlamıştır [45].

Multiaksiyal çözgü örme kumaşların üretiminde cam, karbon ve aramid lifleri ile bunların kombinasyonları kullanılabilir. Liflerin yanı sıra dokusuz yüzey kumaş katmanları da yapıya dahil edilebilir. Makinede tüm ipliklerin ve kumaş katmanlarının üstüste yerleştirilmesinin ardından bu çok katlı yapı, örme bölgesine girer ve triko ilmekler ile birbirine bağlanır. Örme ipliği olarak genellikle polyester iplikler kullanılırken son yıllarda cam ve karbon liflerinden üretilen örme iplikleri tercih edilmektedir [46]. Multiaksiyal kumaşlarda farklı malzemeler bir arada kullanılabilir, ancak kullanılan ipliklerin numarası ve birim ağırlığı ile ilgili sınırlamalar mevcuttur. Ayrıca yüksek miktarlarda üretim için uygundur.

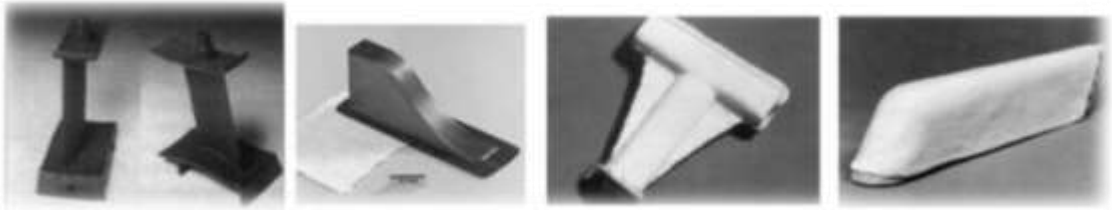
Multiaksiyal çözgü örme kumaşlar özellikle yüksek performanslı yatlar ve rüzgar tribünü kanatlarındaki kompozitlerde güçlendirme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sanayisindeki kullanımları giderek artmakta, gelecekte bu alanda kullanılan temel malzeme olacağı ifade edilmektedir. Bu yöntem ile tek adımda farklı kumaş katmanlarına sahip bir yapı oluşturulabildiğinden işçilik maliyetleri düşüktür. Multiaksiyal kumaşlarda ipliklerde büzülme (crimp) olmadığı için özellikle düzlem içi özellikleri, aynı lif hacim oranına sahip olan dokuma kumaşlara göre oldukça yüksektir. Multiaksiyal kumaşlara, özellikle normal dokuma kumaşlara göre çok daha kolay bir şekilde kompleks şekiller verilebilmektedir [46]. Multiaksiyal kumaşlardan üretilmiş kompozit malzemenin görüntüsü Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.7. Multiaksiyal çözgü örme kumaş takviyeli kompozit malzeme görüntüsü [46]

b) Şekillendirilmiş (near-net shape) kumaşlar

1990'lı yılların sonunda, düz örme teknolojisinde bilgisayar kontrollü tasarım ve kontrol sistemlerinin (elektronik kontrollü tek iğne seçimi ve ilmek transferi mekanizmalarının) geliştirilmesi ile üç boyutlu ve şekillendirilmiş örme kumaşlar üretilmektedir. Özellikle kesim ve dikim işlemlerine gereksinim duyulmadan, üniform yapıdaki kumaşların tek adımda ve düşük maliyetle üretimi mümkün olmaktadır. Şekillendirilmiş örme kumaşlar henüz gelişme aşamasında olmasına rağmen şimdiden otomobil çamurluklarında, T-boru bağlantılarında, flanşlı borular ve haznelerde, jet motoru parçalarında kullanılmaya başlanmıştır [45]. Şekil 4.7'de şekillendirilmiş üç boyutlu örme kumaş takviyeli kompozit örnekleri verilmiştir.

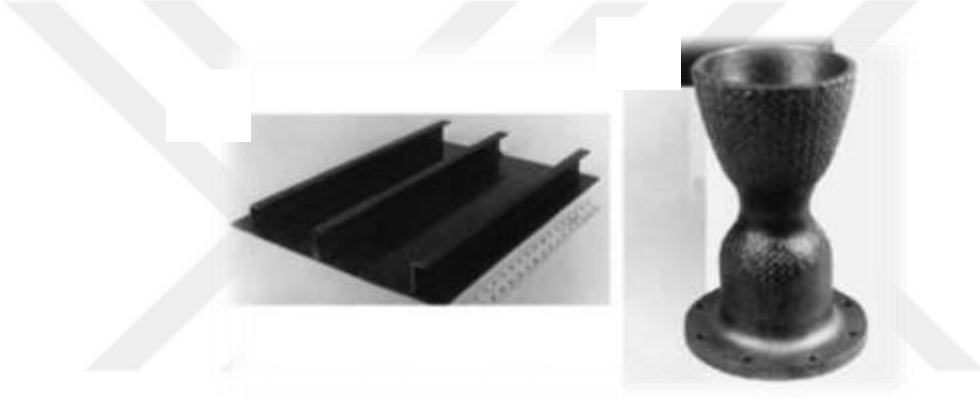


Şekil 4.8. Şekillendirilmiş üç boyutlu örme kumaş takviyeli kompozit örnekleri [46]

4.1.3.3. 3D Braiding

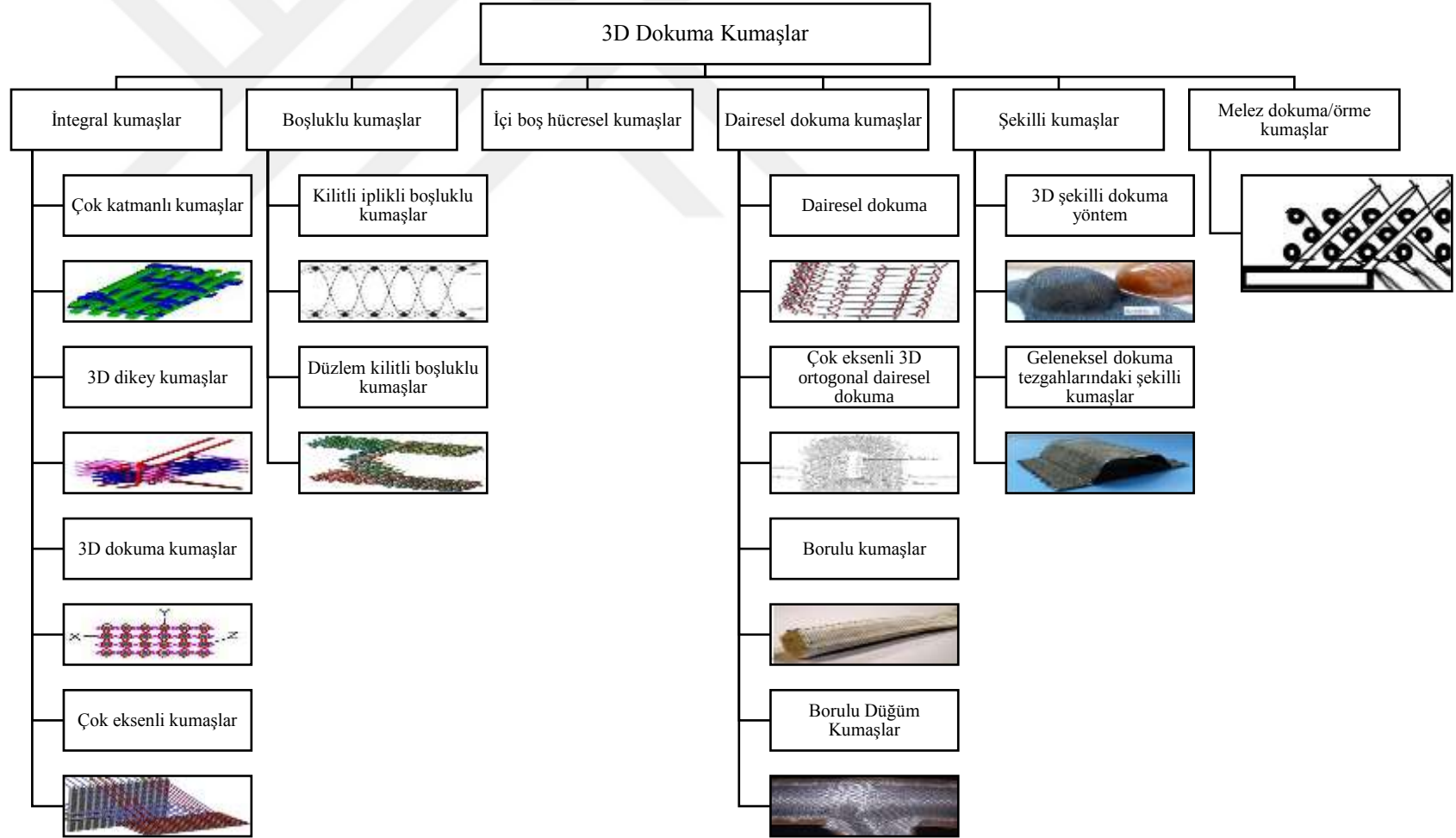
Üç boyutlu braiding tekniği, T, L, U ve H profiller gibi kompleks geometriye sahip tekstil yapılarının üretimi için yeni geliştirilmiş bir teknolojidir. Bobinler, ipliklerin yer değiştirmesini sağlayan mekanizmanın dönmesiyle ve anahtarların bobinlerin istenilen yolu takip edecek şekilde ayarlanmasıyla hareket etmektedir [47].

Bu yöntem ile birçok farklı profil geometrisi elde edilmektedir. Braiding bölgesine bobinlerin ilave edilmesi veya çıkarılması ile üretilcek kumaşın kalınlığı ve enine kesit geometrisi kesintisiz olarak değiştirilebilmektedir [48]. Şekil 4.9’da tek adımda üretilmiş farklı kesitlere sahip üç boyutlu braiding kompozitlerine iki örnek verilmiştir.



Şekil 4.9. Üç boyutlu braiding takviyeli kompozit örnekleri [48]

Bu kumaşlar özellikle boru ve millerin, sertleştirme elemanlarının (I,T, J şekilli) ve diğer ince, uzun kompozit malzemelerin desteklenmesinde kullanılmaktadır. Türbin rotorlarının tek bir adımda üretimi bu proses ile mümkün olmuştur. Üç boyutlu braiding tekniğinin en önemli özelliği, kompozit malzemeye yüksek kayma modülü ve kalınlık yönünde yüksek takviye sağlamasıdır. Büyük parçaların üretimi için makinenin yeterli olmaması bu yöntemin dezavantajıdır [45].



Şekil 4.10. 3D dokuma kumaşların sınıflandırılması [21]

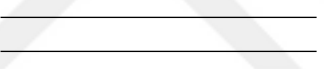
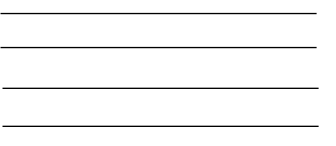
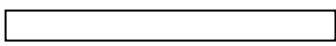
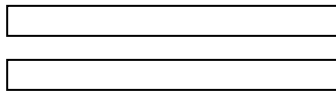
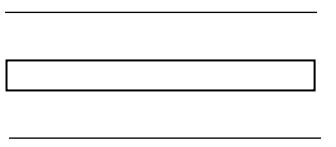
5. MATERYAL VE METOD

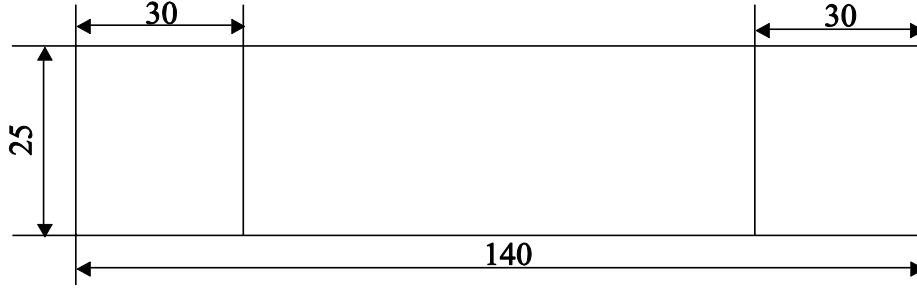
5.1. Problemin Tanımı

Bu çalışmada deliksiz, dairesel delikli, U kenar çentikli, yarım daire kenar çentikli, tek pim bağlantılı ve çift pim bağlantılı olmak üzere üretilen beş farklı kompozit levhanın çekme testleri gerçekleştirilerek çentik ve pim bağlantı geometrisinin hasar tipi ve mukavemeti üzerine etkisi 2D, 3D ve hibrit (2D ve 3D) kumaş tabakalı numuneler için incelenmiştir.

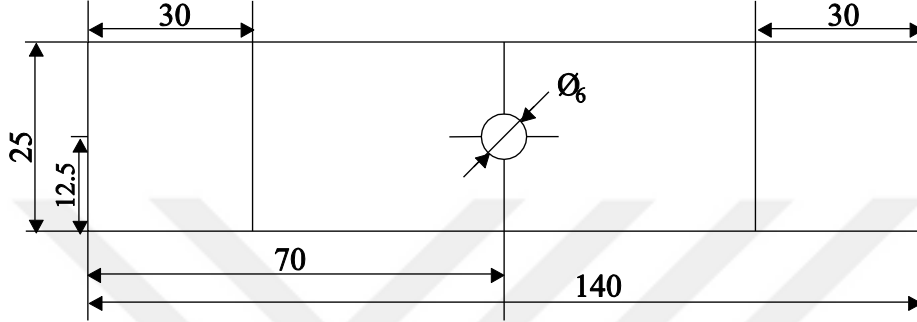
Çalışmada 2D iki tabaka (2D2T), 2D dört tabaka (2D4T), 3D bir tabaka (3D1T), 3D iki tabaka (3D2T) ve 2D iki tabaka ile 3D bir tabaka (CORE3D) olmak üzere beş farklı tabaka diziliminde kompozit levhalar üretilmiştir (Tablo 5.1).

Tablo 5.1. Kompozit malzeme grupları ve çizimleri

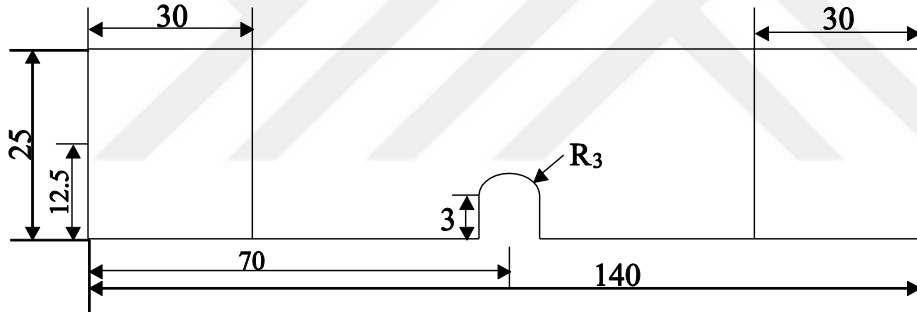
Kompozit Levha Adı	Yoğunluk (kg/m ³)	Kalınlık, <i>t</i> (mm)	Tabaka Dizilimi
2D2T	1624.47	0.72	 1. Tabaka (2D) 2. Tabaka (2D)
2D4T	1480.68	1.37	 1. Tabaka (2D) 2. Tabaka (2D) 3. Tabaka (2D) 4. Tabaka (2D)
3D1T	1786.03	1.06	 1. Tabaka (3D)
3D2T	1733.60	1.76	 1. Tabaka (3D) 2. Tabaka (3D)
CORE3D	1566.94	1.41	 1. Tabaka (2D) 2. Tabaka (3D) 3. Tabaka (2D)



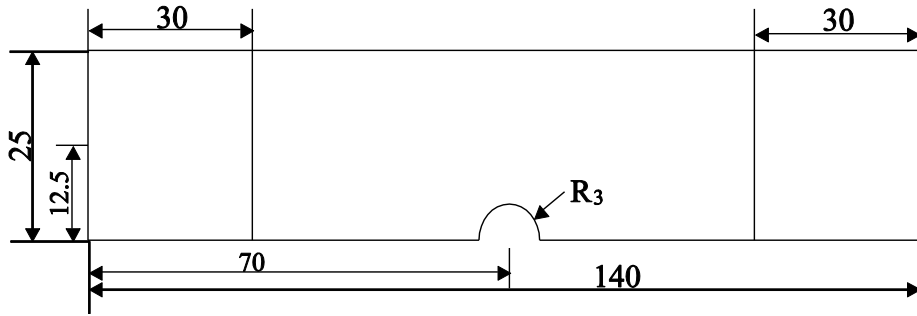
Şekil 5.1. Deliksiz kompozit numune boyutları



Şekil 5.2. Dairesel delikli kompozit numune boyutları



Şekil 5.3. U kenar çentikli kompozit numune boyutları



Şekil 5.4. Yarım daire kenar çentikli kompozit numune boyutları

Tablo 5.1’de verilen tabaka dizilimine göre üretimi gerçekleştirilen kompozit levhaların çekme ve darbe testleri yapılarak, çekme mukavemeti ve enerji sönümleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır. 3D cam fiber epoksi kompozit malzemelerin mekanik

davranışını belirlemek amacıyla gerçekleştirilen çekme testlerinde kullanılan numunelerin boyutları Şekil 5.1-4 arasında gösterilmiştir.

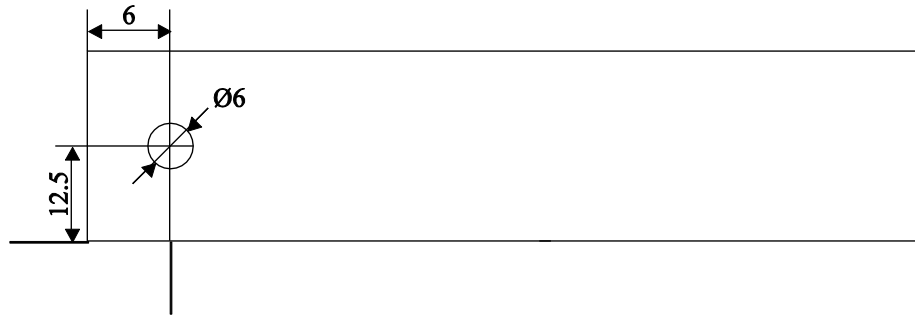
Araştırmada kullanılan numunelere ait uzunluk (L), kalınlık (t), genişlik (W), dairesel delik çapı (D) ve çentik yarıçapı (R) değerleri ise Tablo 5.2’de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kompozit numunelerin boyutları

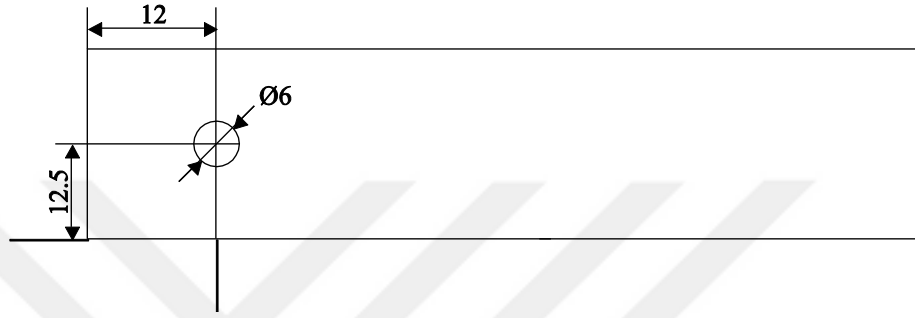
L	Numune uzunluğu	140 mm
W	Numune genişliği	25 mm
D	Dairesel delik çapı	6 mm
R	Çentik yarıçapı	3 mm

3D cam fiber epoksi kompozit malzemelerin pim bağlantı mukavemetini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen çalışmada kullanılan tek ve çift pim delikli numunelerin boyutları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da yer alan çizimlerde gösterilmiştir.

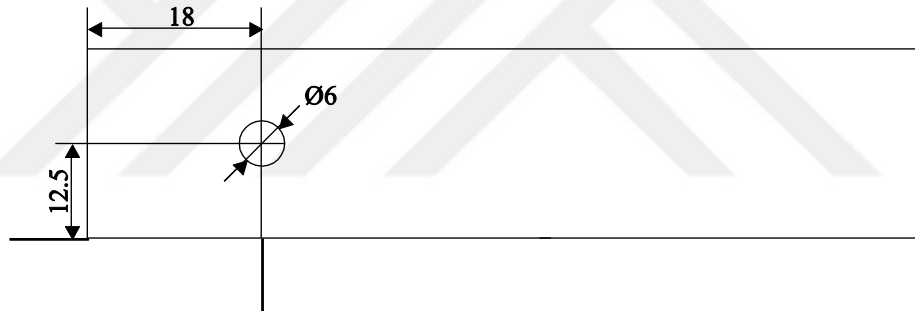
Çalışmada kullanılan tek ve çift pim delikli kompozit numunelere ait uzunluk (L), kalınlık (t), genişlik (W), dairesel delik çapı (D), pim merkezi ile levha serbest kenarı arasındaki uzaklık (E) ve iki pim arasındaki uzaklık (M) değerleri de Tablo 5.3’te verilmiştir.



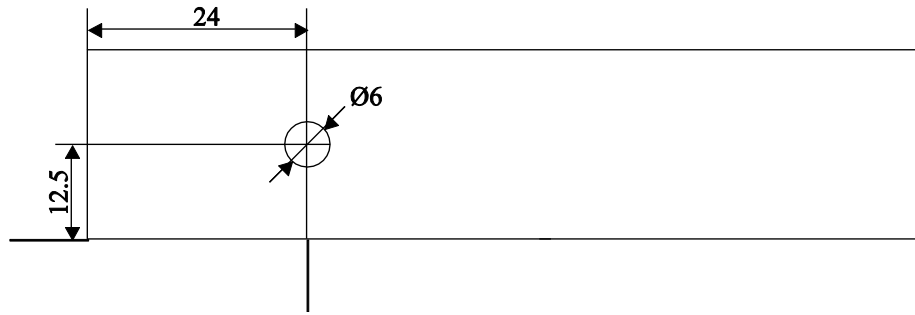
a)



b)

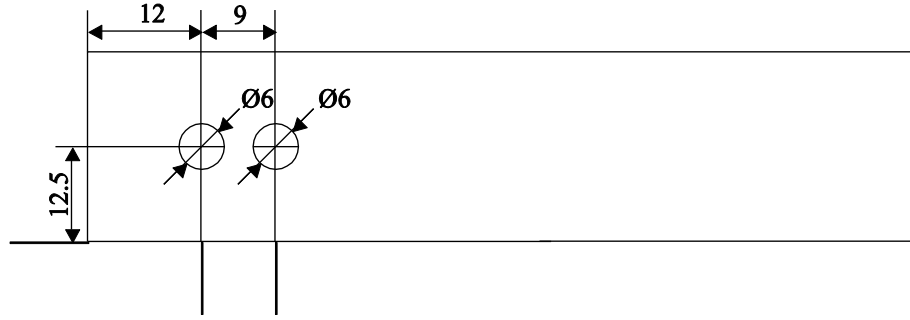


c)

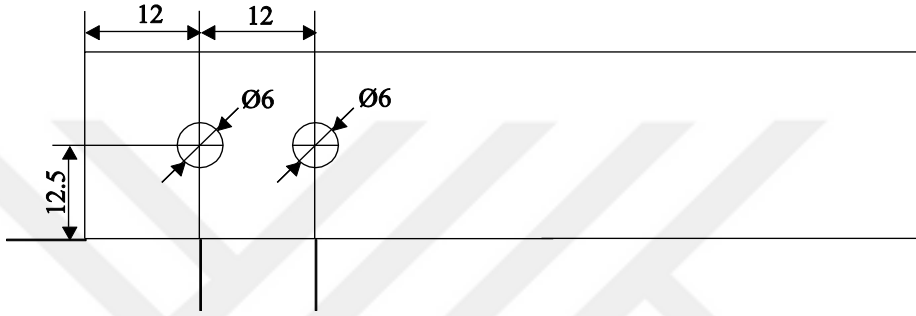


d)

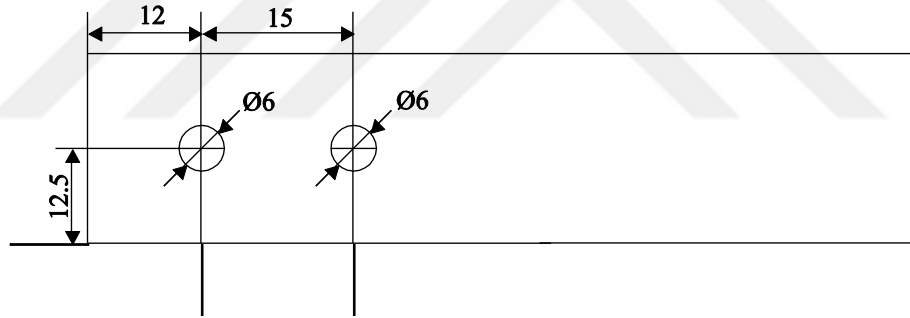
Şekil 5.5. Tek pim delikli kompozit numune boyutları a) $E/D = 1$, b) $E/D = 2$, c) $E/D = 3$,
d) $E/D = 4$



a)



b)



c)

Şekil 5.6. Çift pim delikli kompozit numune boyutları ($E/D=2$) a) $M/D=1.5$, b) $M/D=2$,

c) $M/D=2.5$

Tablo 5.3. Tek ve çift pim delikli kompozit numunelerin boyutları

L	Levha uzunluğu	140 mm
W	Numune genişliği	25 mm
D	Pim çapı	6 mm
E	Pim merkezi ile levhanın serbest kenarı arasındaki uzaklık	6/12/18/24 mm
M	İki pim merkezi arasındaki uzaklık	9/12/15 mm

Tek ve çift pim delikli kompozit numunelere ait E/D ve M/D oranları ile numunelerin adlandırılmasına yönelik kodlamalar Tablo 5.4'te gösterilmiştir.

Tablo 5.4. Kompozit numunelere ait gösterim ve tanımlar

Gösterim	Tanım
D	Deliksiz
DD	Dairesel delikli
U	U kenar çentikli
YD	Yarım daire kenar çentikli
TE1	Tek pim delikli, $E/D = 1$
TE2	Tek pim delikli, $E/D = 2$
TE3	Tek pim delikli, $E/D = 3$
TE4	Tek pim delikli, $E/D = 4$
ÇE2M1.5	Çift pim delikli, $E/D = 2$, $M/D = 1.5$
ÇE2M2	Çift pim delikli, $E/D = 2$, $M/D = 2$
ÇE2M2.5	Çift pim delikli, $E/D = 2$, $M/D = 2.5$

5.2. Deneysel Çalışmalar

3D dokuma cam fiber epoksi kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini belirleyebilmek için deneyler yapılmıştır. Kompozit malzeme üretiminde 2D ve 3D dokuma kumaş kullanılmıştır. 2D kumaşlar en az iki farklı iplik türünün çeşitli şekillerde birbirinin içerisinden geçirilmesiyle üretilmektedirler (Şekil 5.7). Dokusuz yüzeylere oranla daha üstün özelliklere sahip olan 2D kumaşların çarpma mukavemetleri dokusuz yüzeyli kumaşlardan daha yüksektir. 3D kumaşlar ise tabaka-tabaka dokuma, XYZ dokuma ve kalınlık yönünde dokuma olmak üzere üç farklı türde üretilmektedirler. Çalışma kapsamında kullanılan 3D kumaş boşluklu XYZ dokuma türündedir (Şekil 5.8).



Şekil 5.7. Numune üretiminde kullanılan 2D dokuma cam fiber kumaşlar

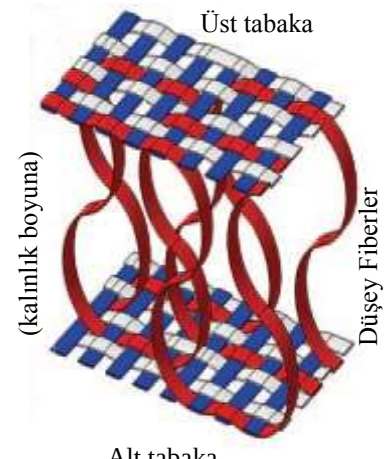
Dokuma kumaşlarda iplik büzülme oranı (ipliğin kumaş içerisindeki uzunluğu ve gerçek uzunluğu arasındaki oran) kompozit malzemenin lif hacim oranını, kalınlığını ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Dokuma kumaşa kesişme noktalarının sayısı artarsa, kumaşın büzülme oranı artar ve bu nedenle kompozitin özellikleri etkilenir. Dokuma kumaşlar ile fiber hacim oranı %65'e kadar olan kompozit malzemeler üretilebilir. Dokuma kumaşların kullanımı, şerit halindeki liflerin kullanımına göre maliyet açısından avantaj sağlar [41].



(a)



(b)



(c)

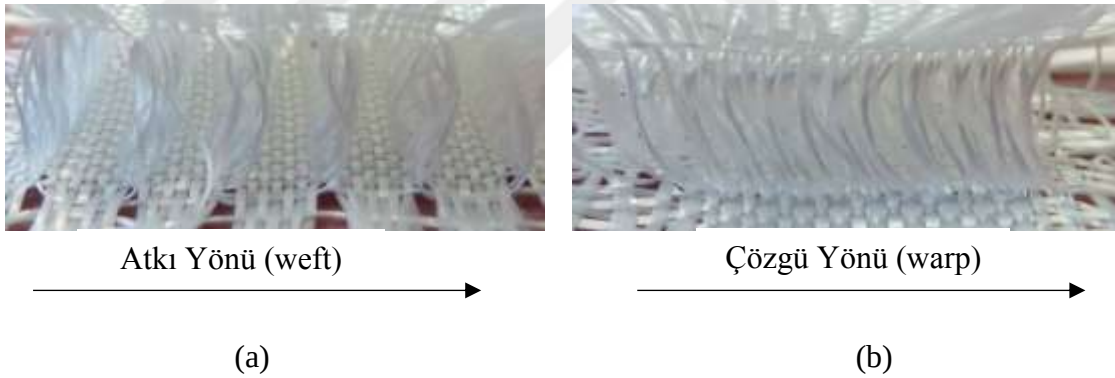
Şekil 5.8. Araştırmada kullanılan 3D dokuma kumaş a) genel, b) tabakalar arası ve c) modelleme [24] görünümü

Dokuma işlemi sırasında her üç yönde şekil verilebilmesi ve böylece doğrudan kalıba yerleştirilebilecek şekilli kumaşların üretilebilmesi bu yöntemin en önemli avantajıdır. Üç boyutlu dokuma kumaşlarla güçlendirilmiş kompozitlerin, yapılarındaki çözgü iplikleri ve dolgu ipliklerinin ortogonal yerleşimi nedeniyle, düzlem içi çekme

dayanımları yüksektir. Yapılarında -z yönünde yerleşen iplikler, iyi hasar toleransı sağlamaktadır.

3D dokuma kumaşlar biri ön diğeri arka olmak üzere farklı iki kumaş yüzeyinin aralarında kurulan bağlarla bir araya getirilmesiyle üretilir. Çok yeni bir teknoloji olmayan 3D kumaşlar, farklı endüstri alanlarındaki talepleri karşılayabilecek şekilde üretilmektedirler. 3D dokuma kumaş üretiminde hem atkı hem de çözgü örme yöntemleri kullanılmaktadır. 3D kumaşlar yuvarlak ya da düz örme makinalarında üretilirler. Aynı yataklarda yer alan iki farklı iğne grubunun bulunduğu makinelerde üretilen 3D kompozit malzemeler donanım ilaveleriyle konvansiyonel örme makinalarında da üretilirler.

3D kumaşların üretiminde kullanılan en yaygın yöntem çözgülü örme yöntemidir. 2D dokuma ve atkı örme kumaşlara oranla daha fazla özelliğe sahip olan çözgülü örme yöntemi, makinelerde üretilen iki farklı kumaş yüzeyinin uygun ipliklerle ara bağlantılı olarak birbirlerine bağlanması esasına dayanmaktadır. Bu yöntemle ürün, talep edilen özelliklere göre 4 ile 7 yatırım rayı kullanılarak üretilmektedir [24].

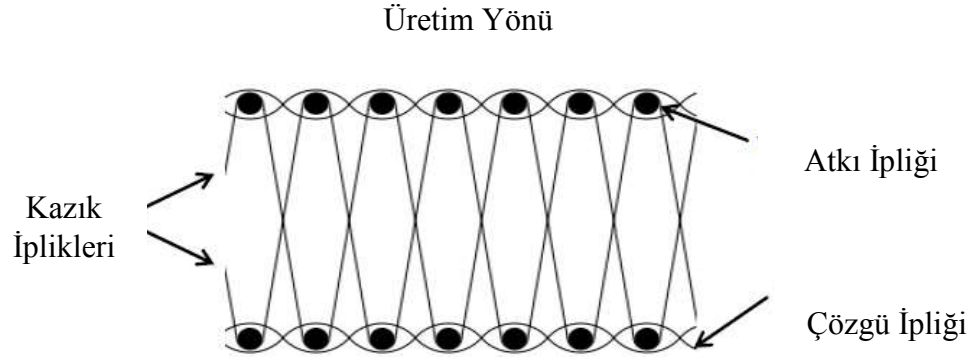


Şekil 5.9. Çalışmada kullanılan boşluklu 3D kumaşların a) atkı yönünde, b) çözgü yönünde görünümü

Çalışmada kullanılan boşluklu 3D dokuma kumaş kesimi çözgü yönünde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.9).

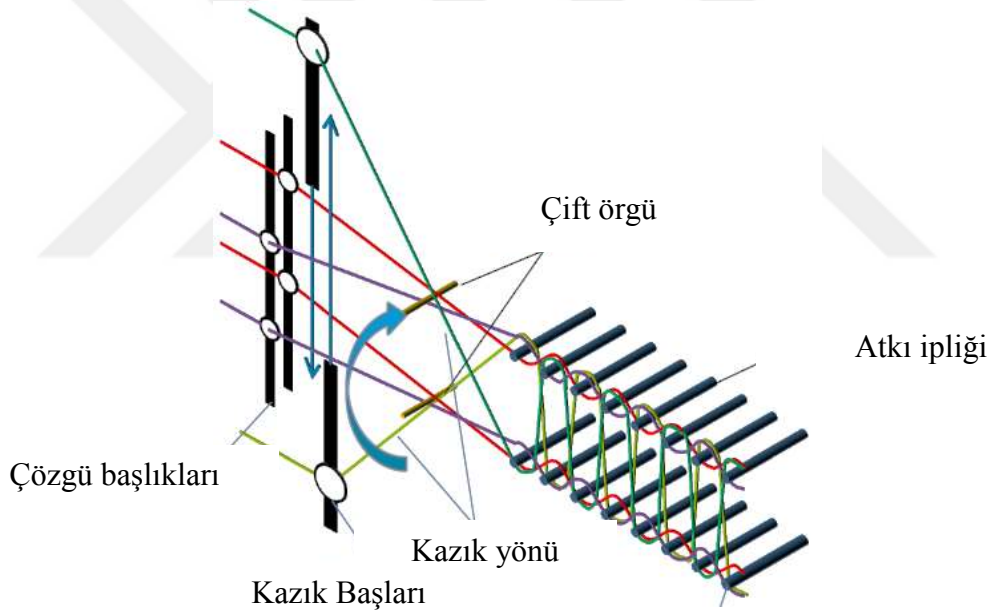
Bu kumaşın özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Kalınlık boyunca (Z yönünde) ek iplikler içerir (Şekil 5.10).



Şekil 5.10. 3D boşluklu dokuma kumaş yapısı [29]

- Bağlantı iplikleri nedeniyle iyi sıkıştırma özelliğine sahiptir.



Şekil 5.11. 3D boşluklu kumaş üretimi [29]

- Kazık bağlama ve dış yapılar değiştirilerek mekanik özellikler ayarlanabilir (Şekil 5.11).
- Makine gereksinimleri, eşzamanlı çoklu atkı atma ve ayarlanmış bir atma sistemi içerir.
- Ana uygulamalar yapısal kompozitler ve yastıklamadır.
- Z yönünde karbon için uygun değildir.

Araştırma kapsamında kullanılan kumaşlar *Dost Kimya* firmasından temin edilmiştir. Kompozit malzeme üretiminde matris malzemesi olarak *LR-160* epoksi reçine (Ağırlıkça : 100 : 25 ± 1; Hacimce : 100 : 30 ± 1) ve sertleştirici *LH-160* kullanılmıştır (Şekil 5.12).



Şekil 5.12. Kompozit malzeme üretiminde kullanılan reçine ve sertleştirici

Vakum infüzyon yöntemi ile üretilen kompozit numunelerin çekme testi dayanımını belirlemek için 100 kN'luk yük hücresine sahip *Instron B58801* model cihaz kullanılmıştır. Bu bölümde kompozit malzeme üretimi aşamaları ve çekme testine ilişkin bilgilere detaylı bir şekilde yer verilmiştir.

5.2.1. Vakum İnfüzyon Yöntemi ile Kompozit Numunelerin Üretimi

Araştırmada kullanılan 3D dokuma cam fiber epoksi kompozit malzemeler vakum infüzyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. İlk olarak kompozit malzemenin üzerinde üretileceği kontrol panelli ısıtıcı masa yüzeyi ıslak bir bez yardımıyla temizlendikten sonra kuru bir bez yardımıyla silinerek kurutulmuştur (Şekil 5.13).



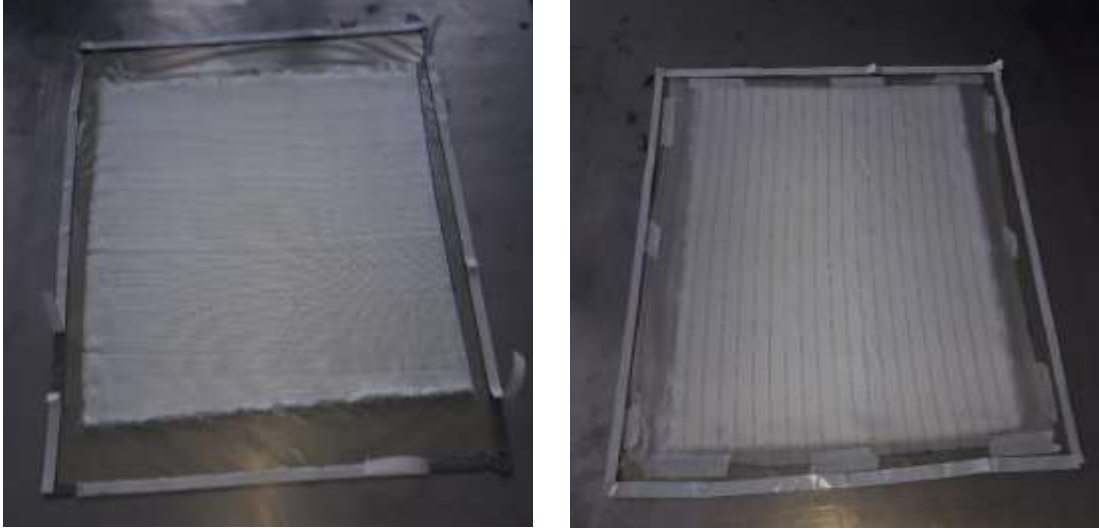
Şekil 5.13. Vakum infüzyon yönteminin gerçekleştirildiği kontrol panelli ısıtıcı masa

Kurutulan yüzey üzerine 120x110 cm ebatlarında kesilen serbest bırakma filmi serilerek reçinenin masa yüzeyine yapışmasını önlemek için ayırma (release) filminin etrafı kağıt bantlar ile yapıştırılmıştır (Şekil 5.14).



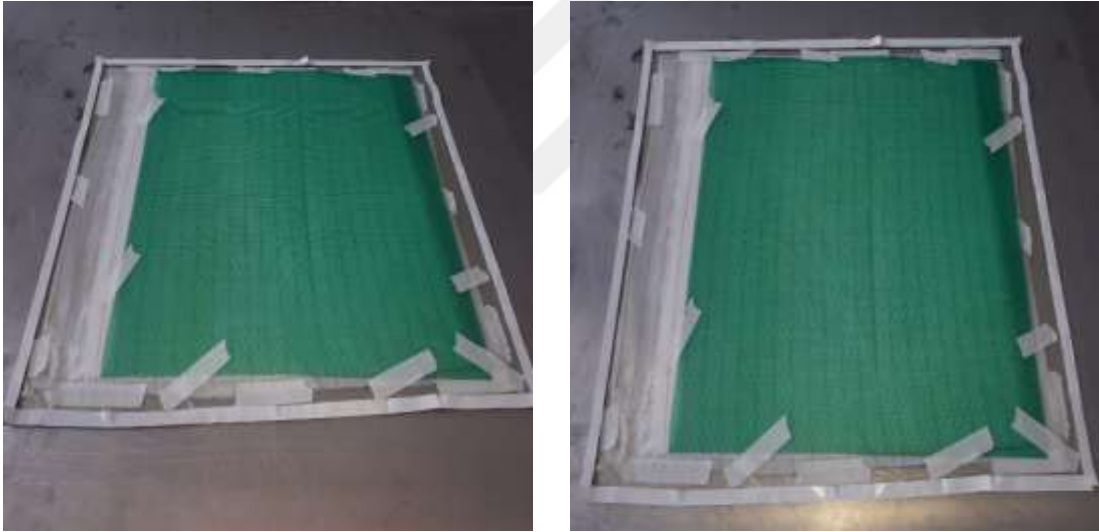
Şekil 5.14. Kontrol üniteli ısıtıcı masa yüzeyine ayırıcı film serilmesi ve çevresinin kağıt bantlarla sarılması

Ayırıcı film üzerine 102x102 cm ebatlarında kesilen kompozit fiber malzemeler yerleştirilmiş ve kompozit malzeme üzerinde bir tekstür oluşturmak ve üretilen kompozit malzemeden akış filtresi ile vakum torbasını kolayca ayırabilmek için üzerine 104x110 cm ebatlarında kesilen ayırma tabakası (peel ply) serilmiştir (Şekil 5.15). Kompozit kumaş içerisinde epoksi akışının homojen ve akıcı bir şekilde gerçekleşebilmesi için tüm kumaş tabakaları akış yönüne paralel çözgü yönünde vakum infüzyon masasına yerleştirilmiştir.



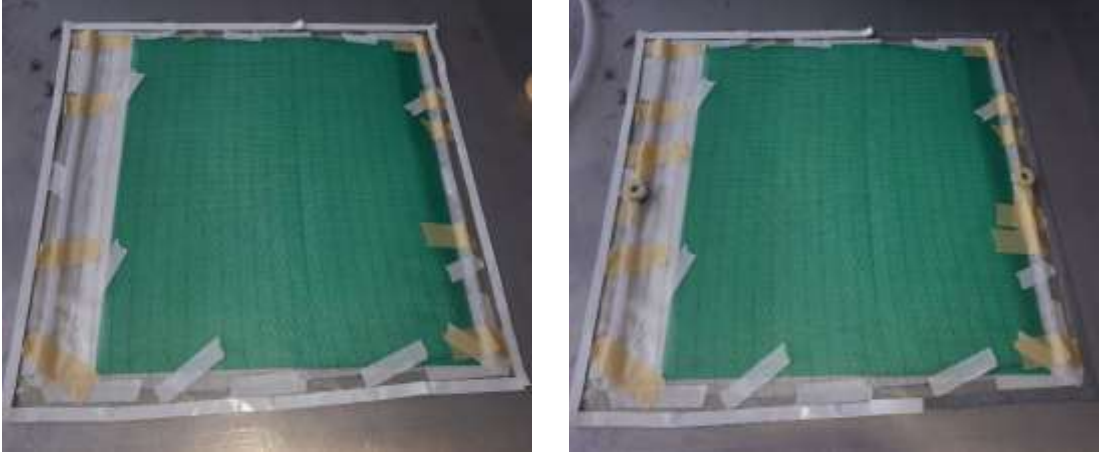
Şekil 5.15. Release film üzerine kompozit fiber ve peel ply serilmesi

103x103 cm boyutlarında kesilen akış filesi (mesh) peel ply üzerine serilmiş ve kağıt bantlar yardımıyla yapıştırılmıştır (Şekil 5.16).



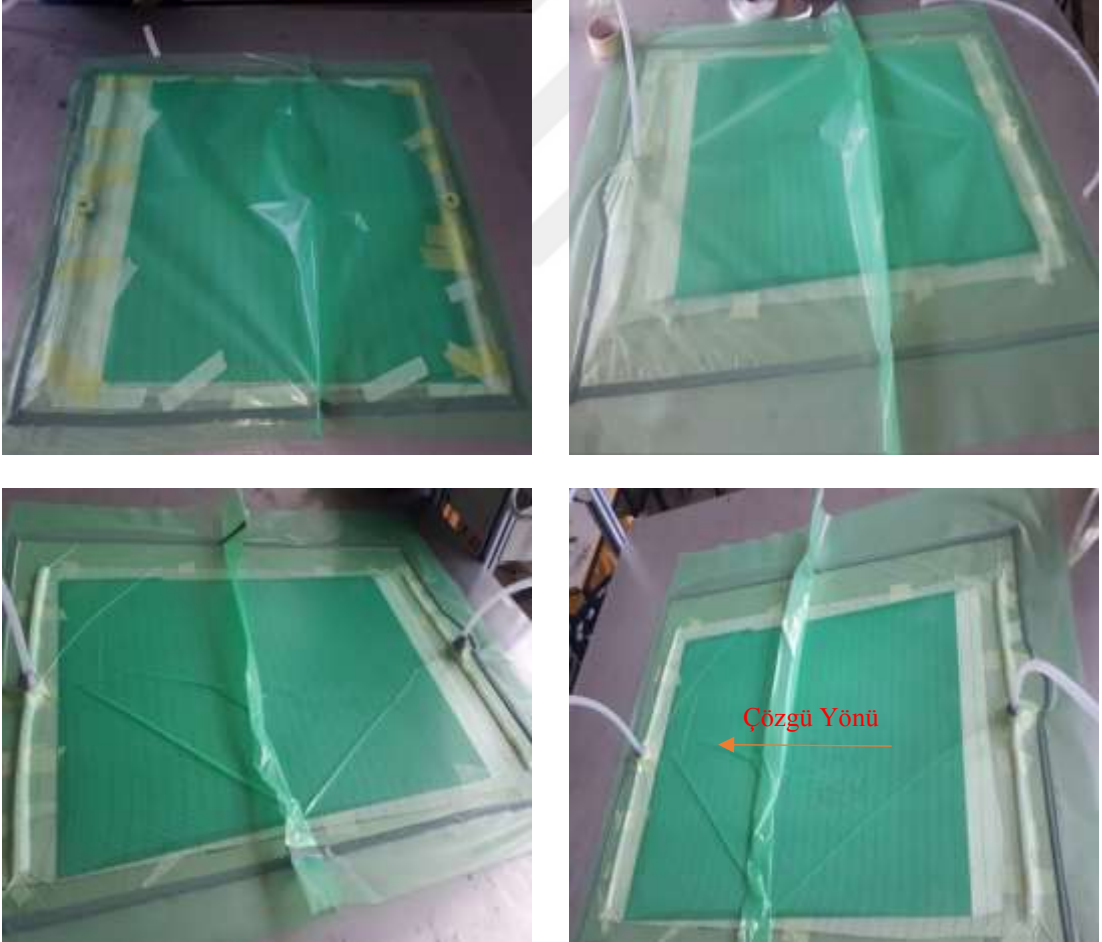
Şekil 5.16. Akış filesinin (mesh) peel ply üzerine serilmesi ve spiral hortumun yapıştırılması

Bu aşamanın ardından reçinenin, reçine tankından akışını gerçekleştirecek reçine hattı kurulur. Reçine hattı kurulurken şeffaf ve spiral hortumlar kullanılmıştır. Bir ucu şeffaf hortuma bağlanan spiral hortum yaklaşık 5 cm peel ply ile sarılmış ve kağıt bantlarla yapıştırılarak çözülmesi önlenmiştir. Reçine hattının tam karşısına vakum hattı kurulmuştur. Vakum hattı kağıt bantlar ile yapıştırılmıştır (Şekil 5.17).



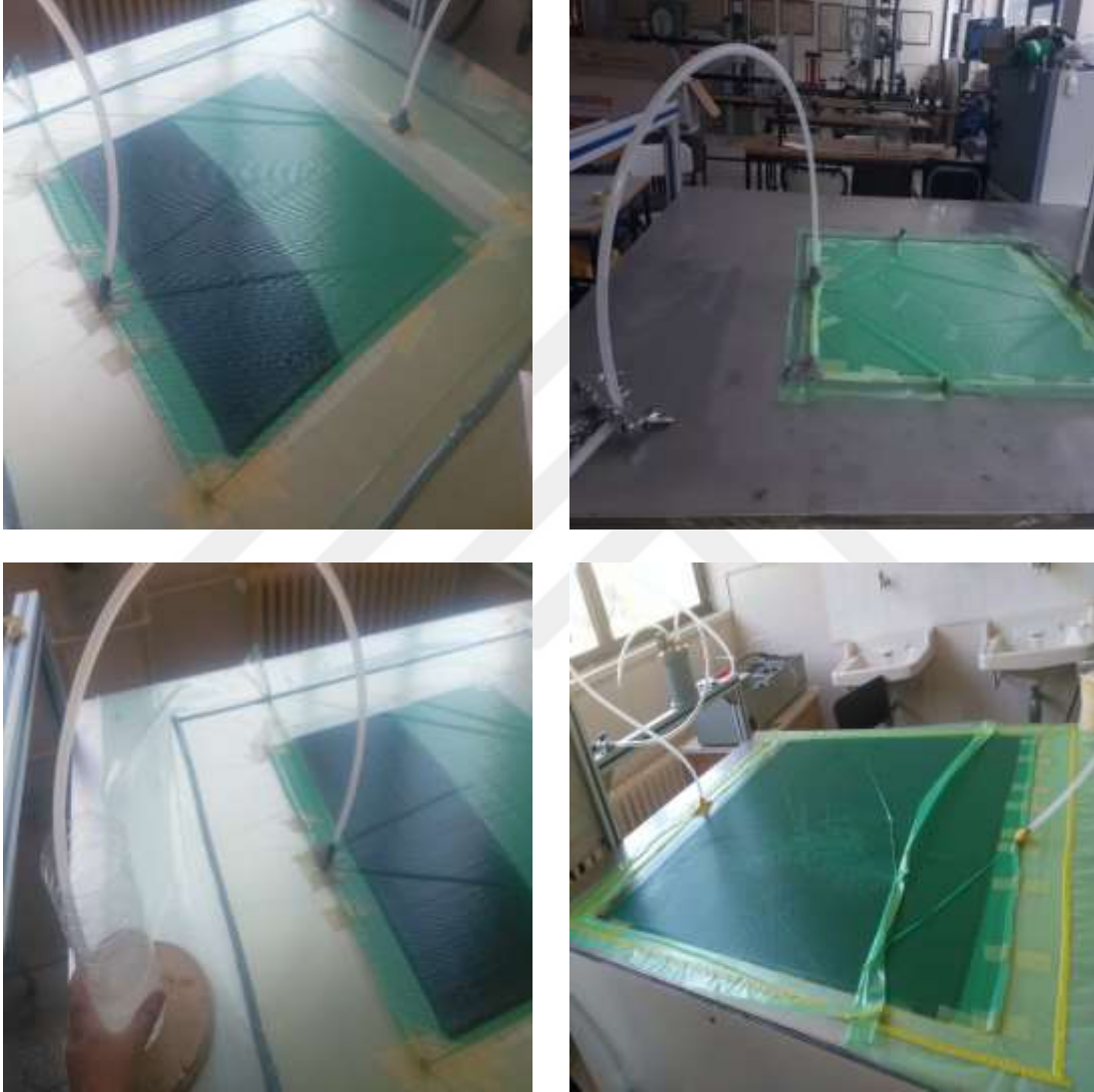
Şekil 5.17. Reçine ve vakum hatlarının oluşturulması

Bu aşamadan sonra sistemin üzeri vakum torbası ile kaplanarak etrafı hava almayacak şekilde yapıştırılmıştır (Şekil 5.18).



Şekil 5.18. Vakum torbasının kurulan sistem üzerine serilmesi

Vakum tankına bağlı olan hortum vakum hattı ucuna bağlanarak kağıt bantlarla yapıştırılmıştır. Reçine hattına ise başka bir hortum bağlanarak kağıt bantlarla yapıştırılmış ve bu hortumun diğer ucu katlanarak klepeler ile sabitlenmiştir. Hortumun boşta olan ucu reçine içerisinde daldırıldıktan sonra klepeler açılarak reçinenin akışı geręekleřtirilmiřtir (şekil 5.19).



şekil 5.19. Vakum ve reçine hattı hortumlarının takılması

Bu aşamayla birlikte kompozit malzeme üretimi geręekleřtirilecek olan sistem hazırlanmış ve epoksi reçine sistemi hazırlanmıştır. Araştırmada 1400 gr *LB-160* reçine ve 420 gr *LH-160* sertleştirici kullanılarak oluşturulan karışım yaklaşık 15 dakika süreyle karıştırılarak homojen hale getirilmiştir. Karışım içerisindeki hava kabarcıklarının giderilmesinin ardından reçine hattına bağlanan hortum karışım içerisine

daldırılmış, daha sonra klepeler açılarak sisteme reçine akışı başlatılmıştır. Dokuma kumaşlar üzerinde reçinenin ilerleyişi izlenmiş ve reçinenin kumaşın tamamını kapladığından emin olunduktan sonra hortumun ucu katlanarak klepeler ile tekrar kapatılmıştır. Bu işlemin ardından reçine karışımının kumaşın tamamına nüfuz edebilmesi için yaklaşık 2 saat beklenmiş ve bu süre sonunda vakum pompası kapatılmıştır. Üretilen levhalar sulu kesme makinasında istenilen ölçülerde kesilerek delme işlemine gönderilmiştir.

5.2.2. Delme İşlemi

Vakum infüzyon yöntemiyle üretilen 2D ve 3D cam fiber epoksi kompozit levhalar mengene yardımıyla matkap tezgahına sabitlenmiş ve U kenar çentikli, yarım daire kenar çentikli ve dairesel delikli ile tek ve çift pim delikli numunelerdeki delikler matkap vasıtasıyla Tablo 5.4 ve Tablo 5.5’te belirtilen ölçülerde açılmıştır (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. Kompozit numunelerde pim deliği açma işlemi

Tablo 5.5. Tek ve çift pim delikli numunelere ait ölçüler

Numune Adı	Bağlantı Tipi	L (mm)	E/D	M/D
TE1	Tek pim	140	1	-
TE2	Tek pim	140	2	-
TE3	Tek pim	140	3	-
TE4	Tek pim	140	4	-
ÇE2M1.5	Çift pim	140	2	1.5
ÇE2M2	Çift pim	140	2	2
ÇE2M2.5	Çift pim	140	2	2.5

5.2.2. Çekme Testi

Araştırma kapsamında üretilen kompozit numunelerin çekme testleri Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 100 kN'luk yük hücresine sahip *Instron B58801* model cihazı kullanılarak 1mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.21. Çekme testi cihazından bir görünüm

Çekme testi 2D2T, 2D4T, 3D1T, 3D2T ve CORE3D olmak üzere toplam beş tabaka diziliminde ve her bir dizilimde deliksiz, U kenar çentikli, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli, 4 adet tek pim bağlantılı ($E = 6\text{mm}$, $E = 12\text{mm}$, $E = 18\text{mm}$, $E = 24\text{mm}$) ve 3 adet çift pim bağlantılı

($M = 9\text{mm}$, $M = 12\text{mm}$, $M = 15\text{mm}$) numuneler için 3'er adet olmak üzere toplamda 165 adet numuneye uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler çekme testi cihazının çeneleri arasına ortalanarak düzgün bir şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 5.22).

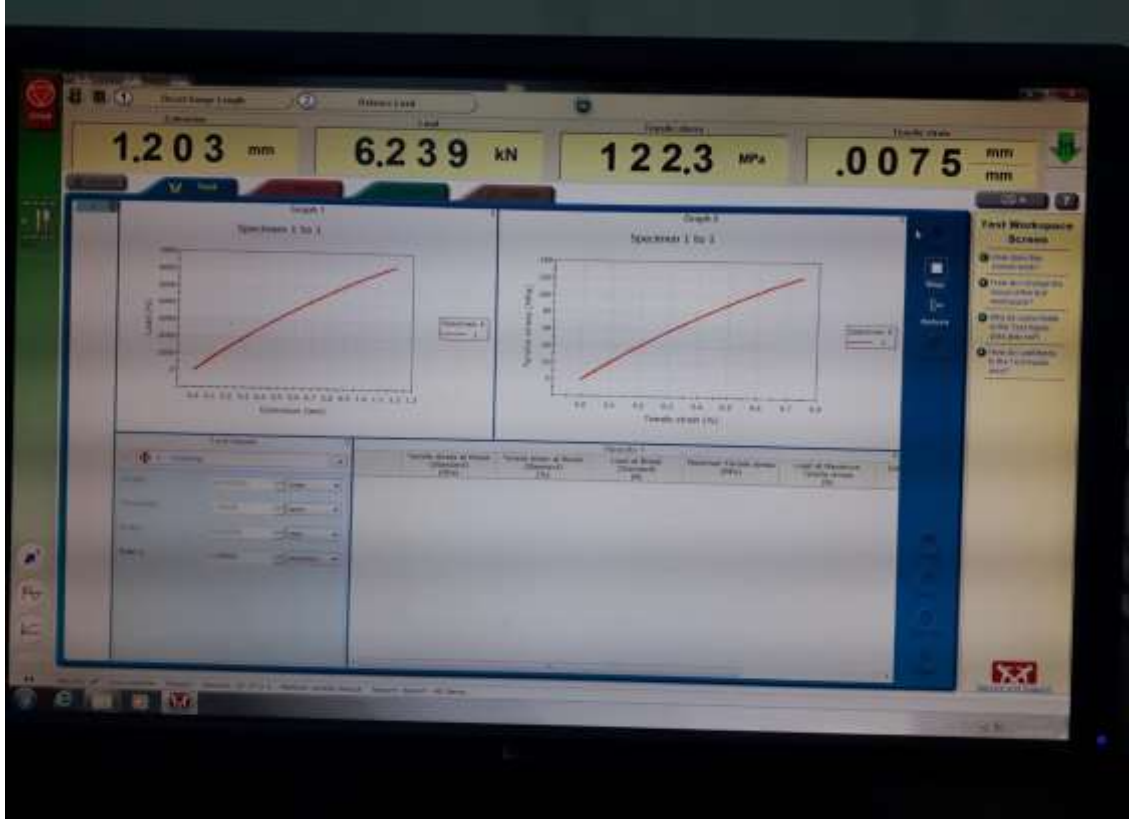


Şekil 5.22. Numunelerin çekme testi makinesine bağlanması



Şekil 5.23. Kompozit numunelerin pim bağlantı aparatı ile çekme testi cihazına bağlanması

Cihazın çenelerine yerleştirilen kompozit malzemelere kopuncaya kadar eksenel kuvvetler uygulanmıştır (Şekil 5.22) Bilgisayar aracılığıyla numunelerin artan kuvvet (F) değerleri karşısında gösterdiği uzama miktarları (ΔL) ölçülerek kuvvet-uzama miktarı grafiği elde edilmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. Deney sonrası numuneye ait çekme testi grafiği

Araştırma kapsamında üretilen tüm numuneler çekme testine tabi tutulmuş, numunelere ait yük ve uzama değerleri çekme cihazından alınarak yük-uzama grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler kullanılarak deliksiz numunelere ait elastisite modülü, çekme dayanımı, kopma gerilmesi ve yüzde kopma uzama değerleri hesaplanmış ve farklı tabaka dizilimlerinde üretilen numunelere ait elde edilen değerler birbirleriyle karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

Kompozit numunelerin çekme mukavemeti;

$$\sigma = \frac{F}{wt} \quad (5.1)$$

formülüyle hesaplanır. Burada;

σ : Çekme mukavemeti (MPa),

F : Maksimum yük (N),

w : Numune genişliği (mm),

t : Numune kalınlığı (mm)'dir.

Numunelerin elastisite modülü hesaplamasında ise;

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (5.3)$$

bağıntıları kullanılır. Burada;

E : Elastisite Modülü (MPa),

ε : Uzama oranı,

l : Başlangıçtaki çeneler arası numune uzunluğu (mm),

Δl : Uzama miktarı (mm)'dir.

Çentikli ve pim bağlantılı numuneler için ise hasar yükü değerleri farklı tabaka dizilimleri için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

5.2.3. Darbe Testi

Araştırma kapsamında üretilen kompozit numunelerin darbe testleri Ortadoğu Teknik Üniversitesi (ODTÜ), Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Merkez Laboratuvarında bulunan *Instron/Dynatup 9250HV* marka darbe test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.25).



Şekil 5.25. Darbe testi cihazı ve deneyi düzeneği

Kompozit malzeme numuneleri, özel aparatlarla bilgisayarlı bir düzeneğe bağlanan darbe test cihazı haznesine yerleştirilmiştir. Daha sonra 10x10 cm ebatlarında hazırlanan 3D2T, 2D4T ve CORE3D tabaka dizilimli toplam 10 adet kompozit numunenin darbe testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.26).

Sabitleme cıvataları aracılığıyla darbe cihazının her iki ucunda bulunan darbe cihazı plakalarına sabitlenen kompozit numuneler üzerine 5.645 kg kütleli çarpma aparatı, istenilen enerji düzeyini elde edebilecek şekilde farklı yüksekliklerden serbest bırakılmıştır. Kompozit numuneler üzerine uygulanacak darbe testi enerji düzeyleri potansiyel enerji denklemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Denklem 5.4).

$$E_p = m.g.h \quad (5.4)$$

Burada;

E_p : Potansiyel enerji (J)

m : Kütle (kg)

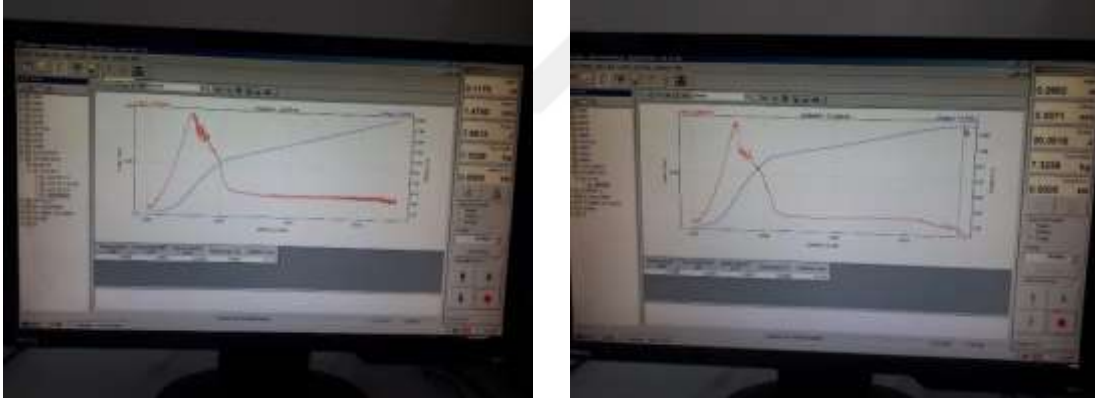
g : Yerçekimi ivmesi (m/s^2)

h : Yükseklik (m)'dir.



Şekil 5.26. Kompozit numunenin darbe cihazı haznesine yerleştirilmesi ve sabitlenmesi

Kompozit numuneler üzerine kademeli olarak değişen enerji aralıklarında darbeler uygulanmış ve numunelere ait reaksiyon kuvveti ve enerji grafikleri elde edilmiştir (Şekil 5.27).



Şekil 5.27. Darbe testi cihazına kompozit numunelerin darbe testi sonrası grafiklerinin elde edilmesi

Araştırma kapsamında oluşturulan tüm numunelere çekme testi uygulanmış ve sonuçlar cihazın bağlı olduğu bilgisayara kaydedilmiştir. Numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiklerinde, yükleme değeri nihai hasar noktasına ulaştıktan sonra numune içerisindeki fiberlerde meydana gelen hasar nedeniyle yük taşıyamaz duruma geldiğinden dolayı, numunede uzama devam ederken yüklemenin aşamalı olarak düşüş gösterdiği gözlenmiştir. Numunelere nihai hasar noktalarına ulaşmaya kadar yükleme devam ettirilerek, maksimum dayanım gücü belirlenmiştir. Tabaka dizilimi, çentik türü ve pim bağlantı geometrisi gibi unsurlar da deneylerde baz alınan değişken

parametreleri oluşturmuştur. Numunelerin farklı tabaka dizilimlerine göre mukayese edilebilmesi için, beş farklı tabaka dizilimi için tüm çentik tiplerinde ve pim bağlantılarında deneyler tekrarlanmıştır.

Araştırma kapsamında kullanılan numunelerin darbe testleri için ise yalnızca 2D dörd tabakalı (2D4T), 3D iki tabakalı (3D2T) ve CORE3D tabaka dizilimleri kullanılmıştır. Darbe testleri 20 J ve 30 J olmak üzere iki farklı değerde gerçekleştirilmiştir.



6. SONUÇLAR

Çalışmanın bu bölümünde yapılan deneyler sonucunda elde edilen grafiklere yer verilmiştir. Deney numunelerine ait sabit parametreler fiber oryantasyon açısı iken tabaka dizilimleri çentik tipi, E/D ve M/D değerleri ise değişken parametrelerdir.

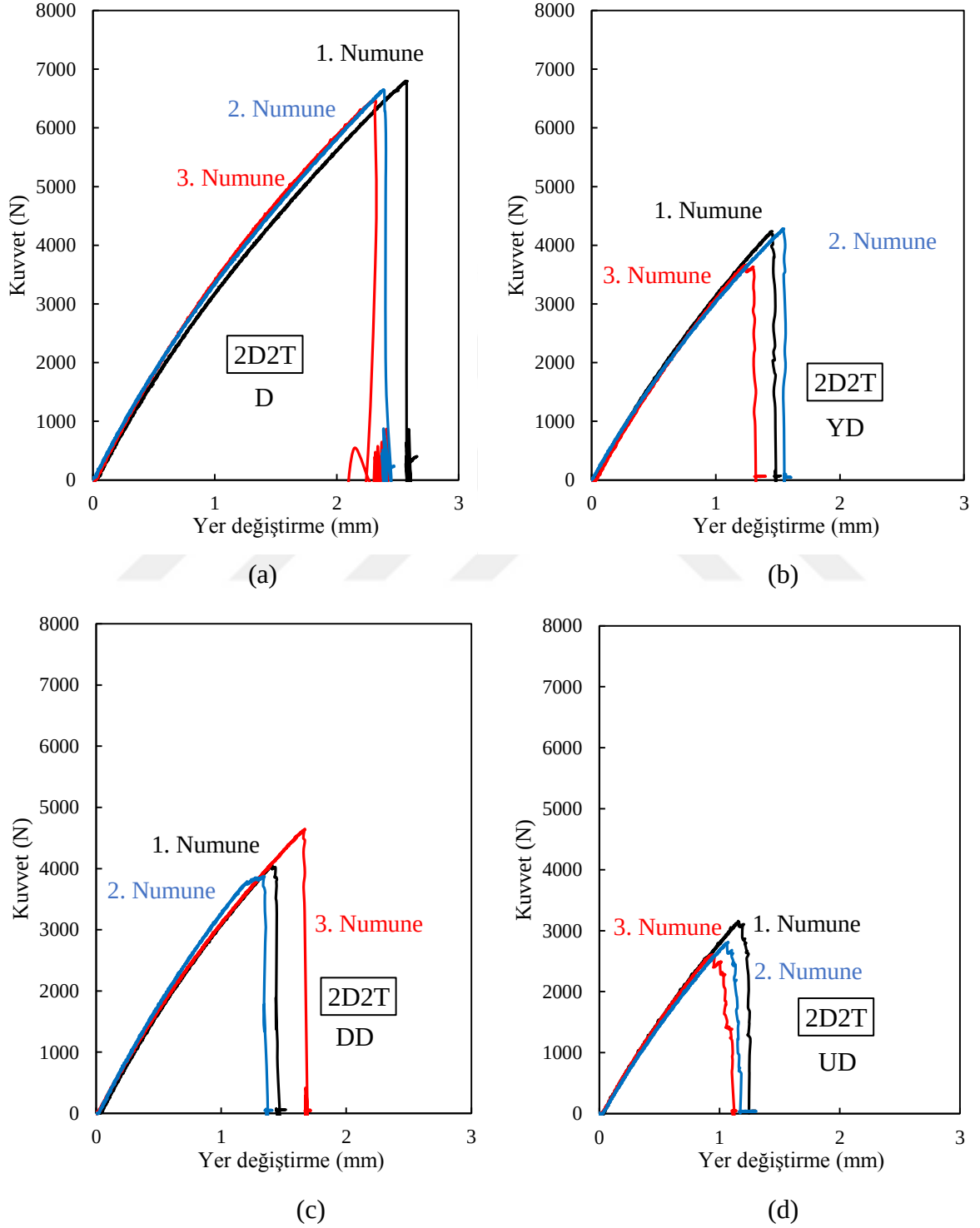
Şekil 6.1-21 arasında araştırmada kullanılan farklı tabaka dizilimlerindeki deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli, U çentikli, tek ve çift seri pim bağlantılı numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiklerine yer verilmiştir. Deneylerde elde edilen sonuçlar tabaka dizilimlerine göre beş gruba ayrılırken, farklı tabaka dizilimine sahip her bir numune de kendi arasında çentik biçimlerine, tek pim bağlantılı ve çift bağlantılı olma durumlarına göre üç gruba ayrılmıştır. Bunun nedeni numuneleri kendi aralarında ve tabaka dizilimlerine göre karşılaştırabilmektir.

Şekil 6.1’de deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Grafiklerden elde edilen çentiksiz numune sonuçları kompozit numunelerin modellenmesinde ihtiyaç duyulan mekanik özelliklerin belirlenmesi için de kullanılabilir. Şekil 6.1’de yer alan grafiklerde maksimum yük değerine ulaştıktan sonra düştüğü görülmektedir. Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinden dolayı, kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin başlangıç bölgesinde doğrusal bir artış gözlenmektedir.

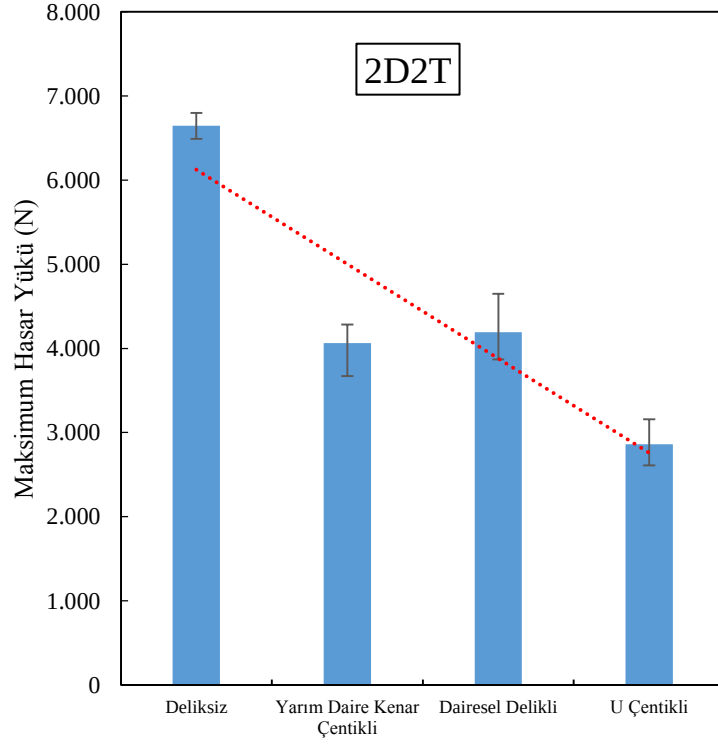
6.1. 2D İki Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları

6.1.1. Çentikli Numuneler

Şekil 6.1’de 2D2T tabaka dizilimli numuneler için kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.1. 2D2T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)



Şekil 6.2. Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi

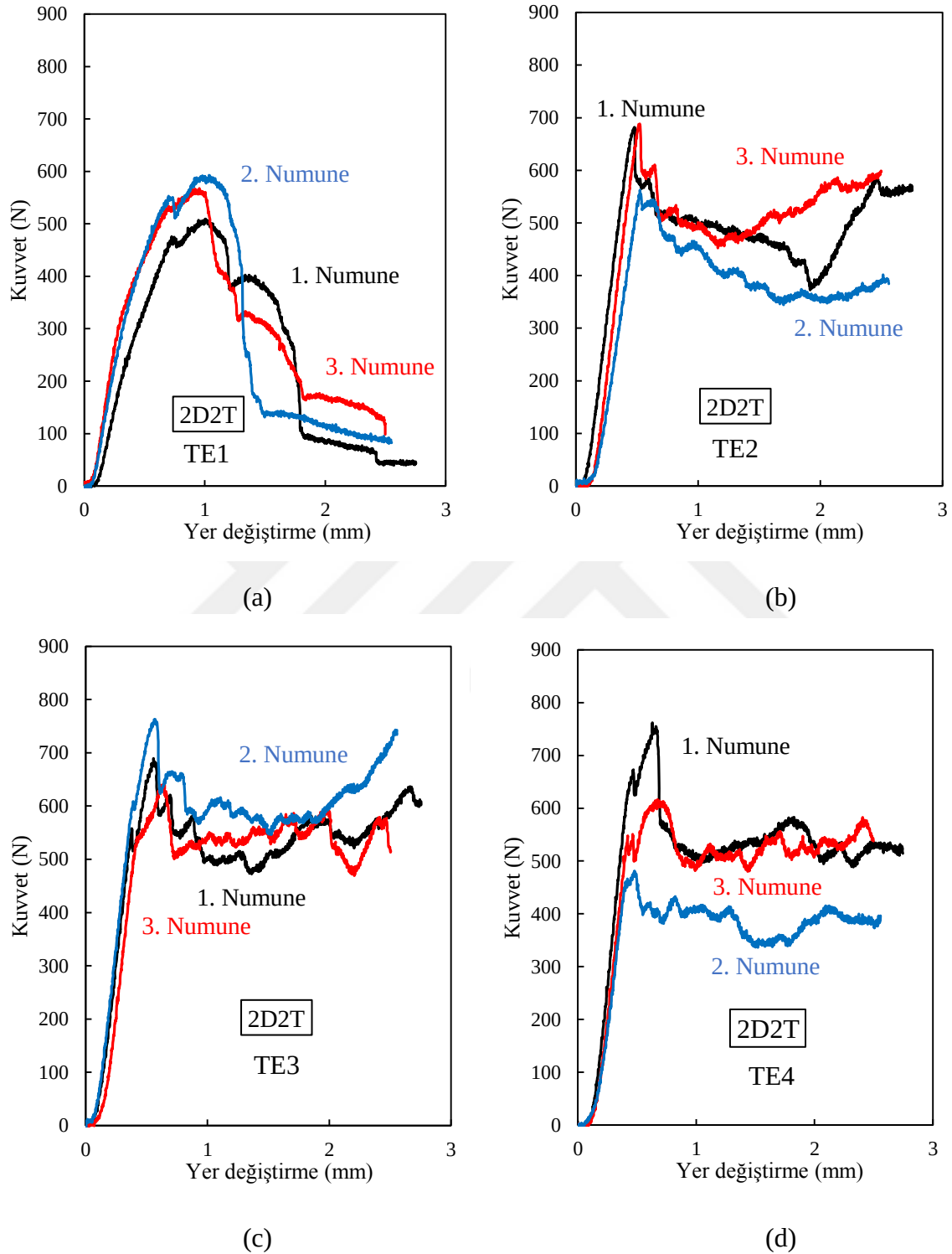
Şekil 6.2’de görüldüğü üzere deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde en düşük hasar yükü 3158 N değeri ile U çentikli kompozit numunede gözlenirken, en yüksek hasar yükü ise 6799 N değeri ile deliksiz kompozit numune deneyi sonucu elde edilmiştir. Şekil 6.2’de hasar eğrisi giderek azalacak biçimde kompozit numuneler sıralanmıştır. Tablo 6.1’deki hasar resimlerinde görüldüğü gibi çentikli numunelerde yırtılma (fiber çekme) hasarı oluşmuştur. U çentikli kompozit numunenin asimetric bir yapı göstermesi nedeniyle yükleme esnasında çekme yükünün yanı sıra aynı zamanda eğilme momenti etkisi oluştuğu da görülmektedir. Bu durum en düşük hasar yükünün U çentikli numunelerde ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yarım daire kenar çentikli numuneler ile dairesel delikli numunelerin hasar yüklerinin benzer düzeyde olduğu ancak çentikli numunelerin dairesel delikli numunelere oranla daha düşük hasar yükü değerine sahip olduğu görülmüştür. Yarım daire kenar çentikli numunelerin hasar yükü değerinin, dairesel delikli numunelerin hasar yükü değerinden %4.2 küçüktür.

Tablo 6.1. Çekme deneyi sonrası 2D2T numunelerde oluşan hasar resimleri

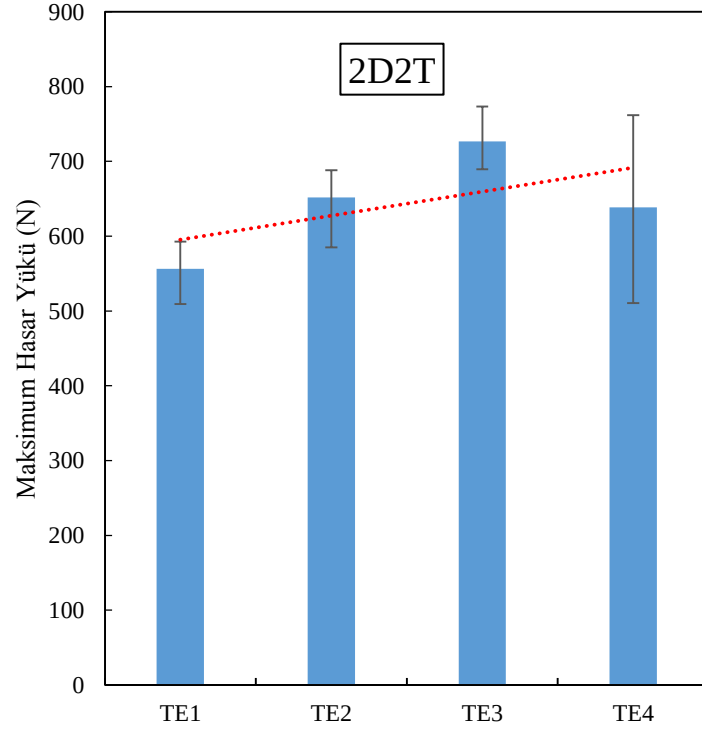
Çentikliler		DD			
		UD			
TE1					
TE2					
TE3					
TE4					
ÇE2M1.5					
ÇE2M2					
Çift Pim Bağlantılı			ÇE2M2.5		

6.1.2. Tek Pim Bağlantılı Numuneler

Şekil 6.3'te 2D2T dizilimli numuneler için kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.3. 2D2T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D = 1$), b) TE2 ($E/D = 2$), c) TE3 ($E/D = 3$) ve d) TE4 ($E/D = 4$)



Şekil 6.4. Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi

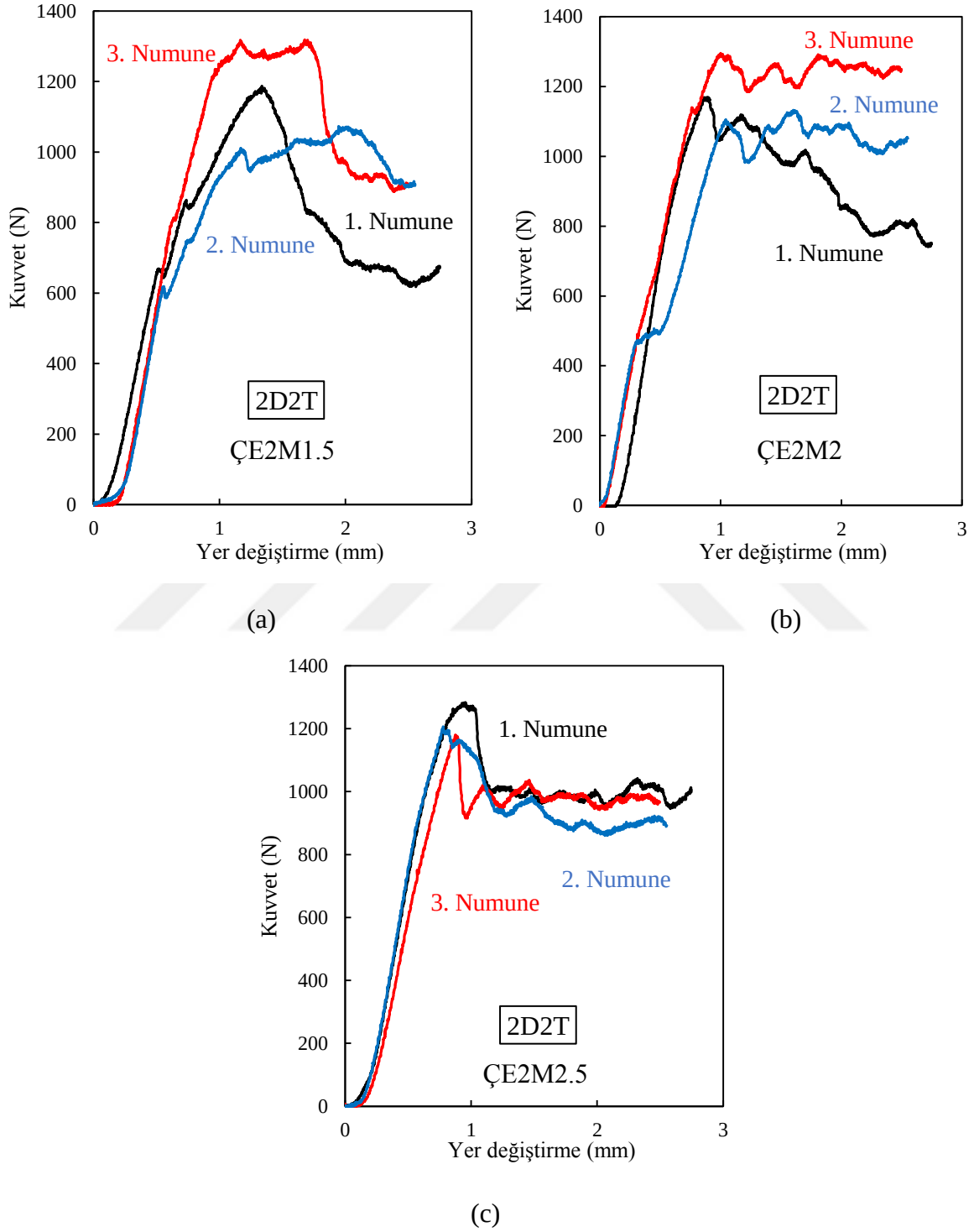
Şekil 6.4'te hasar yüklerinin E/D değerleri ile değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde numunelerin maksimum hasar yüklerinin artan E/D değerine bağlı olarak kısmen artış gösterdiği görülmektedir. Tek pim bağlantılı levhaların çekme deneyleri sonucunda en düşük hasar yükünün $E/D=1$ değeri için 509 N olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.3'te yer alan grafiklerde yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın sabit bir noktaya kadar düştüğü ve ardından yaklaşık olarak sabit bir biçimde ilerlediği görülmektedir. Bu grafikler $E/D=2, 3$ ve 4 değerleri için elde edilmiştir. $E/D=1$ grafiğinde ise yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın düzenli olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu numunede kesilme hasarına neden olmuştur (Tablo 6.2). Deney sonrasında kompozit numuneler incelendiğinde ezilme tipi hasarın meydana geldiği, pimin bağlandığı delik yüzeyindeki matrisi kırarak fiberleri ezdiği görülmüştür. $E/D>1$ için numunelerin tamamında ezilme hasarı ortaya çıkmış olup (Tablo 6.1), $E/D>1$ parametresindeki değişimin, hasar yükü üzerine etkisinin kısıtlı olduğu görülmektedir. Turan [46], $[0]_4$ için E/D parametresinin artışının tek yönlü takviyeli kompozit hasarını arttırdığını ve hasarın kesme tipinde gözlemlendiğini ancak $[0/90]_8$ kullanıldığında ise E/D parametresinin değişiminin hasarı etkilemediğini ve hasarın ezilme tipinde ortaya çıktığını göstermiştir.

Tablo 6.2. Çekme deneyi sonrası 2D4T numunelerde oluşan hasar resimleri

Çentikliler	Tek Pim Bağlantılı	Çift Pim Bağlantılı	YD			
			DD			
			UD			
			TE1			
			TE2			
			TE3			
			TE4			
			ÇE2M1.5			
			ÇE2M2			
			ÇE2M2.5			

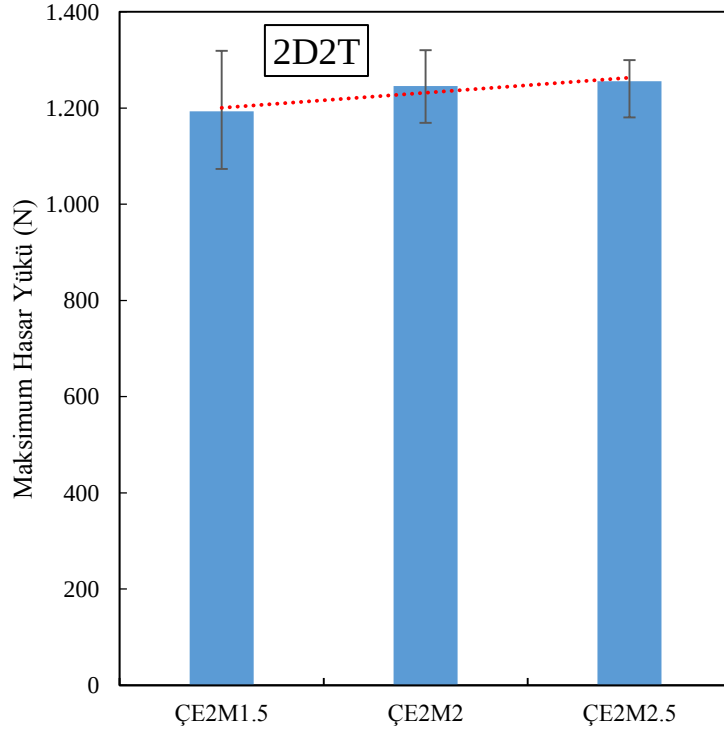
6.1.3. Çift Pim Bağlantılı Numuneler

Şekil 6.5’de 2D2T dizilimli numuneler için farklı M/D oranlarında çift pim bağlantılı levhalarda kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.5. $E/D = 2$ için 2D2T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5

($M/D = 1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D = 2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D = 2.5$)



Şekil 6.6. Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi

Şekil 6.6’da maksimum hasar yüklerinin sabit $E/D = 2$ değerine karşılık olarak M/D değerine göre değişimi görülmektedir. Çift pim delikli kompozit numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük hasar yükünün 1190 N ile $M/D = 1.5$ olan levhada, en yüksek hasar yükünün ise 1318 N ile $M/D = 2.5$ olan levhada görüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 6.5’te yer alan grafiklerde $M/D > 1.5$ için yüklerin en yüksek değere ulaştıktan sonra düştüğü ve sabit bir değerle ilerlediği görülmüştür. Bu sonuç numunelerde ezilme tipi hasarın meydana geldiğini göstermektedir. $M/D = 1.5$ parametresine ait grafik incelendiğinde hasar yüklerinin en büyük değeri aldıktan sonra az bir düşüşle artan uzama değerine karşın yaklaşık sabit bir değerle bir süre kaldıktan sonra tekrar düşmeye başlayarak devam ettiği görülmektedir. Bu durum levhanın serbest kenarına uzak olan delikteki hasarın diğer deliğe ulaştığını, artık yükün sadece levha kenarına yakın delik tarafından taşındığını göstermektedir (Tablo 6.2). İlk hasarın serbest kenarlara daha uzak olan pim deliğinde başlaması bu tür grafiklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çift pim delikli numunelerin diğerlerinde ise ($M/D > 1.5$) her iki pimde de aynı anda hasarlar ortaya çıkmaya başlamıştır (Şekil 6.5). Numunelerde delik etrafında gözlenen ezilme hasarı, $M/D > 1.5$ parametresindeki değişimin, hasar yükleri üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ancak az da olsa bir artışı

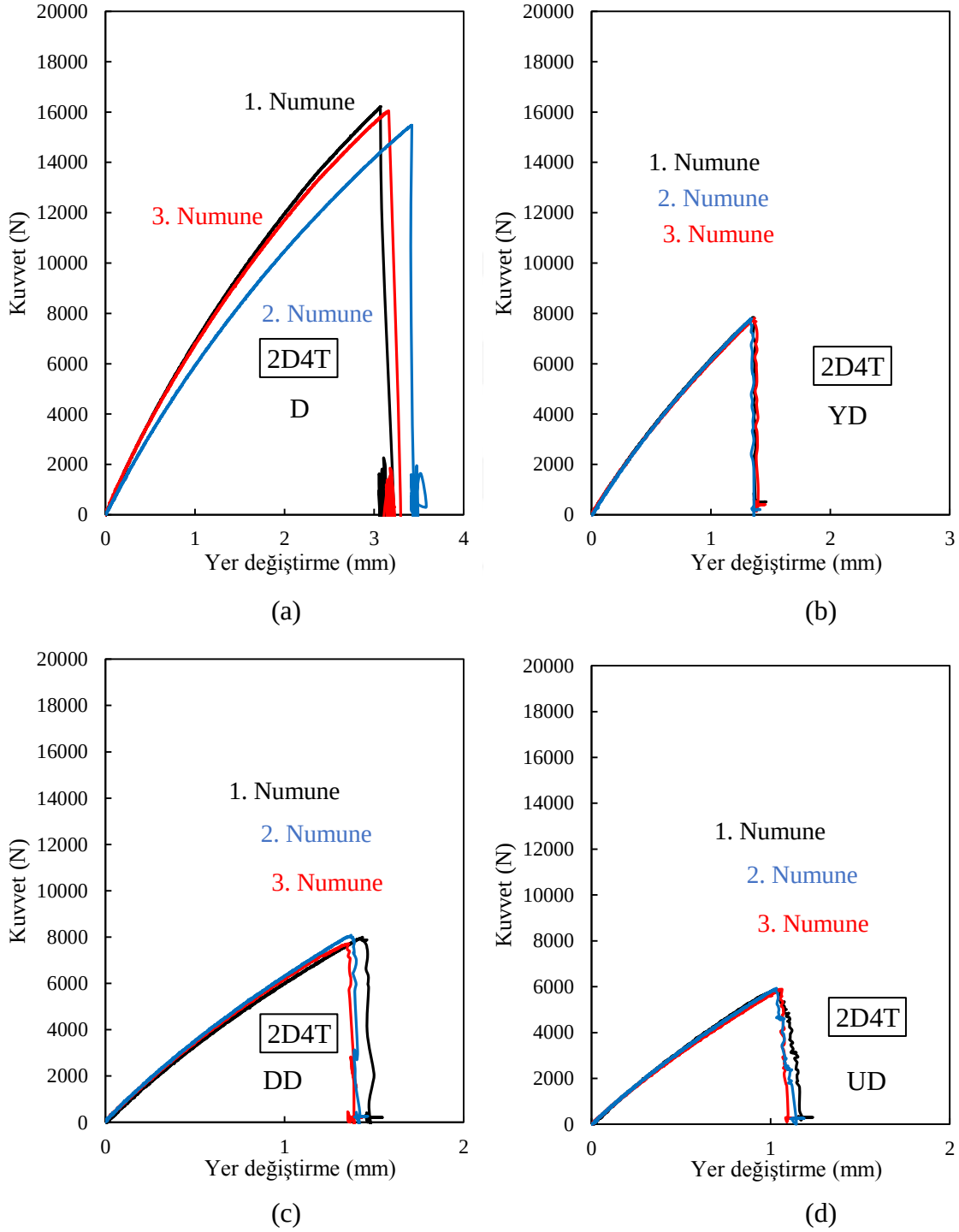
meydana getirdiği gözlenmektedir. Çift pim delikli numunelerde yapılan deneyler sonucunda $M/D > 1.5$ için her iki delik etrafında ezilme hasarının ortaya çıktığı gözlenmiştir (Tablo 6.1).



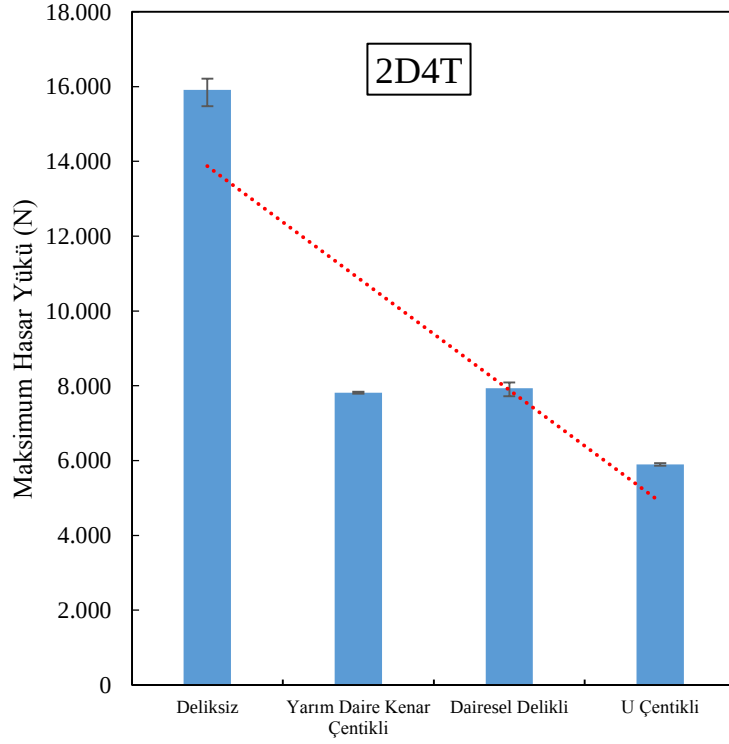
6.2. 2D Dört Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları

6.2.1. Çentikli Numuneler

Şekil 6.7’de 2D4T tabaka dizilimli numuneler için kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.7. 2D4T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)



Şekil 6.8. Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi

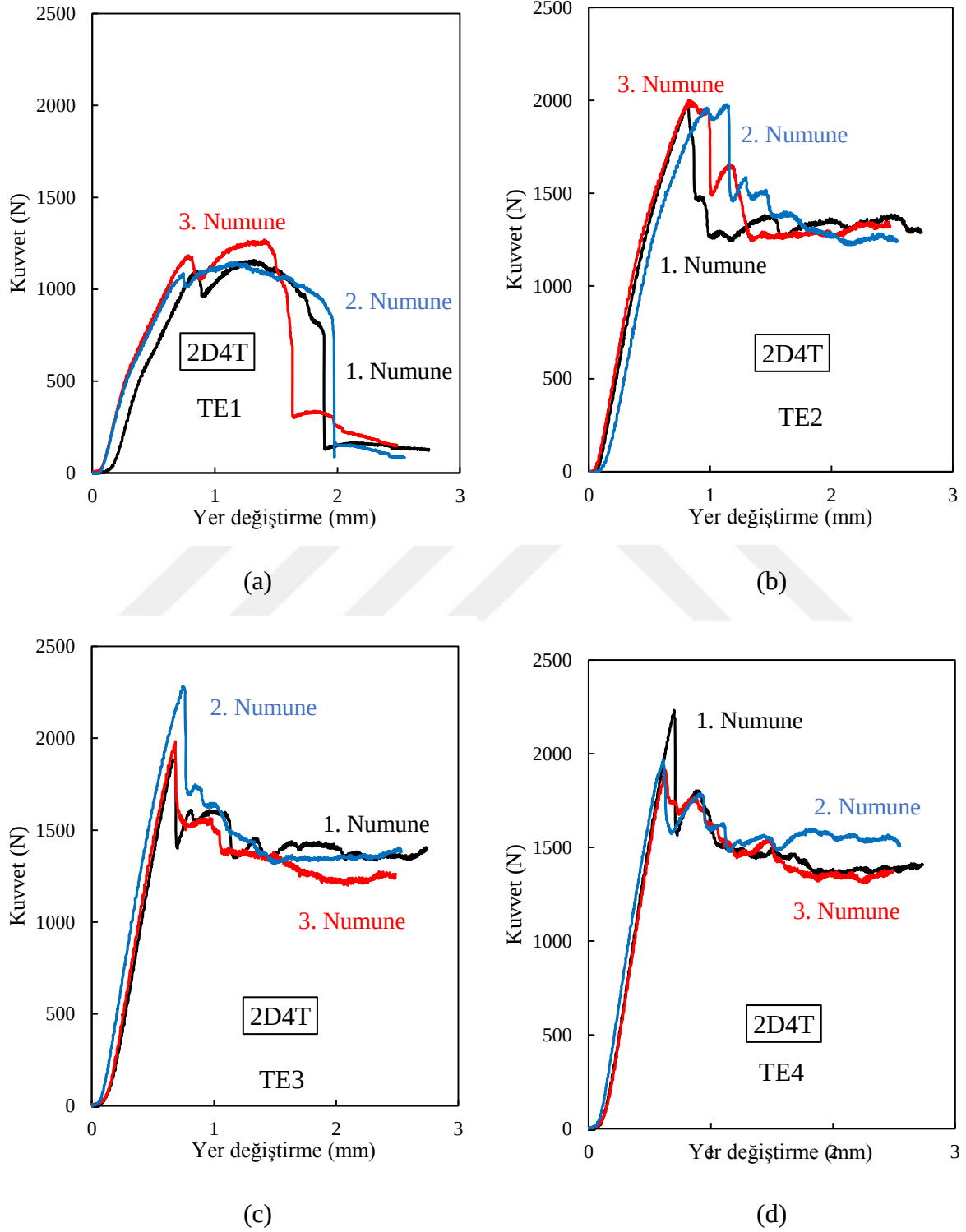
Şekil 6.8’de deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 6.8’de görüldüğü üzere deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde en düşük hasar yükü 5861 N değeri ile U çentikli kompozit numune kullanılan deneyde gözlenirken, en yüksek hasar yükü ise 16214 N değeri ile deliksiz kompozit numune kullanılan deneyde gözlenmiştir. Şekil 6.8’de hasar eğrisi giderek azalacak biçimde kompozit numuneler sıralanmıştır. Şekil 6.7’de yer alan grafiklerde maksimum yük değerine ulaştıktan sonra düştüğü görülmektedir. Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinden dolayı, kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin başlangıç bölgesinde doğrusal bir artış gözlenmektedir. Tablo 6.2’deki hasar resimlerinde görüldüğü gibi çentikli numunelerin tümünde yırtılma (fiber çekme) hasarı oluşmuştur. U çentikli kompozit numunenin asimetrik bir yapı göstermesi nedeniyle yükleme esnasında çekme yükünün yanı sıra aynı zamanda eğilme momenti etkisi olduğu da görülmektedir. Bu durum en düşük hasar yükünün U çentikli numunelerde ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yarım daire kenar çentikli numuneler ile dairesel delikli numunelerin hasar yüklerinin benzer düzeyde olduğu ancak çentikli numunelerin dairesel delikli numunelere oranla daha düşük hasar yükü değerine sahip olduğu görülmüştür. Yarım daire kenar çentikli numunelerin hasar yükü değerinin, dairesel delikli

numunelerin hasar yükü değerinden %2 küçüktür. Deneyde dikkat çeken bir diğer sonuç ise 2D4T numunesine ait maksimum hasar yükünün 2D2T numunesine göre daha yüksek düzeyde olduğudur.

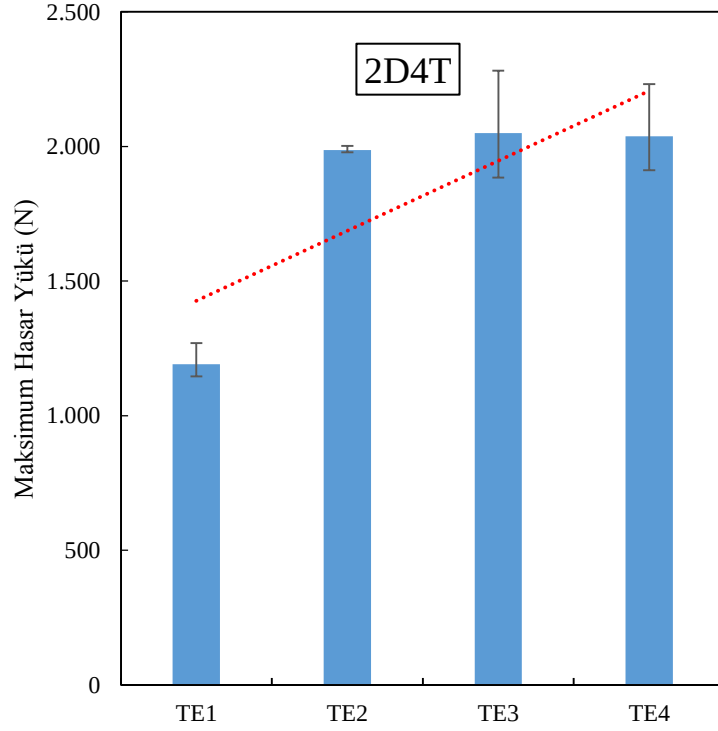


6.2.2. Tek Pim Bağlantılı Numuneler

Şekil 6.9’da 2D4T tabaka dizimli numuneler için E/D ’nin değişimine göre kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.9. 2D4T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$)



Şekil 6.10. Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi

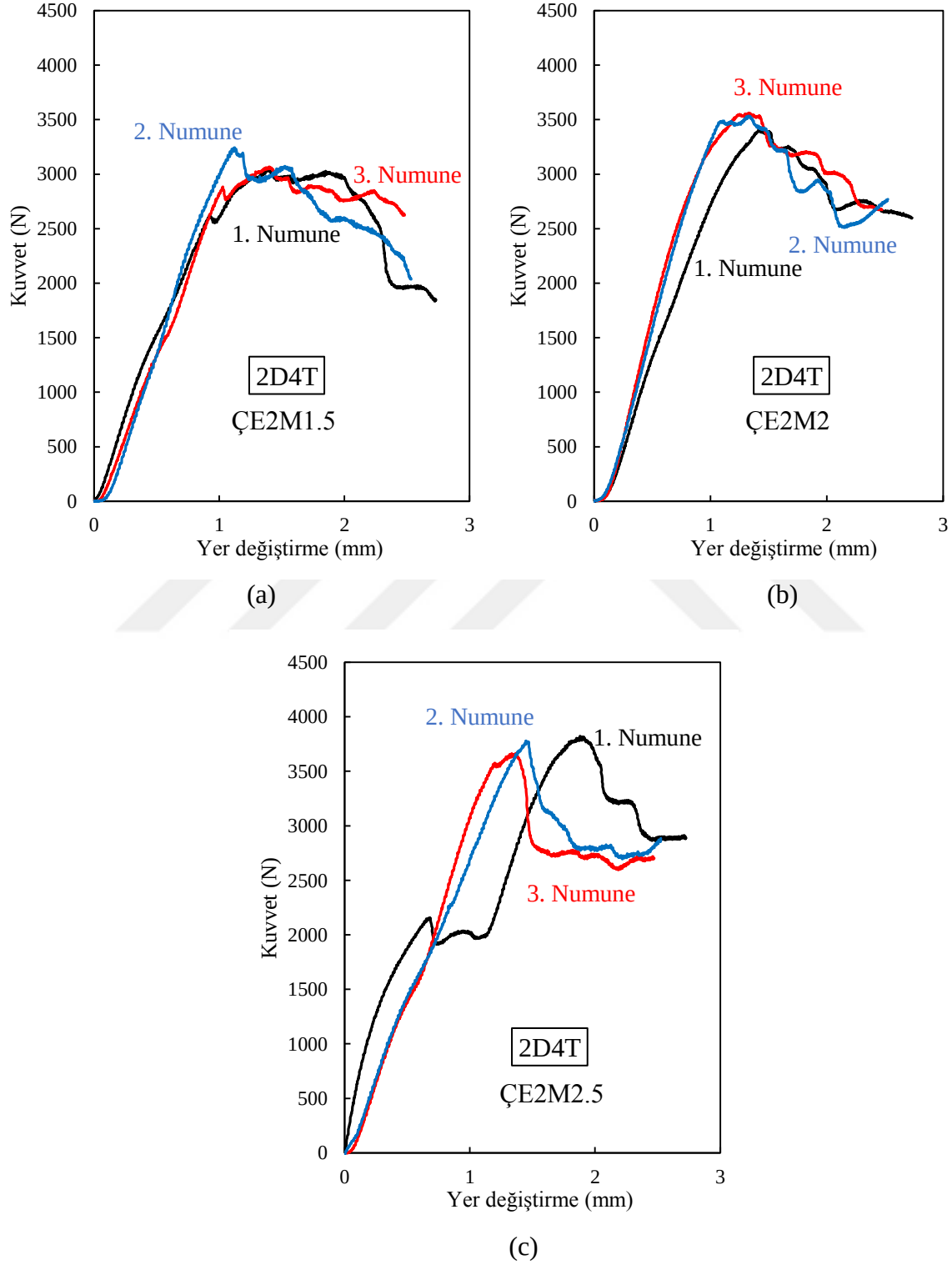
Şekil 6.10’da hasar yüklerinin E/D değerleri ile değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde numunelerin maksimum hasar yüklerinin artan E/D değerine bağlı olarak kısmen artış gösterdiği görülmektedir. Tek pim bağlantılı levhaların çekme deneyleri sonucunda en düşük hasar yükünün $E/D=1$ değeri için 1168 N iken, en yüksek hasar yükünün ise $E/D=4$ değeri için 2031 N olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.9’da yer alan grafiklerde yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın sabit bir noktaya kadar düştüğü ve ardından yaklaşık olarak sabit bir biçimde ilerlediği görülmektedir. Bu grafikler $E/D=2, 3$ ve 4 değerleri için elde edilmiştir. $E/D=1$ grafiğinde ise yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın düzenli olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Bağlandığı deliği ezen pim, levhanın kısa kenarına doğru sabit bir genişlik değerine sahip parçayı sürüklemektedir. Deney sonrasında kompozit numuneler incelendiğinde $E/D > 1$ için ezilme tipi hasarının meydana geldiği, pimin bağlandığı delik yüzeyindeki matrisi kırarak fiberleri ezdiği görülmüştür (Tablo 6.2). $E/D > 1$ için numunelerin tamamında ezilme hasarı ortaya çıkmış olup, $E/D > 1$ parametresindeki değişimin, hasar yükü üzerine etkisinin kısıtlı olduğu görülmektedir.

2D4T kompozit numunelerin maksimum hasar yüklerinin tüm E/D parametrelerinde 2D2T kompozit numunelere oranla daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

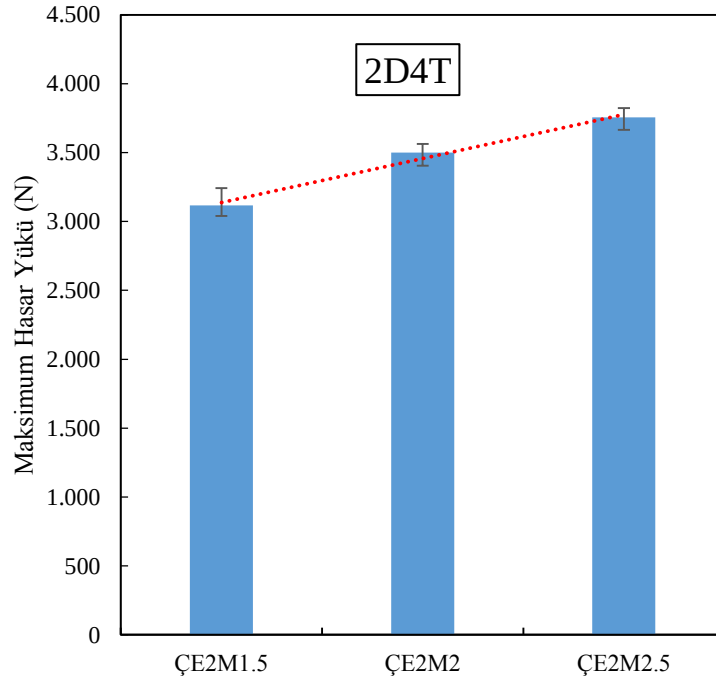


6.2.3. Çift Pim Bağlantılı Numunelere ait Çekme Deneyi Sonuçları

Şekil 6.11’de 2D4T tabaka dizimli numuneler için M/D ’nin değişimine göre kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.11. $E/D = 2$ için 2D4T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5 ($M/D = 1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D = 2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D = 2.5$)



Şekil 6.12. Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi

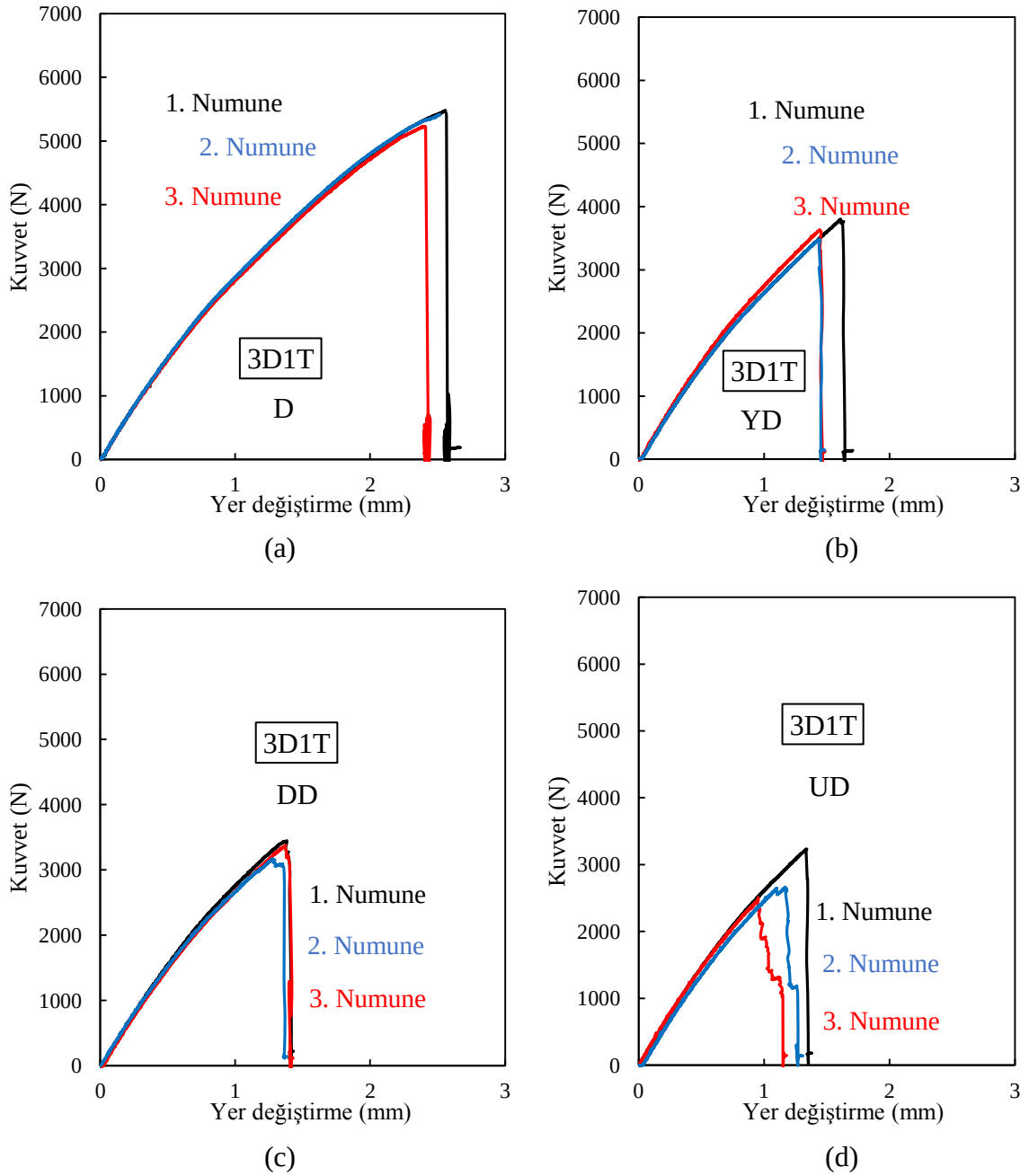
Şekil 6.12’de maksimum hasar yüklerinin sabit E/D değerine karşılık olarak M/D değerine göre değişimi görülmektedir. Çift pim delikli kompozit numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük hasar yükünün 3040 N ile $M/D=1.5$ olan levhada, en yüksek hasar yükünün ise 3822 N ile $M/D=2.5$ olan levhada görüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 6.11’de yer alan grafiklerde yüklerin en yüksek değere ulaştıktan sonra düştüğü ve sabit bir değerle ilerlemeye yönlendiği ($M/D>1.5$) görülmüştür. $M/D=1.5$ parametresine ait grafik incelendiğinde hasar yüklerinin en büyük değeri aldıktan sonra az bir düşüşle artan uzama değerine karşın yaklaşık sabit bir değerde bir süre kaldıktan sonra tekrar düşmeye başladığı görülmektedir. Bu durum levhanın serbest kenarına uzak olan delikteki hasarın diğer deliğe ulaştığını (kesme hasarı), artık yükün sadece levha kenarına yakın delik tarafından taşındığını göstermektedir. İlk hasarın serbest kenarlara daha uzak olan pim deliğinde başlaması bu tür grafiklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır (Tablo 6.2). $M/D>1.5$ için çift pim delikli numunelerin tümünde her iki pimde de aynı anda hasarlar ortaya çıkmaya başlamıştır (Şekil 6.11). $M/D>1.5$ parametresindeki değişimin, numunelerde delik etrafında ezilme hasarının, gözlenmesine ve bu değişimin hasar yükleri üzerindeki etkisinin sınırlı olmasına, ayrıca az da olsa bir artışı meydana getirmesine sebep olmuştur. 2D4T çift pim

delikli kompozit numunelerin maksimum hasar yüklerinin 2D2T kompozitlere oranla daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

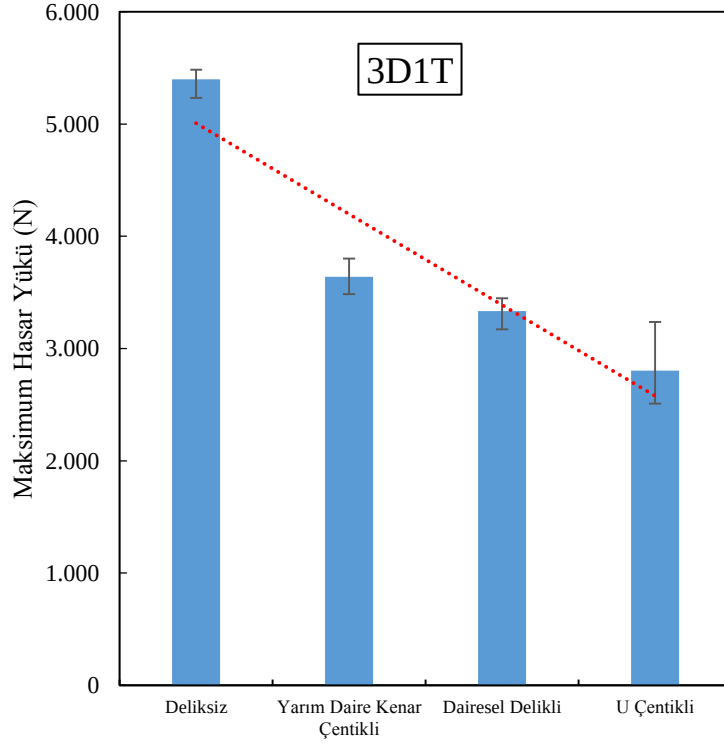
6.3. 3D Tek Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları ve Hasar Tipleri

6.3.1. Çentikli Numuneler

Şekil 6.13'te 3D1T tabaka dizilimli çentikli kompozitler için kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.13. 3D1T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)



Şekil 6.14. Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi

Şekil 6.14'te görüldüğü üzere deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesele delikli ve U çentikli numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde en düşük hasar yükü 2935 N değeri ile U çentikli kompozit numune kullanılan deneyde gözlenirken, en yüksek hasar yükü ise 5480 N değeri ile deliksiz kompozit numune kullanılan deneyde gözlenmiştir. Şekil 6.14'te hasar eğrisi giderek azalacak biçimde kompozit numuneler sıralanmıştır. Şekil 6.13'te yer alan grafiklerde maksimum yük değerine ulaştıktan sonra düştüğü görülmektedir. Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinden dolayı, kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin başlangıç bölgesinde doğrusal bir artış gözlenmektedir. Tablo 6.3'teki hasar resimlerinde görüldüğü gibi numunelerin tümünde yırtılma (fiber çekme) hasarı oluşmuştur. Ancak hasar bölgesinin 2D2T ve 2D4T dizilimli kompozitlerin aksine daha bir geniş alana yayılarak gerçekleştiği görülmüştür. U çentikli kompozit numunenin asimetrik bir yapı göstermesi nedeniyle yükleme esnasında çekme yükünün yanı sıra aynı zamanda eğilme momenti etkisi olduğu da görülmektedir. Bu durum en düşük hasar yükünün U çentikli numunelerde ortaya çıkmasına neden olmuştur. Yarım daire kenar çentikli numuneler ile dairesele delikli numunelerin hasar yüklerinin benzer düzeyde olduğu ancak çentikli numunelerin dairesele delikli numunelere oranla daha yüksek hasar yükü değerine sahip olduğu görülmüştür. Yarım daire kenar çentikli numunelerin hasar yükü değerinin, dairesele delikli numunelerin hasar

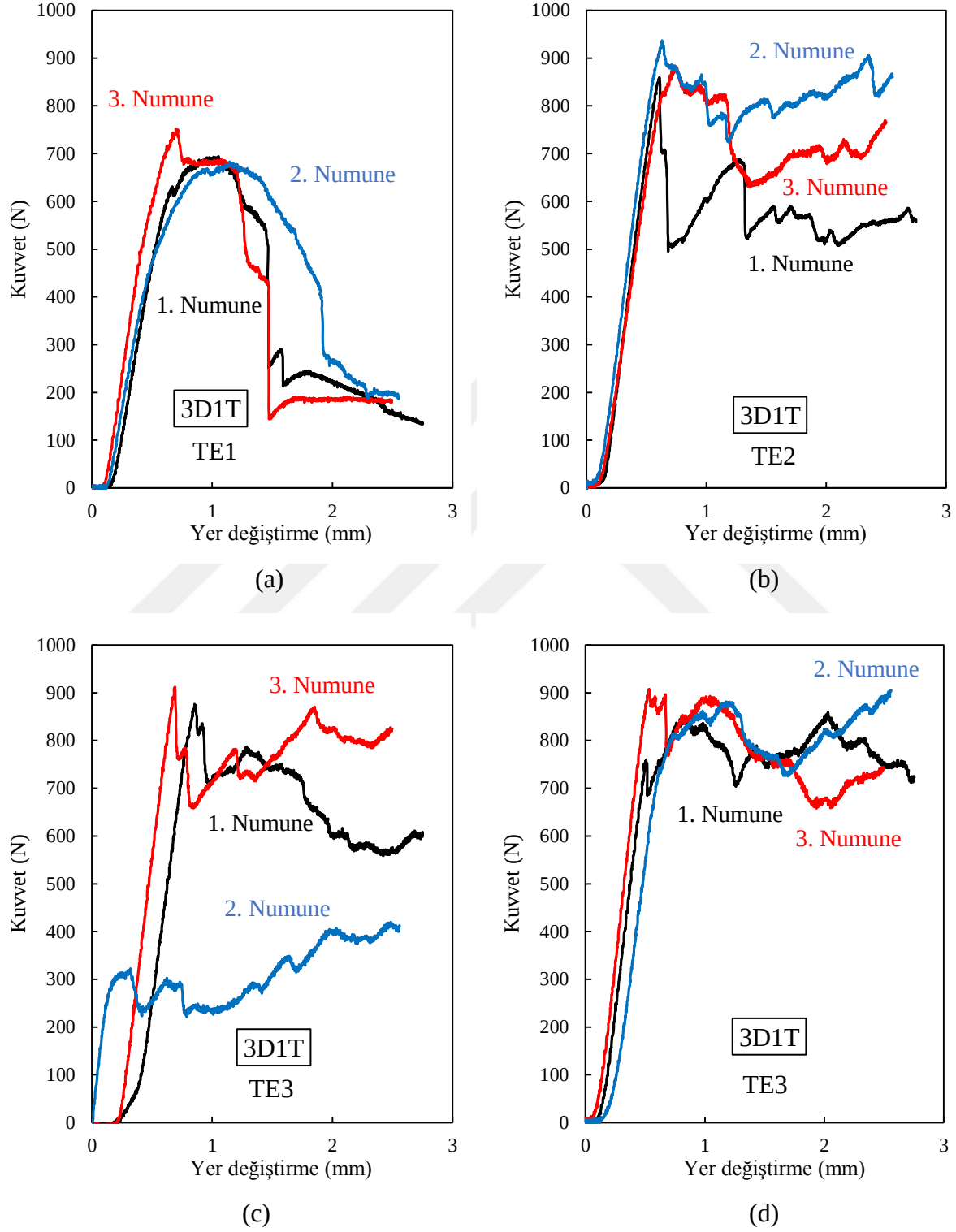
yükü değerinden %9 büyüktür. Deneyde dikkat çeken bir diğer sonuç ise 3D1T numunesine ait maksimum hasar yükünün 2D2T ve 2D4T numunelerine göre daha düşük düzeyde olduğudur.

Tablo 6.3. Çekme deneyi sonrası 3D1T numunelerde oluşan hasar resimleri

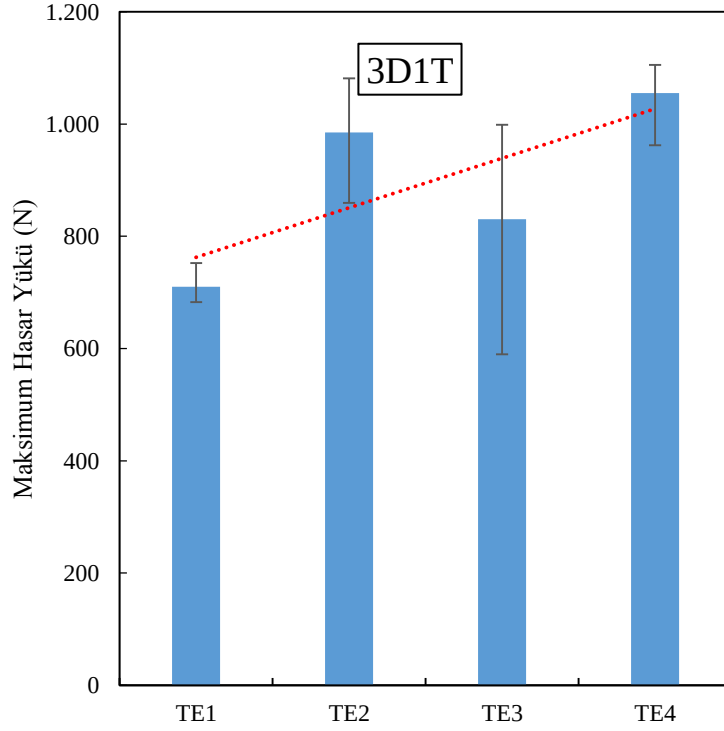
Çentikliler	YD			
	DD			
	UD			
Tek Pim Bağlantılı	TE1			
	TE2			
	TE3			
	TE4			
Çift Pim Bağlantılı	ÇE2M1.5			
	ÇE2M2			
	ÇE2M2.5			

6.3.2. Tek Pim Bağlantılı Numuneler

Şekil 6.15'te 3D1T tek pim bağlantılı kompozitler için kuvvet-yer değiştirme grafikleri ve Şekil 6.16'da hasar yüklerinin E/D değerleri ile değişimi verilmiştir.



Şekil 6.15. 3D1T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$)



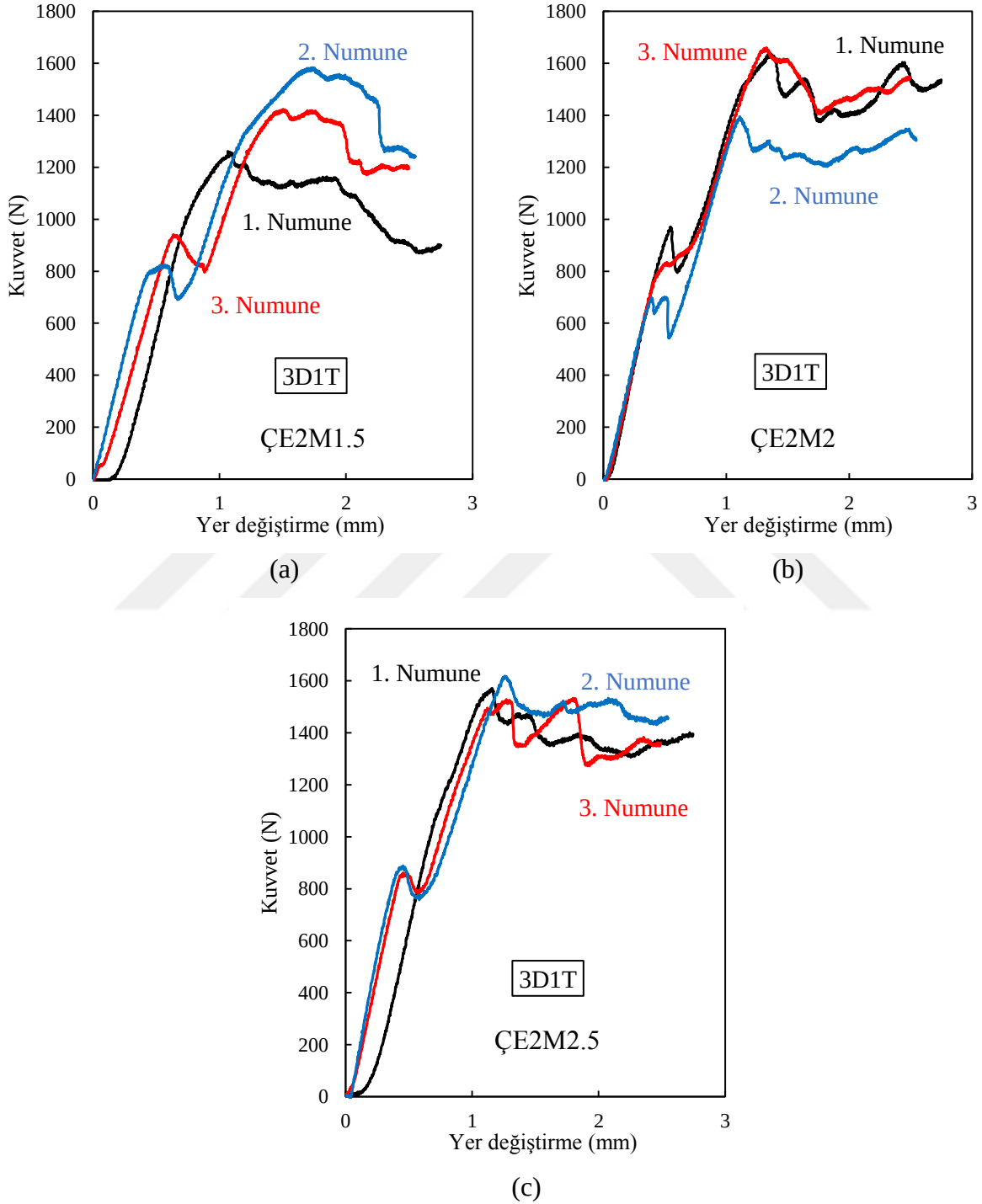
Şekil 6.16. Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi

Grafik incelendiğinde numunelerin maksimum hasar yüklerinin artan E/D değerine bağlı olarak kısmen artış gösterdiği görülmektedir. Tek pim bağlantılı levhaların çekme deneyleri sonucunda en düşük hasar yükünün $E/D=1$ değeri için 694 N iken, en yüksek hasar yükünün ise $E/D=4$ değeri için 1162 N olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.15'te yer alan grafiklerde yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın sabit bir noktaya kadar düştüğü ve ardından yaklaşık olarak sabit bir biçimde ilerlediği görülmektedir. Bu grafikler $E/D=2, 3$ ve 4 değerleri için elde edilmiştir. $E/D=1$ grafiğinde ise yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın düzenli olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Bağlandığı deliği ezen pim, levhanın kısa kenarına doğru sabit bir genişlik değerine sahip parçayı sürüklemektedir. Deney sonrasında kompozit numuneler incelendiğinde $E/D > 1$ ezilme tipi hasarın meydana geldiği, pimin bağlandığı delik yüzeyindeki matrisi kırarak fiberleri ezdiği görülmüştür. $E/D > 1$ için numunelerin tamamında ezilme hasarı ortaya çıkmış olup, $E/D > 1$ parametresindeki değişimin, hasar yükü üzerine etkisinin kısıtlı olduğu görülmektedir.

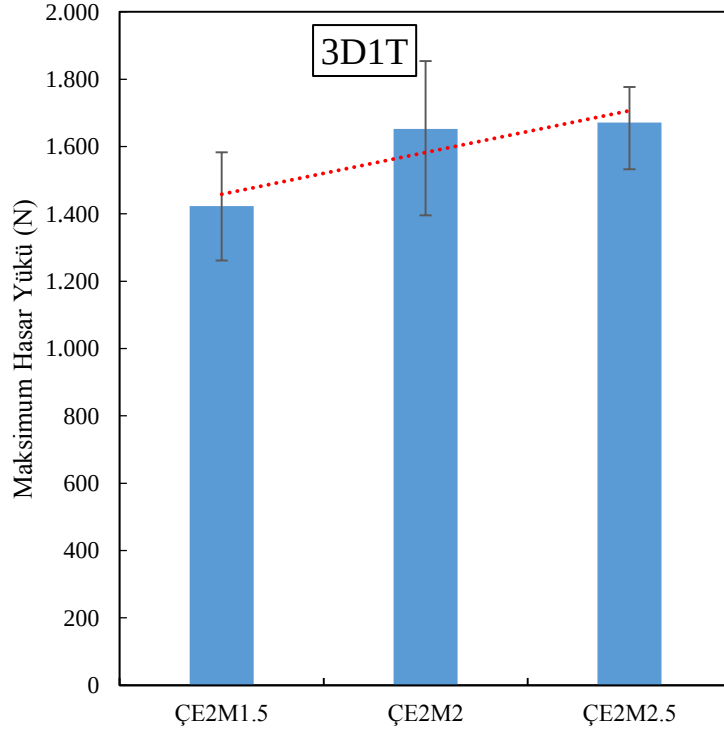
3D1T kompozit numunelerin maksimum hasar yüklerinin tüm E/D parametrelerinde 2D4T kompozit numunelere oranla daha düşük, 2D2T kompozit numunelere oranla ise daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

6.3.3. Çift Pim Bağlantılı Numunelere ait Çekme Deneyi Sonuçları

Şekil 6.17’de 3D1T numunelerin çift pim bağlantısı altında kuvvet-yer değiştirme grafikleri, Şekil 6.18’de maksimum hasar yüklerinin sabit E/D değerine karşılık olarak M/D değerine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 6.17. $E/D = 2$ için 3D1T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5 ($M/D = 1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D = 2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D = 2.5$)



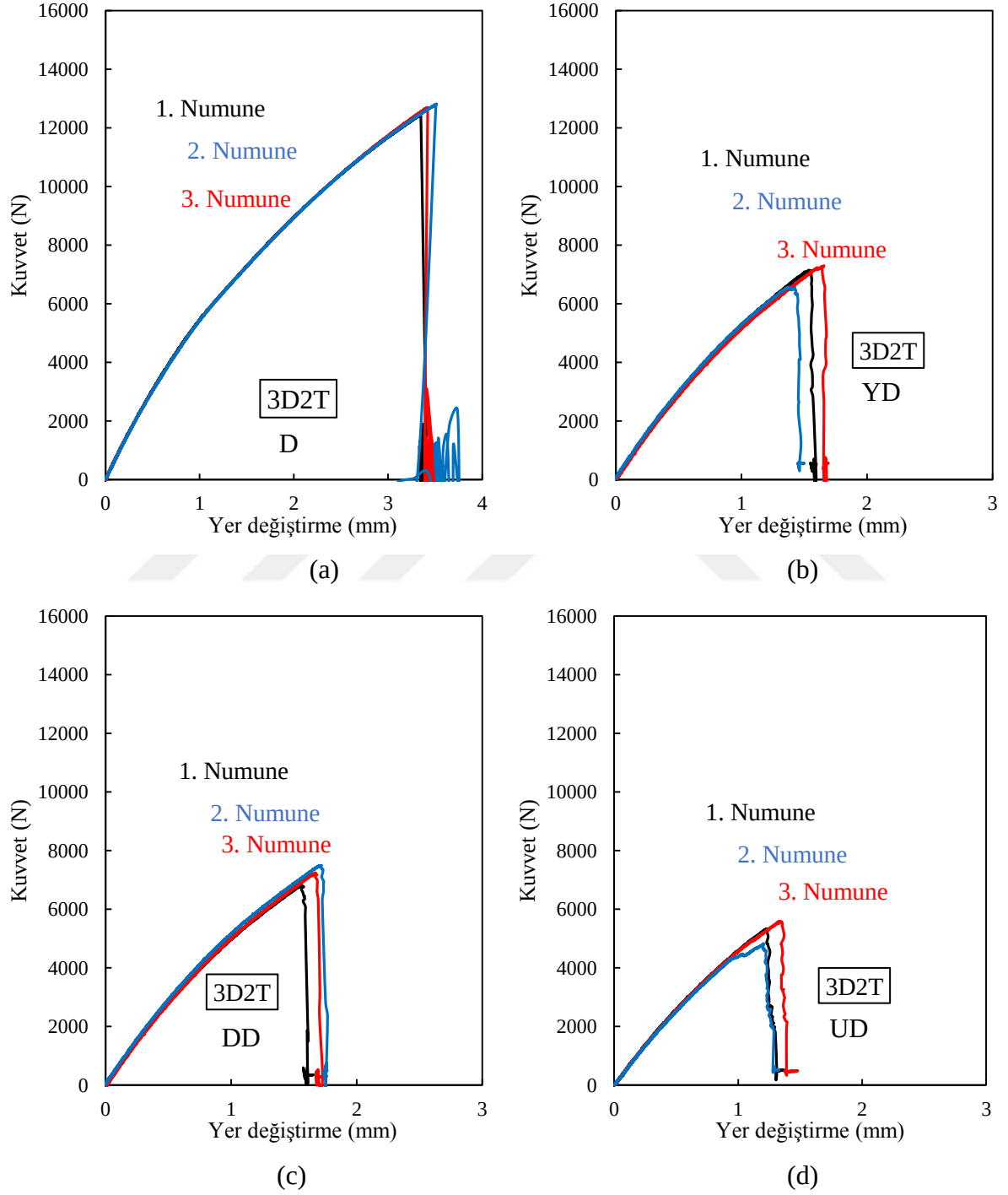
Şekil 6.18. Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi

Çift pim delikli kompozit numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük hasar yükünün 1461 N ile $M/D = 1.5$ olan levhada, en yüksek hasar yükünün ise 1704 N ile $M/D = 2.5$ olan levhada görüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 6.17’de yer alan grafiklerde $M/D > 1.5$ yüklerin en yüksek değere ulaştıktan sonra düştüğü ve sabit bir değerle ilerlediği görülmüştür. Bu sonuç numunelerde ezilme tipi hasarın meydana geldiğini göstermektedir. $M/D = 1.5$ parametresine ait grafik incelendiğinde hasar yüklerinin en büyük değeri aldıktan sonra az bir düşüşle artan uzama değerine karşın yaklaşık sabit bir değerde bir süre kaldıktan sonra tekrar düşmeye başladığı görülmektedir. Bu durum levhanın serbest kenarına uzak olan delikteki hasarın diğer deliğe ulaştığını, artık yükün sadece levha kenarına yakın delik tarafından taşındığını göstermektedir. $M/D > 1.5$ için çift pim delikli numunelerin tümünde her iki pimde de aynı anda hasarlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Numunelerde delik etrafında gözlenen ezilme hasarı, $M/D > 1.5$ parametresindeki değişimin, hasar yükleri üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ancak az da olsa bir artışı meydana getirdiği gözlenmektedir. 3D1T çift pim delikli kompozit numunelerin maksimum hasar yüklerinin 2D4T kompozitlere oranla daha düşük, 2D2T kompozitlere oranla daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

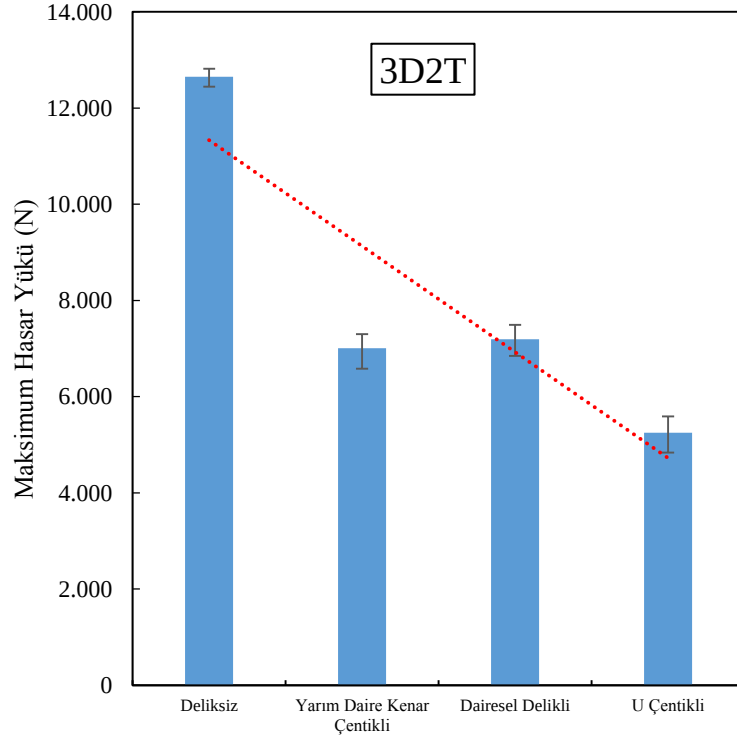
6.4. 3D İki Tabakalı Numuneye ait Çekme Deneyi Sonuçları ve Hasar Tipleri

6.4.1. Çentikli Numuneler

Şekil 6.19’da 3D2T dizilimli çentikli kompozitlerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.19. 3D2T numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)

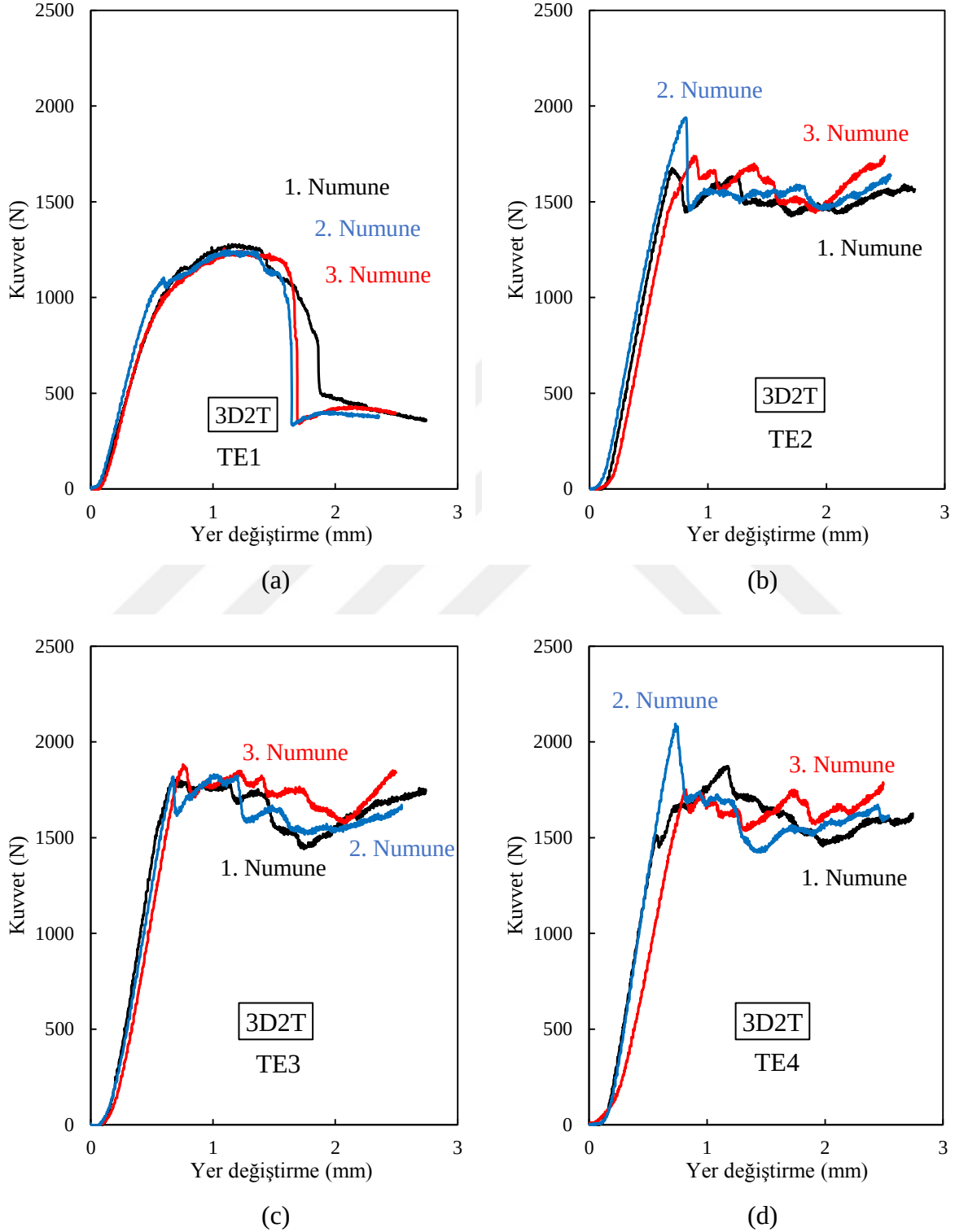


Şekil 6.20. Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi

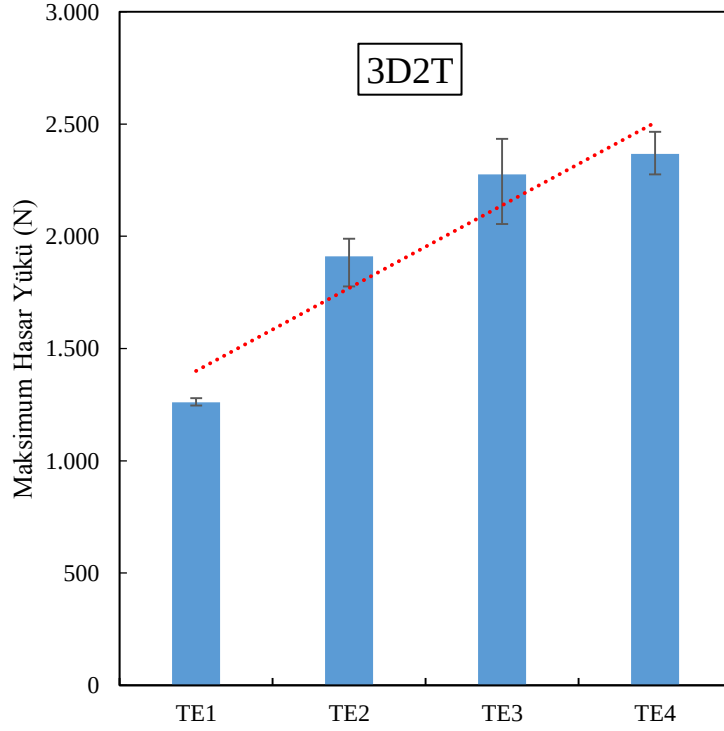
Şekil 6.20’de deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiği verilmiştir. Şekil 6.20’de görüldüğü üzere deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde en düşük hasar yükü 5333 N değeri ile U çentikli kompozit numunelerde kullanılan deneyde gözlenirken, en yüksek hasar yükü ise 12443 N değeri ile deliksiz kompozit numunelerde elde edilmiştir. Şekil 6.20’de hasar eğrisi giderek azalacak biçimde kompozit numuneler sıralanmıştır. Şekil 6.19’da yer alan grafiklerde maksimum yük değerine ulaştıktan sonra düştüğü görülmektedir. Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinden dolayı, kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin başlangıç bölgesinde doğrusal bir artış gözlenmektedir. Tablo 6.1’deki hasar resimlerinde görüldüğü gibi çentikli numunelerin tümünde yırtılma (fiber çekme) hasarı oluşmuştur. Yarım daire kenar çentikli numuneler ile dairesel delikli numunelerin hasar yüklerinin benzer düzeyde olduğu ancak çentikli numunelerin dairesel delikli numunelere oranla daha düşük hasar yükü değerine sahip olduğu görülmüştür. Yarım daire kenar çentikli numunelerin hasar yükü değerinin, dairesel delikli numunelerin hasar yükü değerinden %4.7 küçüktür. Deneyde dikkat çeken bir diğer sonuç ise 3D2T numunesine ait maksimum hasar yükünün 3D1T numunelerine göre daha yüksek düzeyde olduğudur.

6.4.2. Tek Pim Bağlantılı Numuneler

Şekil 6.21’de 3D2T tabakalı tek pim bağlantılı kompozitlerin çekme testi sonucu kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.21. 3D2T tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$)



Şekil 6.22. Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi

Şekil 6.22’de hasar yüklerinin E/D değerleri ile değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde numunelerin maksimum hasar yüklerinin artan E/D değerine bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Tek pim bağlantılı levhaların çekme deneyleri sonucunda en düşük hasar yükünün $E/D=1$ değeri için 1278 N iken, en yüksek hasar yükünün ise $E/D=4$ değeri için 2434 N olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.21’de yer alan grafiklerde yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın sabit bir noktaya kadar düştüğü ve ardından yaklaşık olarak sabit bir biçimde ilerlediği görülmektedir. Bu grafikler $E/D=2, 3$ ve 4 değerleri için elde edilmiştir. $E/D=1$ grafiğinde ise yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın düzenli olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Bu tip numunelerde kesme hasarı meydana gelmektedir. Deney sonrasında kompozit numuneler incelendiğinde $E/D>1$ ezilme tipi hasarın meydana geldiği, pimin bağlandığı delik yüzeyindeki matrisi kırarak fiberleri ezdiği görülmüştür. $E/D>1$ parametresindeki değişimin, hasar tipi üzerine etkisinin kısıtlı olduğu görülmektedir (Tablo 6.4).

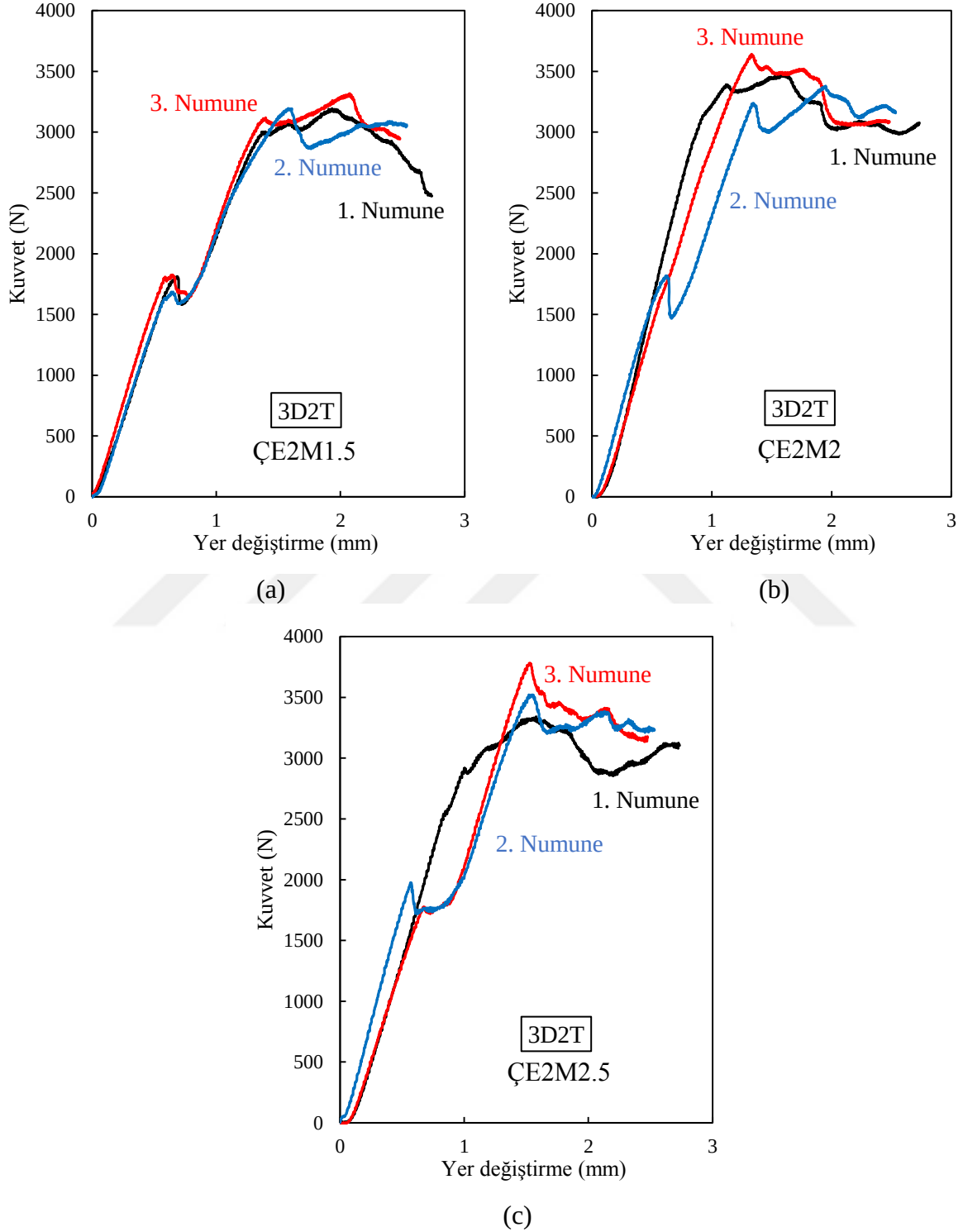
3D2T kompozit numunelerin maksimum hasar yüklerinin tüm E/D parametrelerinde 3D1T kompozit numunelere oranla daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6.4. Çekme deneyi sonrası 3D2T numunelerde oluşan hasar resimleri

Çentikliler	Tek Pim Bağlantılı	Çift Pim Bağlantılı			
YD					
DD					
UD					
TE1					
TE2					
TE3					
TE4					
ÇE2M1.5					
ÇE2M2					
ÇE2M2.5					

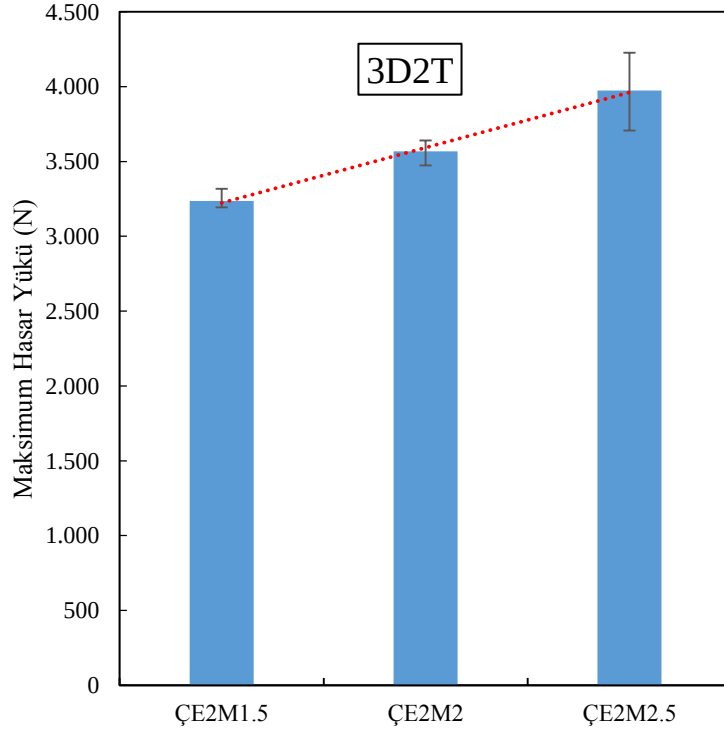
6.4.3. Çift Pim Bağlantılı Numuneler

Şekil 6.23'te 3D2T dizilimli çift pim bağlantılı kompozitlerin çekme test sonucu kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.23. $E/D = 2$ için 3D2T çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) ÇE2M1.5

($M/D = 1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D = 2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D = 2.5$)



Şekil 6.24. Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi

Şekil 6.24'te maksimum hasar yüklerinin sabit E/D değerine karşılık olarak M/D değerine göre değişimi görülmektedir. Çift pim delikli kompozit numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük hasar yükünün 3194 N ile $M/D=1.5$ olan levhada, en yüksek hasar yükünün ise 3707 N ile $M/D=2.5$ olan levhada görüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 6.23'te $M/D > 1.5$ yer alan grafiklerde yüklerin en yüksek değere ulaştıktan sonra düştüğü ve sabit bir değerle ilerlediği görülmüştür. Bu sonuç numunelerde ezilme tipi hasarın meydana geldiğini göstermektedir. $M/D=1.5$ parametresine ait grafik incelendiğinde hasar yüklerinin en büyük değeri aldıktan sonra az bir düşüşle artan uzama değerine karşın yaklaşık sabit bir değerde bir süre kaldıktan sonra tekrar düşüşe geçtiği görülmektedir. Bu durum levhanın serbest kenarına uzak olan delikteki hasarın diğer deliğe ulaştığını, artık yükün sadece levha kenarına yakın delik tarafından taşındığını göstermektedir. İlk hasarın serbest kenarlara daha uzak olan pim deliğinde başlaması bu tür grafiklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çift pim delikli numunelerde $M/D > 1.5$ tümünde her iki pimde de aynı anda hasarlar ortaya çıkmaya başlamıştır. M/D parametresindeki değişimin, hasar yükleri üzerindeki etkisinin sınırlı olduğunu ancak bir artış meydana getirdiği gözlenmektedir. 3D2T

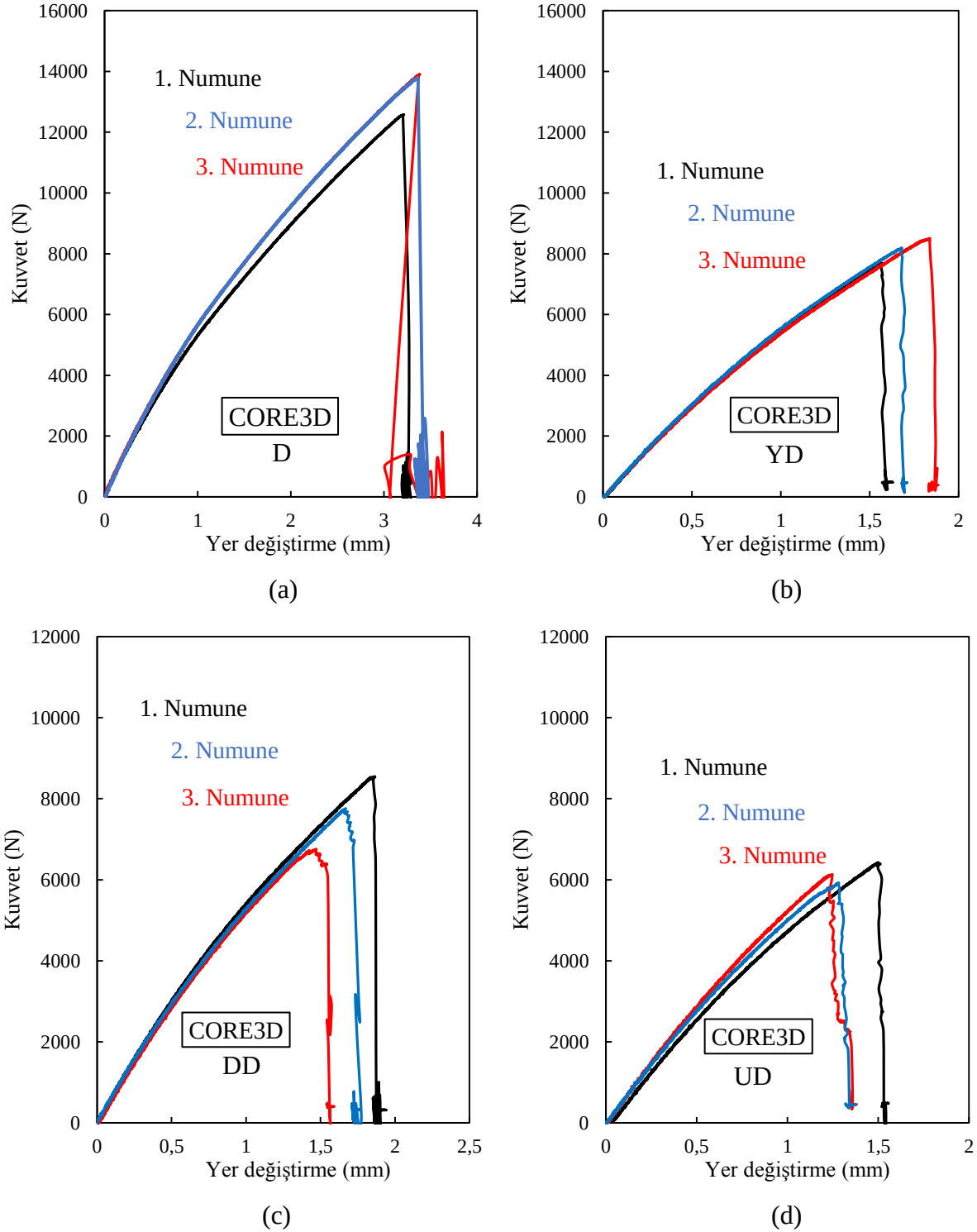
Çift pim delikli kompozit numunelerin maksimum hasar yüklerinin 3D1T kompozitlere oranla daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.



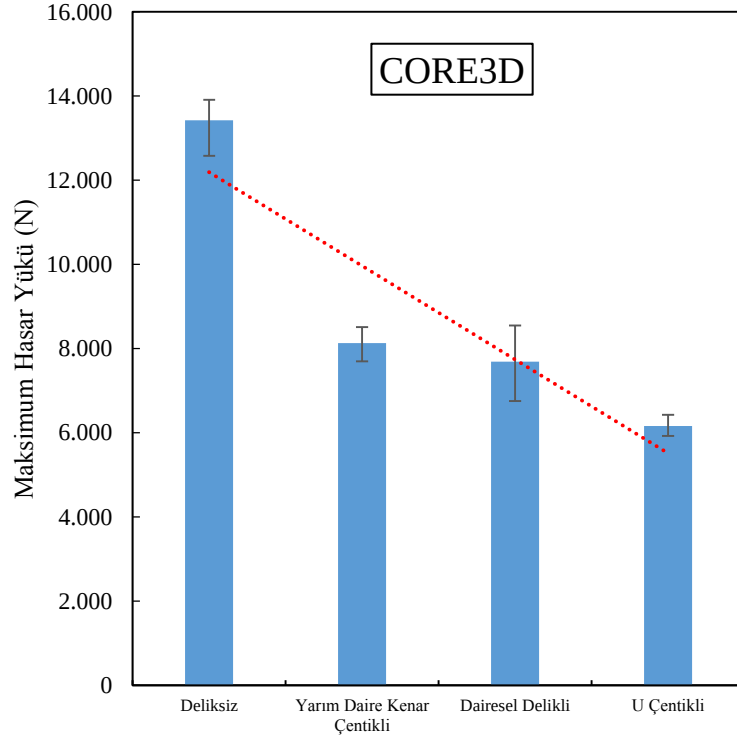
6.5. CORE3D Numunesine ait Çekme Deneyi Sonuçları

6.5.1. Çentikli Numuneler

Şekil 6.25'te CORE3D çentikli numuneler için çekme testi sonucu kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.25. CORE3D numunelere ait çekme testi grafikleri (a) deliksiz (D), (b) yarım daire kenar çentikli (YD), (c) dairesel delikli (DD) ve (d) U çentikli (UD)

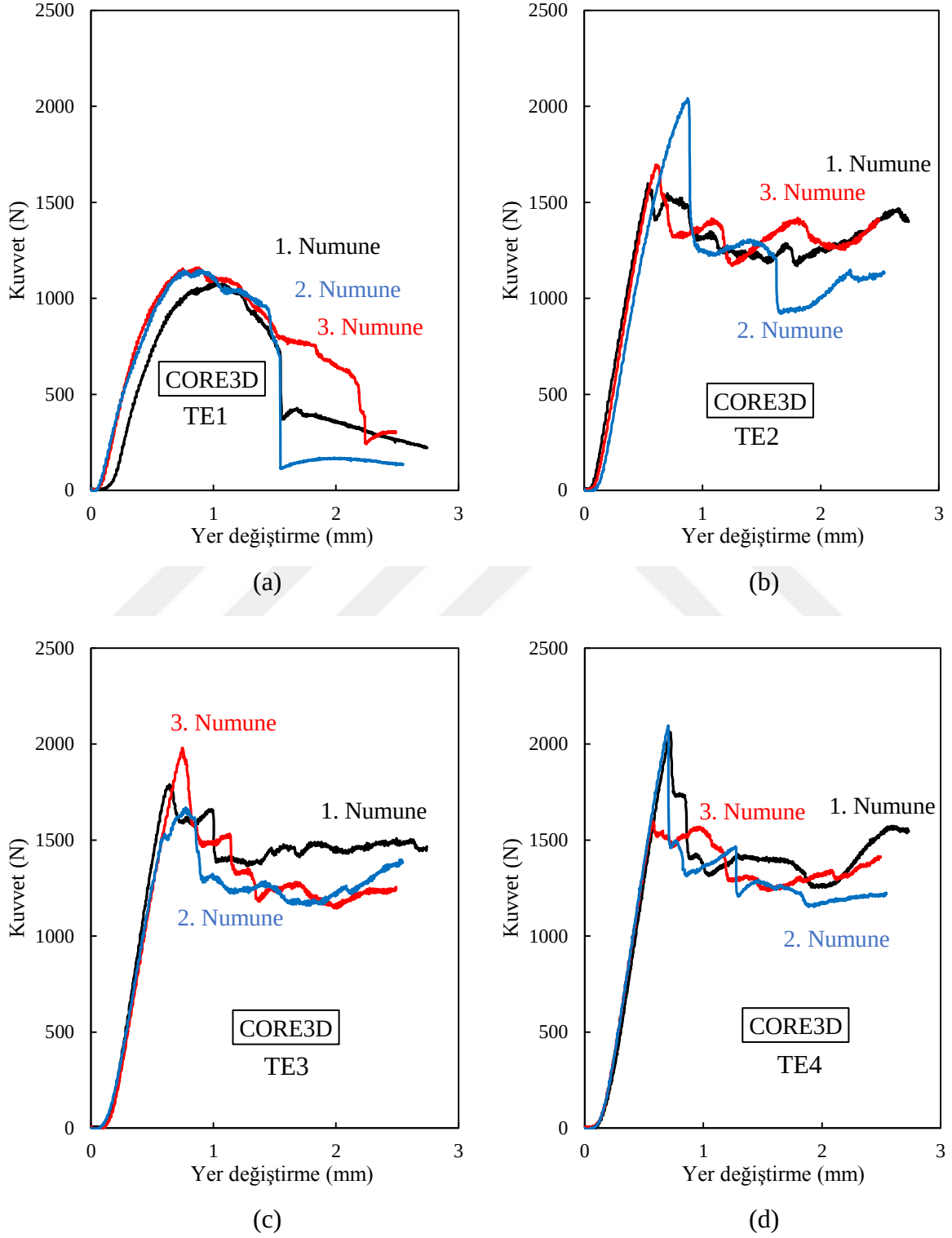


Şekil 6.26. Levhaların maksimum hasar yüklerinin çentik tipine göre değişimi

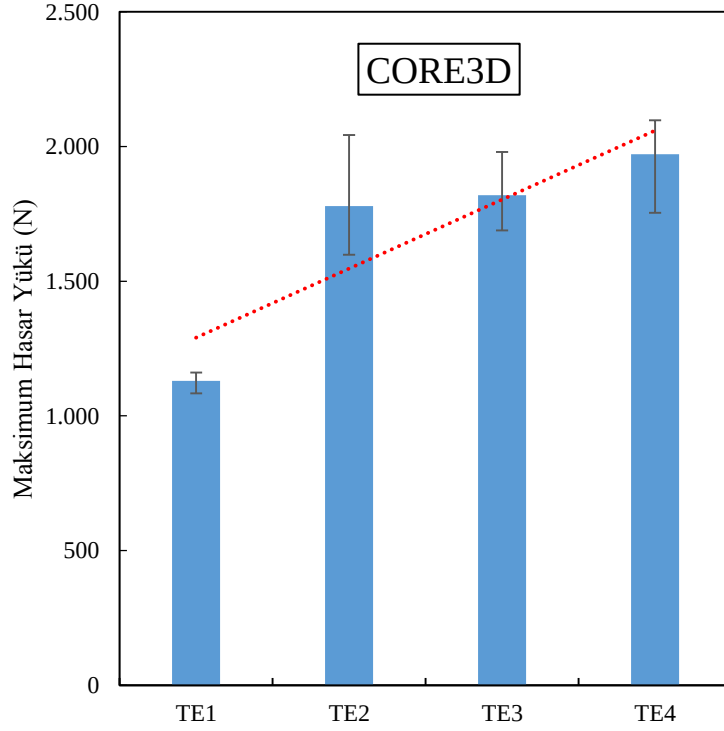
Şekil 6.26’da deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numunelere ait kuvvet-yer değiştirme grafiğı gösterilmiştir. Şekil 6.26’da görüldüğü üzere deliksiz, yarım daire kenar çentikli, dairesel delikli ve U çentikli numuneler kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde en düşük hasar yükü 6423 N değeri ile U çentikli kompozit numune kullanılan deneyde gözlenirken, en yüksek hasar yükü ise 12580 N değeri ile deliksiz kompozit numune kullanılan deneyde gözlenmiştir. Şekil 6.26’da hasar eğrisi giderek azalacak biçimde kompozit numuneler sıralanmıştır. Şekil 6.25’te yer alan grafiklerde maksimum yük değerine ulaştıktan sonra düştüğü görülmektedir. Kompozit numunelerin mekanik özelliklerinden dolayı, kuvvet-yer değiştirme grafiklerinin başlangıç bölgesinde doğrusal bir artış gözlenmektedir. Tablo 6.1’deki hasar resimlerinde görüldüğü gibi numunelerin tümünde yırtılma (fiber çekme) hasarı oluşmuştur. Yarım daire kenar çentikli numuneler ile dairesel delikli numunelerin hasar yüklerinin benzer düzeyde olduğu ancak çentikli numunelerin dairesel delikli numunelere oranla daha yüksek hasar yükü değerine sahip olduğu görülmüştür. Yarım daire kenar çentikli numunelerin hasar yükü değerinin, dairesel delikli numunelerin hasar yükü değerinden %10 yüksektir. Deneyde dikkat çeken bir diğer sonuç ise CORE3D numunesine ait maksimum hasar yükünün 3D2T numunelerine göre daha düşük düzeyde, 3D1T’ye göre ise daha yüksek düzeyde olduğudur.

6.5.2. Tek Pim Bağlantılı Numunelere

Şekil 6.27’de CORE3D tek pim bağlantılı numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 6.27. CORE3D tek pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikleri a) TE1 ($E/D=1$), b) TE2 ($E/D=2$), c) TE3 ($E/D=3$) ve d) TE4 ($E/D=4$)



Şekil 6.28. Tek pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin E/D oranına göre değişimi

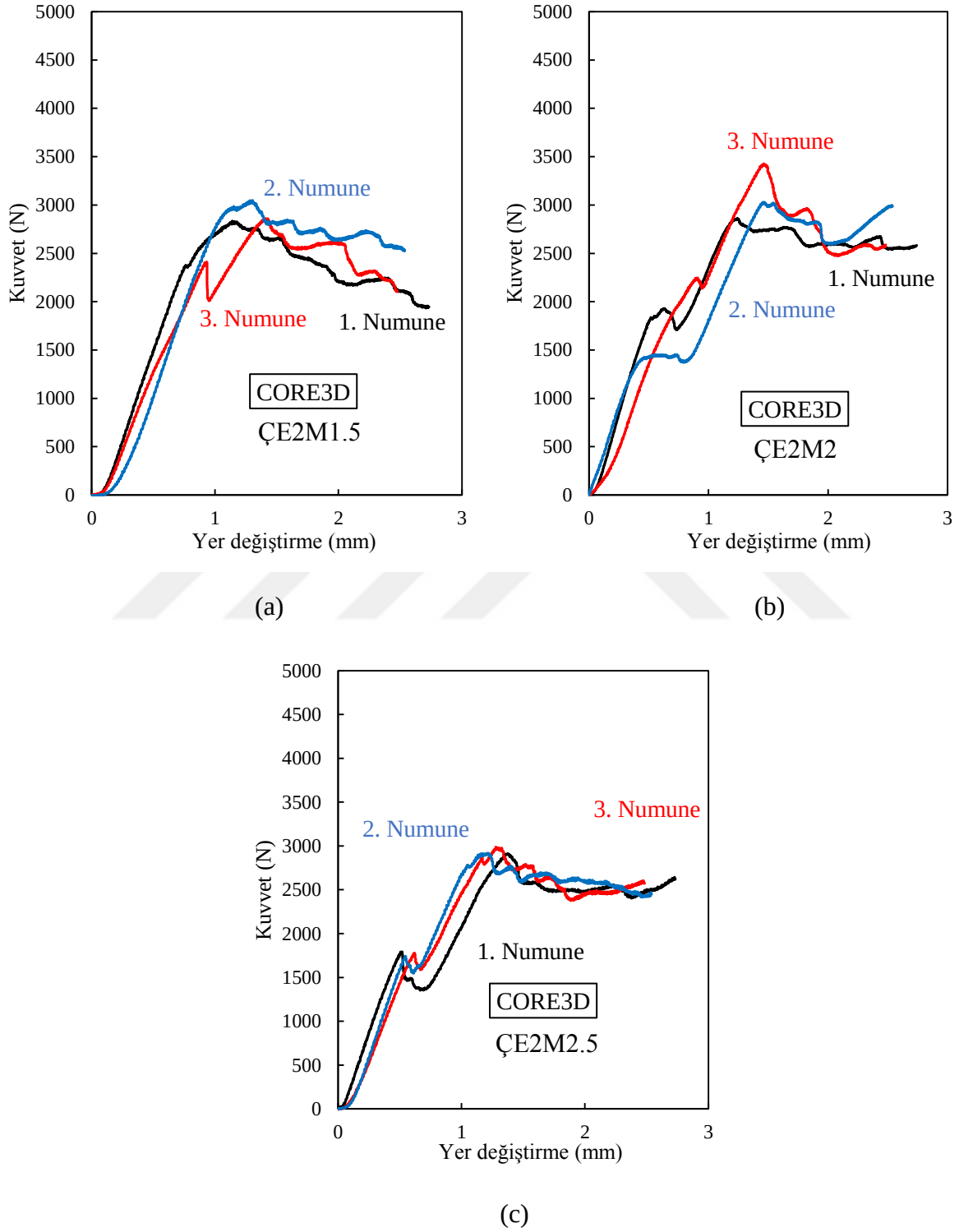
Şekil 6.28’de hasar yüklerinin E/D değerleri ile değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde numunelerin maksimum hasar yüklerinin artan E/D değerine bağlı olarak kısmen artış gösterdiği görülmektedir. Tek pim bağlantılı levhaların çekme deneyleri sonucunda en düşük hasar yükünün $E/D=1$ değeri için 1183 N iken, en yüksek hasar yükünün ise $E/D=4$ değeri için 1963 N olduğu belirlenmiştir. Şekil 6.27’de yer alan grafiklerde yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın sabit bir noktaya kadar düştüğü ve ardından yaklaşık olarak sabit bir biçimde ilerlediği görülmektedir. Bu grafikler $E/D=2, 3$ ve 4 değerleri için elde edilmiştir. $E/D=1$ grafiğinde ise yükün maksimum değere ulaştıktan sonra uzamanın düzenli olarak düşüş gösterdiği görülmektedir. Bağlandığı deliği ezen pim, levhanın kısa kenarına doğru sabit bir genişlik değerine sahip parçayı kesmektedir. $E/D > 1$ için deney sonrasında kompozit numuneler incelendiğinde ise ezilme tipi hasarın meydana geldiği, pimin bağlandığı delik yüzeyindeki matrisi kırarak fiberleri ezdiği görülmüştür (Tablo 6.5). $E/D > 1$ parametresindeki değişimin, hasar yükünü artırdığı görülmektedir.

Tablo 6.5. Çekme deneyi sonrası CORE3D numunelerde oluşan hasar resimleri

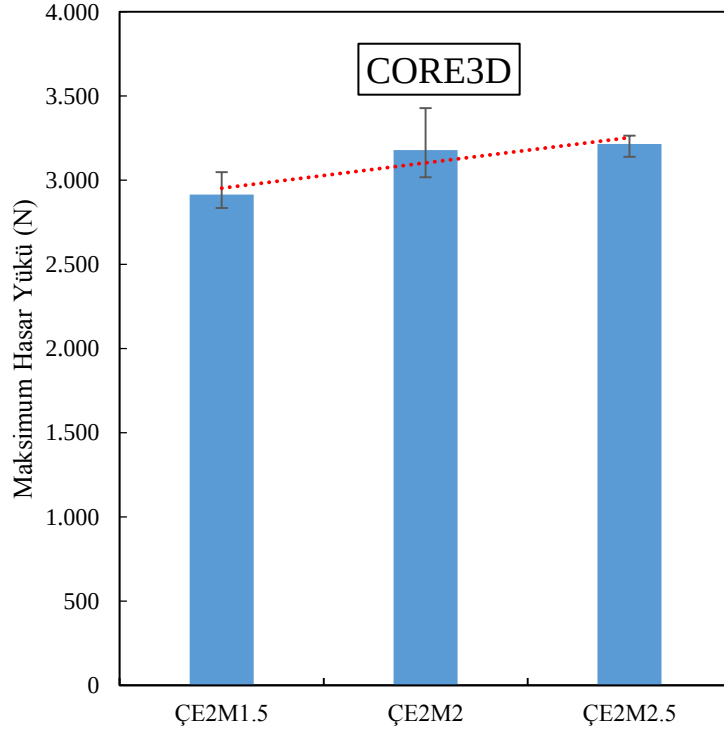
94

6.5.3. Çift Pim Bağlantılı Numuneler

Şekil 6.29’da CORE3D çift pim bağlantılı numunelerin kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



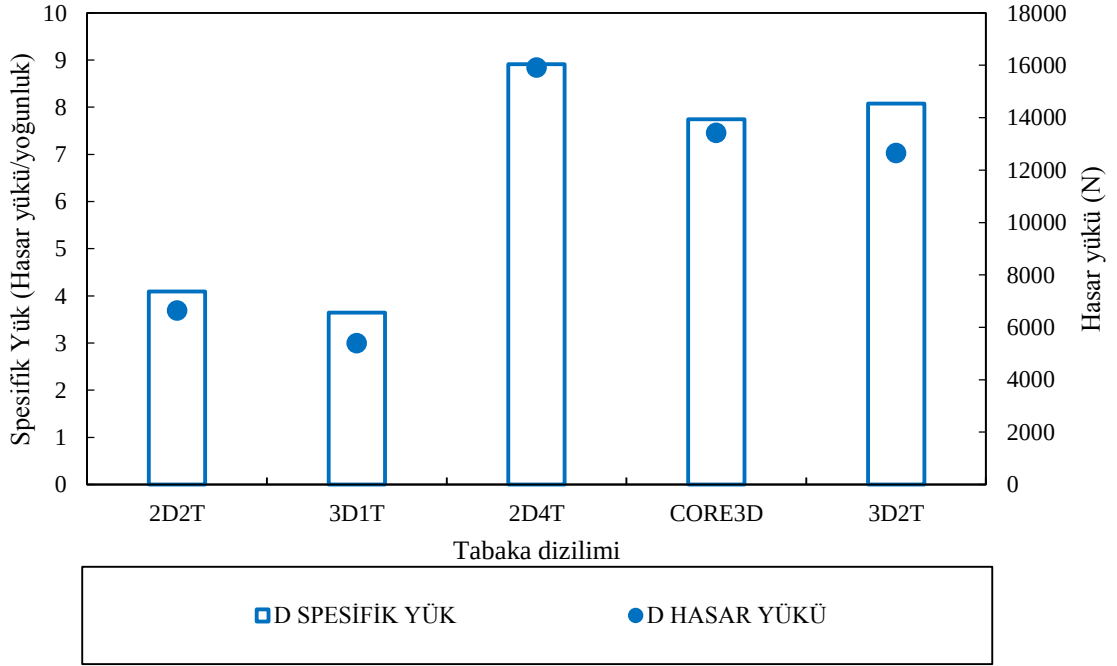
Şekil 6.29. CORE3D çift pim bağlantılı numunelere ait çekme testi grafikler $E/D = 2$ için a) ÇE2M1.5 ($M/D = 1.5$), b) ÇE2M2 ($M/D = 2$) ve c) ÇE2M2.5 ($M/D = 2.5$)



Şekil 6.30. Çift pim bağlantılı numunelerin maksimum hasar yüklerinin M/D oranına göre değişimi

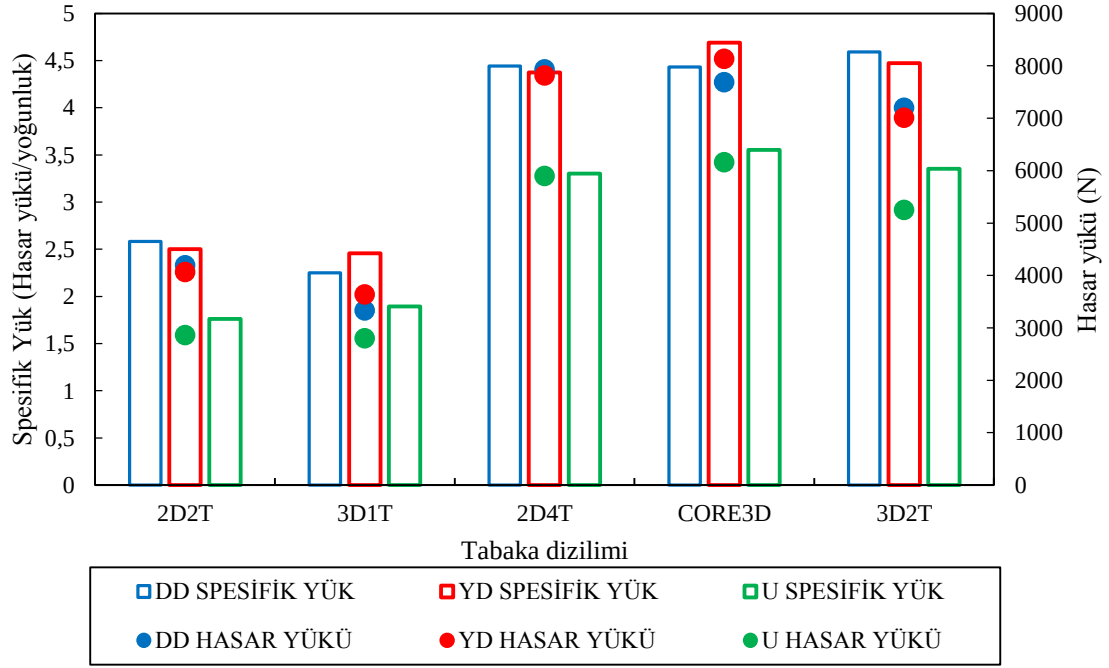
Şekil 6.30’da maksimum hasar yüklerinin sabit E/D değerine karşılık olarak M/D değerine göre değişimi görülmektedir. Çift pim delikli kompozit numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük hasar yükünün 2834 N ile $M/D=1.5$ olan levhada, en yüksek hasar yükünün ise 3139 N ile $M/D=2.5$ olan levhada görüldüğü tespit edilmiştir. Şekil 6.29’da $M/D>1.5$ yer alan grafiklerde yüklerin en yüksek değere ulaştıktan sonra düştüğü ve sabit bir değerle ilerlediği görülmüştür. Bu sonuç numunelerde ezilme tipi hasarın meydana geldiğini göstermektedir. $M/D>1.5$ parametresine ait grafik incelendiğinde hasar yüklerinin en büyük değeri aldıktan sonra az bir düşüşle artan uzama değerine karşın yaklaşık sabit bir değerde bir süre kaldıktan sonra düşmeye başladığı görülmektedir. Bu durum levhanın serbest kenarına uzak olan delikteki hasarın diğer deliğe ulaştığını, artık yükün sadece levha kenarına yakın delik tarafından taşındığını göstermektedir. İlk hasarın serbest kenarlara daha uzak olan pim deliğinde başlaması bu tür grafiklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Çift pim delikli numunelerin tümünde $M/D>1.5$ her iki pimde de aynı anda hasarlar ortaya çıkmaya başlamıştır. Numunelerde M/D parametresindeki değişimin, hasar yükleri üzerindeki etkisinin bir artışı sebep olduğu gözlenmektedir. CORE3D çift pim delikli

kompozit numunelerin maksimum hasar yüklerinin 3D2T kompozitlere oranla daha düşük, 3D1T kompozitlere oranla daha yüksek düzeyde olduğu tespit edilmiştir.



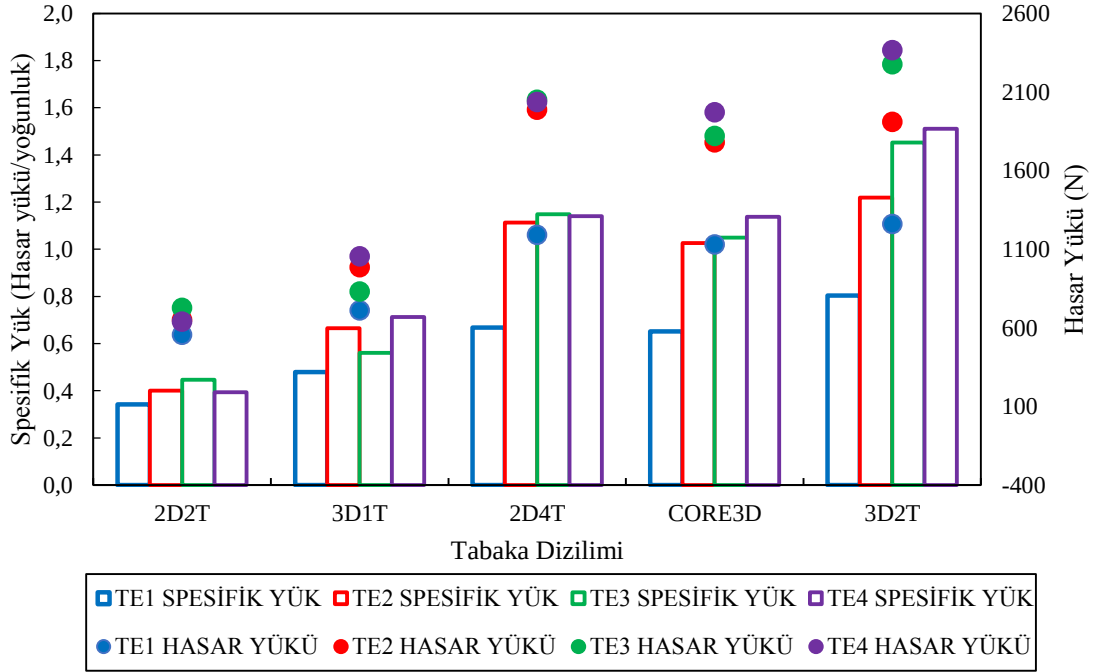
Şekil 6.31. Deliksiz numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri

Şekil 6.31’de deliksiz numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde tabaka dizilimine bağlı olarak maksimum spesifik yük ve hasar yükü değerlerinin değiştiği görülmektedir. 3D2T numunesi ile CORE3D numunesinin spesifik yük değerlerinin birbirine yakın olduğu görülürken maksimum hasar yükü değerinin en yüksek 2D4T dizilimine sahip numunelerde olduğu görülmektedir.



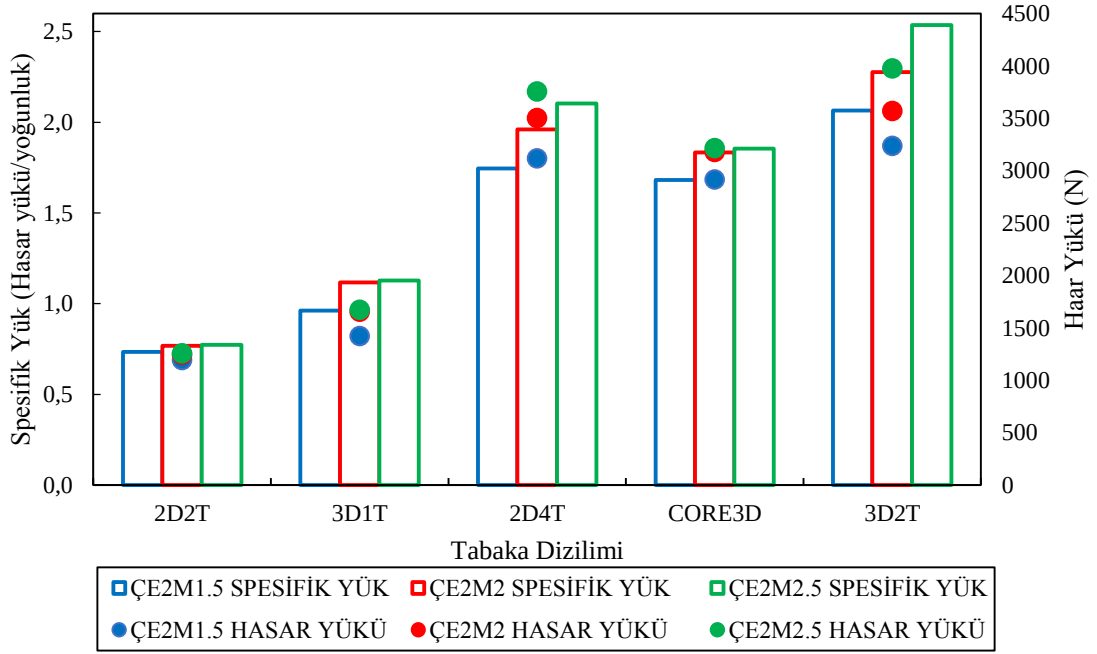
Şekil 6.32. Çentikli numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri

Dairesel delikli, yarım daire kenar çentikli ve U kenar çentikli numunelerin tabaka dizilimlerine göre spesifik yük ve hasar yükleri incelendiğinde 2D4T, CORE3D ve 3D2T çentikli numunelerinde benzer düzeyde spesifik yük miktarlarına sahip oldukları görülmektedir (Şekil 6.32). Numunelerin hasar yükü değerlerine bakıldığında ise en yüksek değer kısmen CORE3D numunesine ait olduğu, bunu 2D4T numunesinin izlediği görülmektedir. En yüksek spesifik yük değeri ve hasar yükü değerinin CORE3D numunesine ait olduğu görülmektedir. Bu durum mukavemet değeri en yüksek olan numunenin CORE3D numunesine ait örnekler ait olduğu sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Numuneler çentik durumlarına göre karşılaştırıldığında en yüksek, spesifik yük miktarının yarım daire kenar çentikli numunelere ait olduğu görülmektedir.



Şekil 6.33. Tek pim bağlantılı numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri

Şekil 6.33'te hasar yüklerinin E/D değerleri ile değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde numunelerin maksimum hasar yükü ve spesifik yüklerinin artan E/D değerine bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Tek pim bağlantılı levhaların çekme deneyleri sonucunda en düşük hasar yükü değerlerinin $E/D = 1$ değerinde gözlenirken, en yüksek hasar yükünün ise $E/D = 4$ değerinde gözlemlendiği belirlenmiştir. En yüksek spesifik yük değerleri, tek pim bağlantılı numunelerde tüm E/D değerleri için 3D2T numunelerde elde edilmiştir.



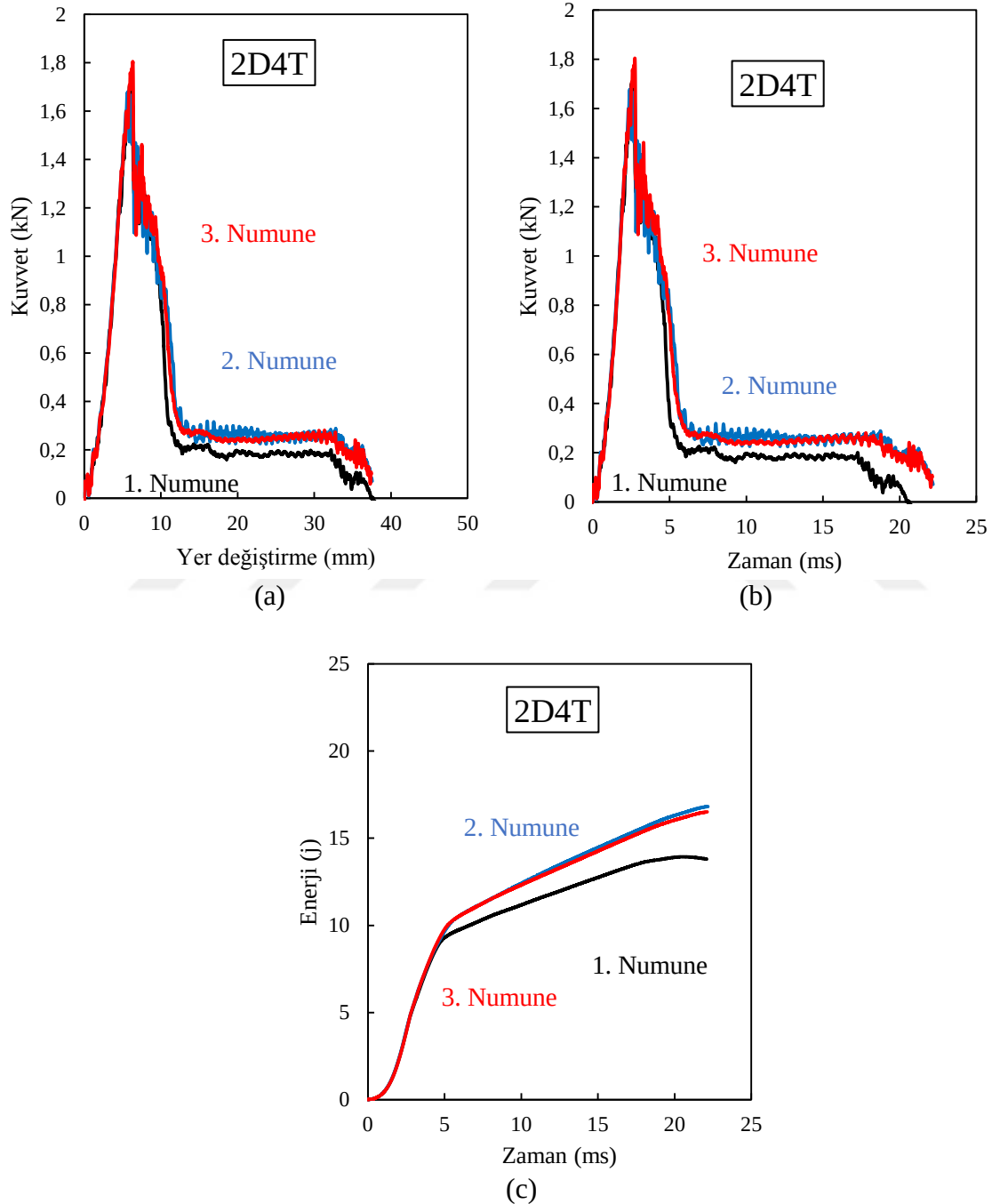
Şekil 6.34. Çift pim bağlantılı numunelere ait spesifik yük ve hasar yükü değerleri

Şekil 6.34’te maksimum hasar yüklerinin sabit E/D değerine karşılık olarak M/D değerine göre değişimi görülmektedir. Çift pim delikli kompozit numunelere ait deney sonuçları incelendiğinde en düşük hasar yükünün $M/D=1.5$ değerine ait 2D2T numunelerinde, en yüksek hasar yükü ve spesifik yükün ise $M/D=2.5$ değerinde 3D2T numunesinde görüldüğü tespit edilmiştir.

6.3. Darbe Testi Deneyi Sonuçları

6.3.1. 2D 4 Tabakalı Numuneye ait Darbe Testi Sonuçları

Şekil 6.35'te 2D4T numunesine ait kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



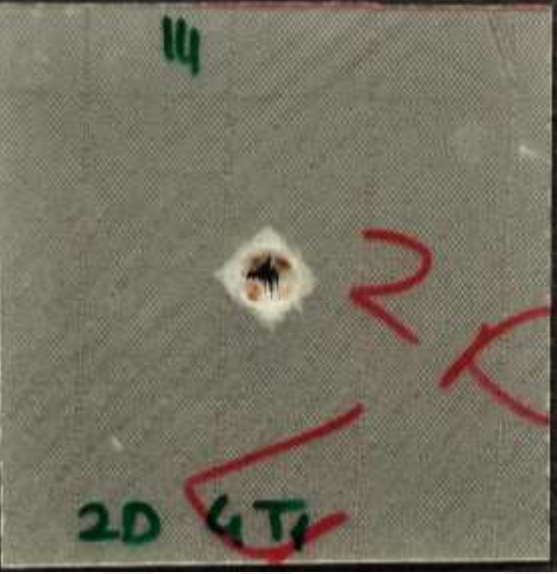
Şekil 6.35. 2D4T numunesine ait (a) kuvvet-yer değiştirme, (b) kuvvet-zaman, (c) enerji-zaman grafikleri (20 J)

Kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde maksimum kuvvetin 7 mm olduğu yer değiştirme değerinde delinme meydana geldiği görülmektedir. Hasar resimleri incelendiğinde

üç numunede de delinme tipi hasarın meydana geldiği söylenebilir (Tablo 6.6). Kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde en fazla temasın 1.7 kN kuvvet değerinde olduğu ve en fazla temasın 3 ms değerinde sağlandığı görülmektedir. Bu da vurucu ucun 20 ms değerinde levhaya zarar vererek durduğunu göstermektedir. Enerji-zaman grafiğine bakıldığında absorbe edilen enerjinin ve delinme hasarlarından dolayı darbe enerjisine eşit olduğu söylenebilir.

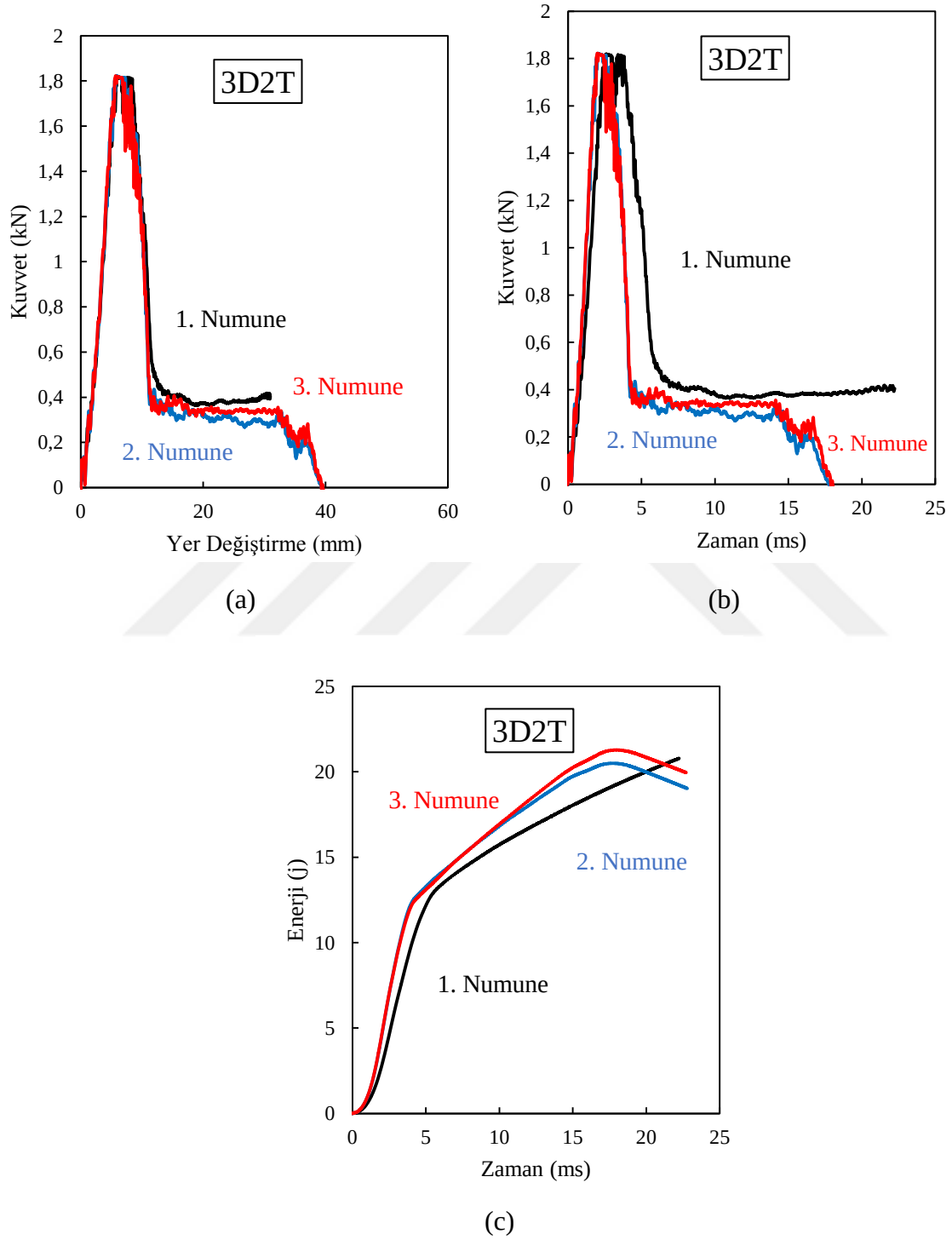


Tablo 6.6. 2D4T numuneler için darbe deneyi sonrası oluşan hasar resimleri

	
2D4T-1. numune (20 J)	2D4T-2. Numune (20 J)
	
2D4T-3. numune (20 J)	

6.3.2. 3D2T Numunesine ait Darbe Testi Grafiği

Şekil 6.36'da 3D2T numunesine ait kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.

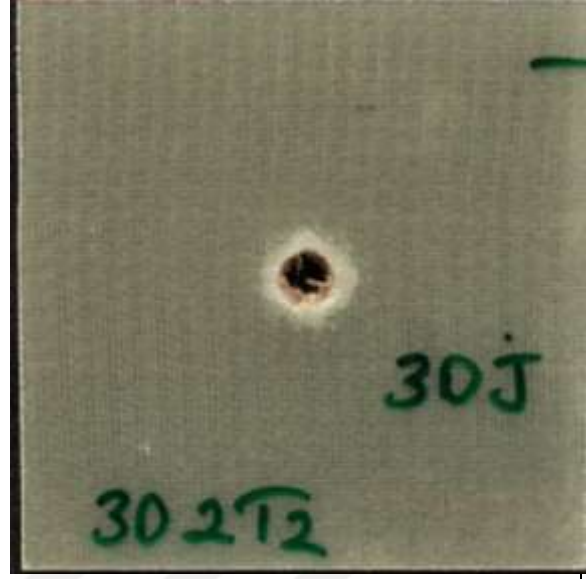
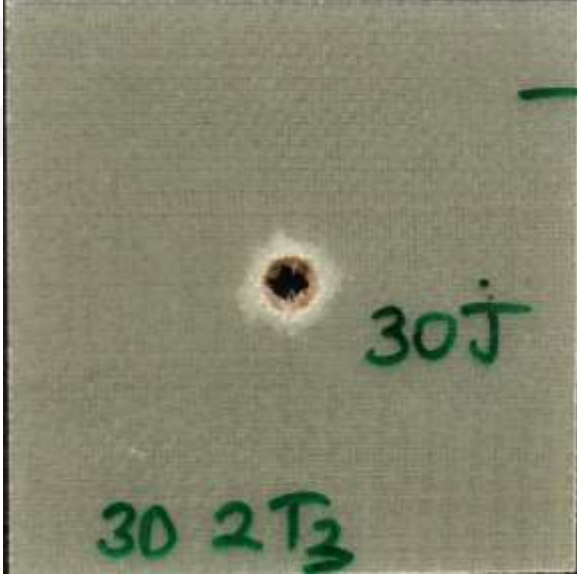


Şekil 6.36. 3D2T numunesine ait (a) kuvvet-yer değiştirme, (b) kuvvet-zaman, (c) enerji-zaman grafikleri (30 J)

Kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde maksimum kuvvetin 8 mm yer değiştirme değerinde meydana geldiği görülmektedir. Hasar resimleri incelendiğinde üç numunede de delinme tipi hasarın meydana geldiği söylenebilir (Tablo 6.7). Kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde en fazla temasın 1.82 kN kuvvet değerinde olduğu ve en fazla temasın 3 ms değerinde sağlandığı görülmektedir. Bu da vurucu ucun 18 ms değerinde levhayı delerek durduğu anlaşılmaktadır. Enerji-zaman grafiğine bakıldığında absorbe edilen enerjinin delinme hasarlarından dolayı darbe enerji olarak ortaya çıktığı söylenebilir.

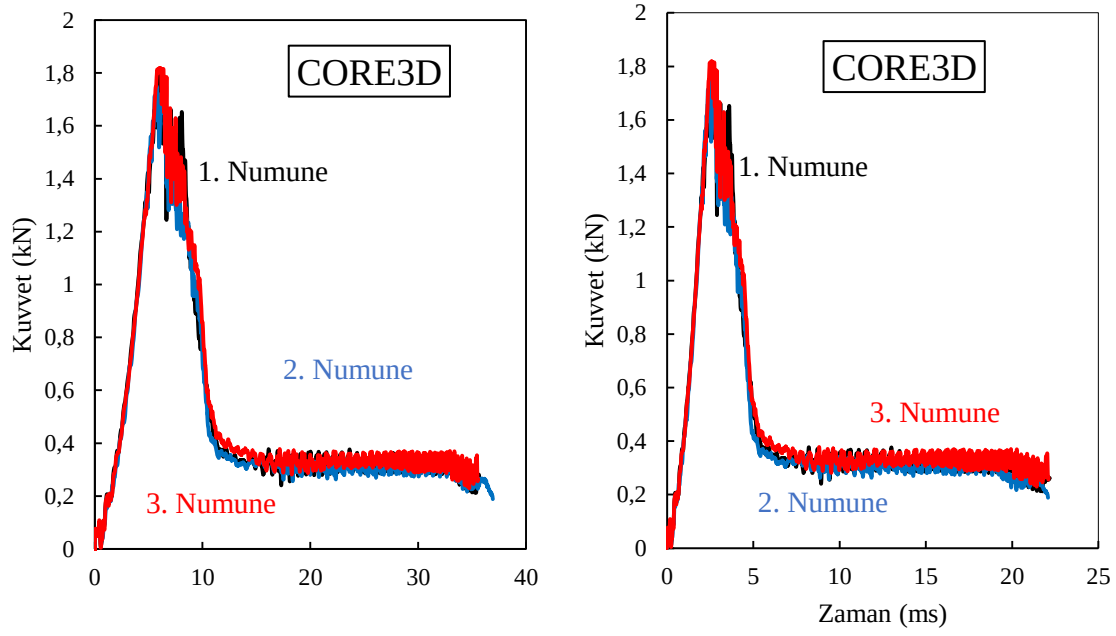


Tablo 6.7. 3D2T numuneler için darbe deneyi sonrası oluşan hasar resimleri

	
3D2T-1. Numune (20 J)	3D2T-2. Numune (30 J)
	
3D2T-3. Numune (30 J)	

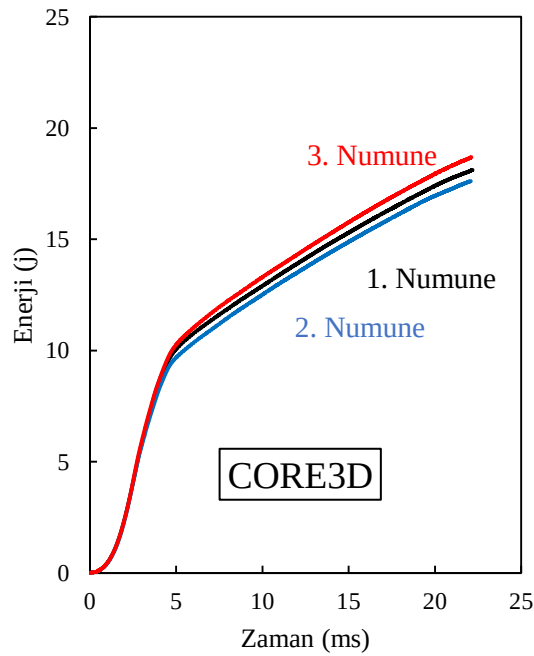
6.3.3. CORE3D Numunesine ait Darbe Testi Grafiği

Şekil 6.37’de CORE3D numunesine ait kuvvet-zaman, enerji-zaman ve kuvvet-yer değiştirme grafikleri verilmiştir.



(a)

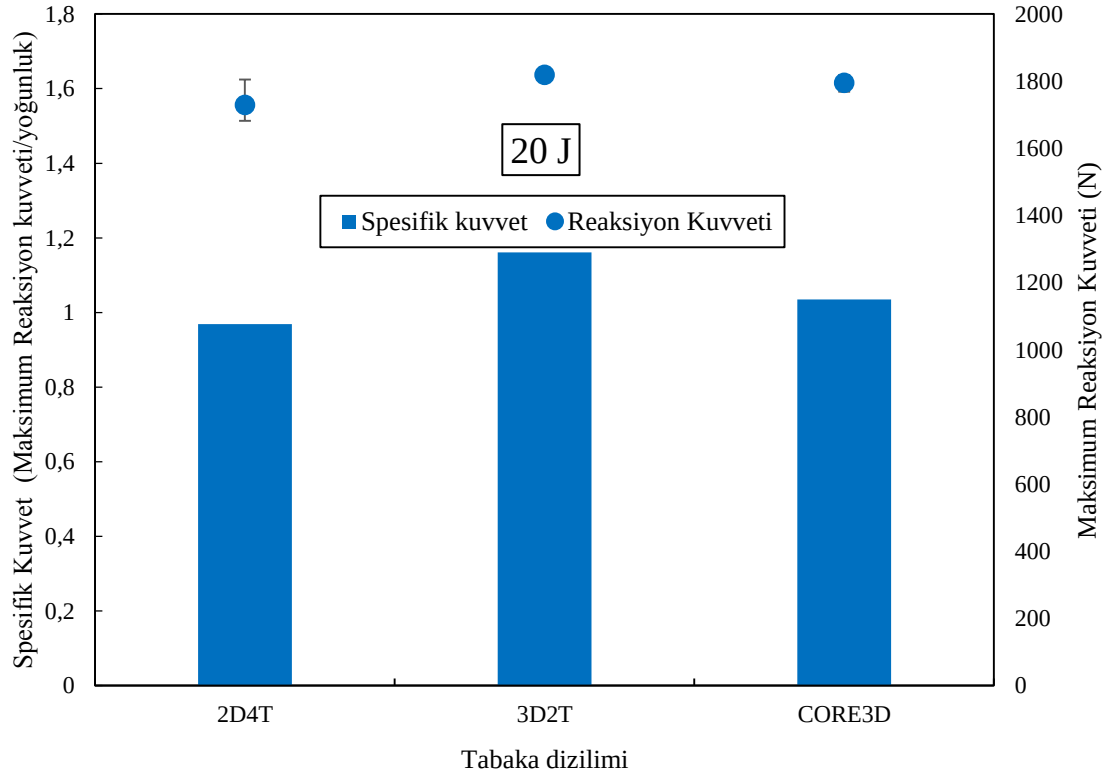
(b)



(c)

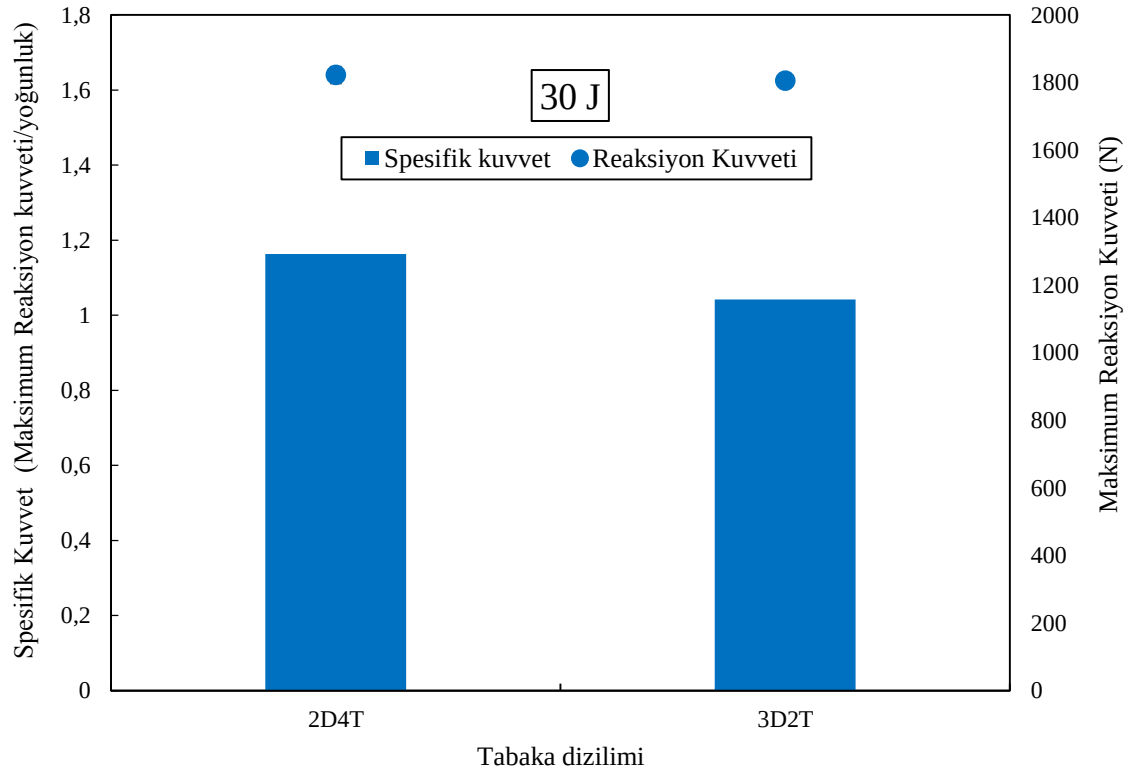
Şekil 6.37. CORE3D numunesine ait (a) kuvvet-yer değiştirme, (b) kuvvet-zaman, (c) enerji-zaman grafikleri (20 J)

Kuvvet-yer değiştirme grafiği incelendiğinde maksimum kuvvetin 8 mm yer değiştirme değerinde meydana geldiği görülmektedir. Hasar resimleri incelendiğinde üç numunede de delinme tipi hasarın meydana geldiği söylenebilir (Tablo 6.8). Kuvvet-zaman grafiği incelendiğinde en fazla temasın 1,79 kN kuvvet değerinde olduğu ve en fazla temasın 3 ms değerinde sağlandığı görülmektedir. Bu da vurucu ucun 23 ms değerinde durabildiğini göstermektedir.



şekil 6.38. Darbe test maksimum hasar yükü (20 J)

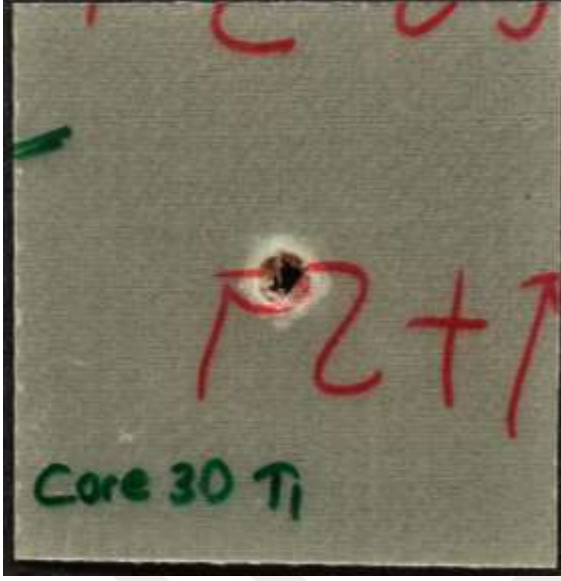
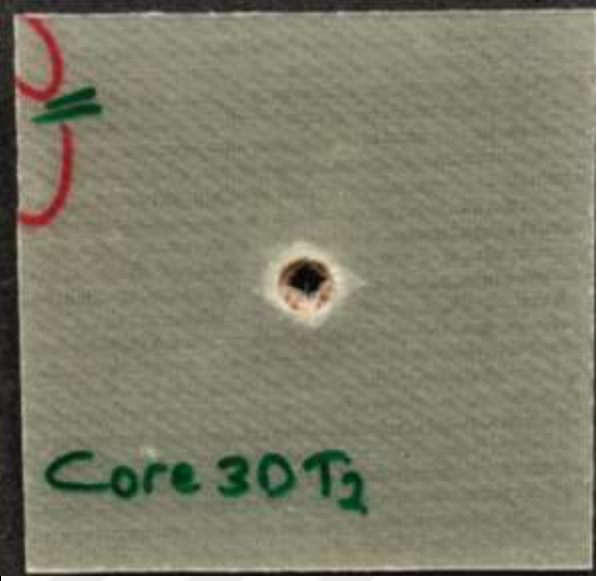
şekil 6.38’de 2D4T, CORE3D ve 3D2T numunelerine ait 20J’l k darbe kuvvetinde maksimum hasar yükü ve spesifik kuvvet grafiği verilmiştir. şekil 6.34’te görüldüğü üzere 2D4T, CORE3DT ve 3D2T numuneleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyde en düşük hasar yükü 1.7 kN değeri ile 2D4T kompozit numune kullanılan deneyde gözlenirken, en yüksek hasar yükü ise 1.82 kN değeri ile 3D2T kompozit numune kullanılan deneyde gözlenmiştir. Tablo 6.8’deki hasar resimlerinde görüldüğü gibi numunelerin tümünde delinme hasarı oluşmuştur. Spesifik kuvvet ile reaksiyon kuvvetlerinin tabaka dizilimine göre sıralaması değişmemektedir.



Şekil 6.39. Darbe test maksimum hasar yükü (30 J)

Şekil 6.39’da 2D4T, CORE3D ve 3D2T numunelerine ait 30 J’lük darbe kuvvetinde maksimum hasar yükü grafiği verilmiştir. Şekil 6.35’te görüldüğü üzere 2D4T ve 3D2T numuneleri kullanılarak gerçekleştirilen deneyde hasar yükü 1.8 kN değeri olarak hem 2D4T hem de 3D2T numuneler için elde edilmiştir. Tablo 6.8’deki hasar resimlerinde görüldüğü gibi numunelerin tümünde delinme hasarı oluşmuştur.

Tablo 6.8. CORE3D numuneler için darbe deneyi sonrası oluşan hasar resimleri

	
CORE3D-1. Numune (20 J)	CORE3D-2. Numune (20 J)
	
CORE3D-3. Numune (20 J)	

7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, 3D boşluklu örgü kumaşlar kullanılarak üretilen kompozitlerin hasar davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Veriler daha sonra ise 2D kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- 2D ve 3D dizimli kompozitlerin tümünde çentiksiz, dairesel delikli, yarım daire kenar çentik ve U çentikli numunelerin hasar yükleri incelendiğinde minimum hasar yükü U çentikli levhalardan elde edilmiştir. Dairesel delikli ve yarım daire çift kenar çentikli numunelerin sonuçları yaklaşık olarak benzer olup, değerleri U çentikli levhaların hasar yüklerinden fazladır. Bu tip numunelerin baskın hasar tipi fiber çekme hasarı olarak ortaya çıkmaktadır. 2D numunelerde çentik ucunda levha serbest kenarına doğru çizgisel hasar meydana gelirken, 3D numunelerde kalınlık boyunca fiberlerin etkisiyle daha geniş bölgede yayılan hasarlar ortaya çıkmaktadır.
- Tek pim delikli levhaların hasar sonuçları incelendiğinde E/D oranının artmasıyla hasar yükünün kısmen arttığı görülmüştür. $E/D = 1$ için kesme hasar meydana gelirken $E/D > 1$ için ise numunelerde ezilme hasarının olduğu söylenebilir. 3D numunelerde düşey fiberlerin etkisiyle hasar bölgesinde daha fazla saçaklanma mevcuttur (Tablo 7.1).

Tablo 7.1. Hasar resimleri

Çekme Testi			
Tabaka dizilimi	2D2T (DD)	2D4T (DD)	CORE3D (DD)
Darbe Testi			
Tabaka dizilimi	2D4T (20 J)	3D2T (30 J)	CORE3D (20 J)

- Çift pim delikli levhaların hasar sonuçlarına bakılırsa M/D 'nin artışına bağlı olarak hasar yüklerinde kısmi olarak artışlar söz konusudur. $M/D=1.5$ olduğunda levha serbest kenarına uzak olan pim deliğinde kesme hasarı meydana gelmiştir. $M/D>1.5$ için ise her iki pim deliğinde ezilme hasarı oluşmuştur. Bu tip numunelerde $E/D=2$ sabit tutulmuştur. Tek pim bağlantılı numunelerde $E/D>1$ için ezilme hasarı meydana geldiğinden dolayı $M/D>1.5$ için ezilme hasarının ortaya çıkması beklenen bir durum olmuştur. M/D 'nin değişimine göre hasar yüklerindeki kısmi artış ve oluşan hasar tipleri 2D ve 3D numuneler için benzerdir.
- 2D ve 3D numuneler kendi arasında sabit çentik ve pim bağlantı özelliğine göre de karşılaştırılmıştır. 3D1T numuneler 1 tabaka 3D kumaştan meydana gelmektedir. Bu bir tabaka ise iki adet 2D yüzey kumaşından oluşur. 2D2T ise 2 adet 2D yüzey kumaştan meydana gelir. Deliksiz 3D1T kompozitlerin hasar yükü değerlerinin 2D2T kompozitlerin sonuçlarından daha düşük olduğu görülmüştür. Ancak spesifik hasar yükleri karşılaştırıldığında 3D1T kompozitlerin hasar yüklerinin 2D2T'ye yaklaştığı görülmüştür.
- 3D2T, 2 tabaka 3D örgü kumaştan meydana gelmiştir. Her bir 3D örgü kumaş 2 adet 2D yüzey kumaştan oluştuğundan 3D2T içerisinde 4 adet 2D yüzey tabakası vardır. Benzer olarak CORE3D içerisinde ise 2 tabaka 2D kumaş ve 1 tabaka 3D örgü kumaş olmak üzere 4 adet 2D yüzey tabaka bulundurulur. 3D2T ile CORE3D'nin sonuçları 2D4T 4 tabakalı 2D kumaştan oluşmuş kompozitlerle karşılaştırılmıştır. Deliksiz numunelerde 2D4T hasar sonuçları CORE3D ve 3D2T'den büyüktür. Spesifik yüklerde ise yine 2D4T en yüksek hasar yüküne sahiptir. Ancak 3D2T ile CORE3D sonuçları birbiri ile aynı değere ulaşmıştır.
- Çentikli numunelerde ise spesifik yükler karşılaştırıldığında 2D2T ile 3D1T tabaka dizilimlerinde spesifik yüklerin yaklaşık eş olduğu görülmüştür.
- 2D4T, CORE3D ve 3D2T tabaka dizilimleri karşılaştırıldığında ise çentikli numuneler için spesifik yüklerin benzer olduğu söylenebilir. Ancak tek pim bağlantısı için tabaka dizilimine bakıldığında 3D kompozitlerin üstünlüğü

ortaya çıkmaktadır. 3D1T spesifik yükler 2D2T'den daha yüksektir. 3D2T'nin spesifik yükleri ise CORE3D ve 2D4T'den daha yüksektir. Benzer durum çift pim bağlantılarında da geçerlidir. En yüksek spesifik yük 3D2T kompozitler için elde edilmiştir.

- Pim bağlantılı 3D kumaşlı kumaşlar, 2D kumaşlardan daha fazla hasar yükünü taşımışlardır. 3D kompozitler içinde ise en fazla yük tamamen 3D kumaşlardan üretilmiş 3D2T kompozitler için elde edilmiştir.
- 3D kumaşlarda bulunan düşey fiberler hasar yükü için artışındaki en büyük etmendir. Ancak kullanılan 3D boşluklu örgü kumaşlarda iki tabaka arasındaki düşey fiberler nedeniyle hasar bölgesinde kısmi boşluklara sebep olan küçük delaminasyon hasarlarının daha geniş bölgede gerçekleştiği görülmüştür. Dolayısıyla bu tip kumaşların pim bağlantıları için hasar yükleri fazla ancak çentikli numunelerde hasar bölgeleri kısmen daha büyüktür. Pim bağlantılarında ise daha fazla saçaklanmayla bu durum nihai hasarda görülmüştür.
- Literatür çalışmalarında 3D boşluklu kompozitlerin elle yatırma yöntemi ile imalatı gerçekleştirilmiştir. Ancak yapılan bu çalışmada tabakalı 3D kompozit kumaştan imalatı vakum infüzyonla yapılmıştır. Elle yatırma yöntemi ile düşey fiberler arasında imalat sonrası boşluklar kalmaya devam ederken, vakum infüzyon yöntemi ile yapılan imalatla vakum etkisiyle ortadan kaldırılmıştır. Dolayısıyla elle yatırma yöntemi ile üretilen numunelere göre doğal olarak daha fazla yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Zira levha yoğunluğunun vakum etkisiyle artırılması sağlanmıştır. Boşluklar sıkıştırılarak alt ve üst yüzey tabakaları ile bu düşey bağlantı iplerinin birbirine matris ile yapışması sağlanmıştır. Çekme kuvveti uygulandığı zaman, öncelikle bu tabakaları bir arada tutan nispeten düşük mukavemete sahip matris hasara uğrar ve numune gerçek boşluklu yapısını almaya çalışır. Yükleme artarken bu oranda düşey fiberler mukavemeti artırır. Dolayısıyla hasar bölgesinin çentikli numunelerde daha geniş olması kumaşın kendi doğal haline dönmek istemesi ise düşük matris mukavemetidir.

- Ayrıca tabaka dizilimlerine göre kompozitlerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır. Pim bağlantılarında olduğu gibi çekme mukavemeti ve elastisite modülleri karşılaştırıldığında 2D2T, 3D1T'den, 3D2T'nin ise 3D1T ve CORE3D'den daha yüksek olduğu görülmüştür. Ancak CORE3D'nin elastisite modülü diğerlerine göre daha düşüktür (Tablo 7.2).

Tablo 7.2. Tabaka dizilimlerine göre malzemelerin mekanik özellikleri

	Tabaka Dizilimi	Elastisite Modülü E_{11}, E_{22} (MPa)	Çekme Mukavemeti XT (MPa)	Kopma uzaması $\epsilon_{K1} = \epsilon_{K2}$ (%)
ÇENTİKSİZ NUMUNELER	2D2T	25425,6	34,17	0,018299
	2D4T	32778	155,72	0,021996
	3D1T	17180,4	40,87	0,018281
	3D2T	25515	159,07	0,023902
	CORE3D	6791	135,21	0,022969

- Çalışmada ayrıca 2D ve 3D kumaşların düşük hızlı darbe etkisine bakılmıştır. Genel olarak 2D kumaşlarla benzer tepkiyi gösteren 3D kumaşlı kompozitlerin temas kuvvetleri nispeten biraz daha fazla elde edilmiştir. Tüm numunelerde delinme hasarı görülmüştür.

Yukarıda belirtilen sonuçlara göre tasarımcılar 2D kompozit yerine 3D kompozitleri daha fazla yük taşıma kapasiteleri nedeniyle tercih edebilirler. Tabaka sayısının artırılmasıyla 3D kompozitlerin mukavemetleri de artmaktadır. Ancak teknolojinin gelişmesiyle düşey doğrultudaki fiber boşluklarının doldurulmasını sağlayacak kompozit hacimli kumaşların üretilmesiyle çok daha güçlü kompozitler elde edilebilir. Bu durumda ise ağırlık, kullanım şartları ve ekonomi gibi faktörler ortaya çıkabilir. Bu çalışma ile havacılık ve savunma sanayi için önemli bir yere sahip yeni nesil 3D kompozitlerin mekanik davranışı deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma farklı hibrit tabaka dizilimleri, matris malzemeleri, katkı ve imalat şartları için genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. **Kaw, A.K.**, 2014, Mechanics of composite materials, 2nd Edition, çev Okutan Baba, B., Karakuzu, Efil Yayınevi, İstanbul.
- [2]. **Zhang, Y., Ha, S., Sharp, K., Guest, J.K., Weihs, T.P., Hemker, K.J.**, 2015. Fabrication and mechanical characterization of 3D woven Cu lattice materials. *Materials&Design*, 16, 74-751.
- [3]. **Patel, D, Koncherry, V, Yousaf, Z. and Potluri, P.**, 2017. Influence of 3D Weaving parameters on preform compresion and laminate mehanial properties. 21st International Conference on Compoiste Materials, 2(1), 47-63.
- [4]. **Manley, S.**, 2016. The development of woven velours fort he transportation market, Journal of Textile and Apparel, *Technology and Management*, **3**, 1-14.
- [5]. **Green, S.D., Matveev, M.Y., Long, A.C., Ivanov, D., Hallett, S.R.**, 2014. Mechanical modelling of 3D woven composites considering realistic unit cell geometry, *Composite Structures*, 8, 284-293.
- [6]. **Bulut, M.**, 2017. Investigation of impact behavior of laminated hybrid composite plates, *Doktora Tezi*, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- [7]. **Zhang, D., Sun, M., Liu, X., Xiao, X., Qian, K.**, 2018. Off-axis bending behaviors and failure characterization of 3D woven composites. *Composite Structures*, 5, 45-55.
- [8]. **Seltzer, R., Gonzalez, C., Munoz, R., Llorca, J., Blanco-Varela, T.**, 2013. X-ray microtomography analysis of the damage micromechanisms in 3D woven composites under low-velocity impact. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 7, 49-60.
- [9]. **Verpoest, I. and Philips, D.**, 2009. Recent Developments in 3D-Knittings for Sandwich Panels, Mechanics of Sandwich Strucutres: Proceedings of the EUROMECH, 360, Collogium.

- [10]. **Dai, S., Cunningham, P.R., Marshall, S., Silva, C.,** 2015. Influence of fibre architecture on the tensile, compressive and flexural behaviour of 3D woven composites. *Composites Part: A* 69, 2, 195-207.
- [11]. **Philips, D., Verpoest, I. and Raemdonck, J.V.,** 2008. Evaluation of the out-of-plane properties of 3D-Knitted Fabric Composites, *Proceedings of ICCM-10*, Canada.
- [12]. **Verpoest, I. and Philips, D.,** 2007. 3D-Knitted Fabrics for Sandwich Panels. *SAMPE Journal*, 32(6), 23-31.
- [13]. **Van Vuure A.W., Ivens J.A., Verpoest I.,** 2005. Mechanical Properties of Composite Panels Based on Woven Sandwich-Fabric Preforms, *Composites-Part A:Applied Science and Manufacturing*, 31, 671-680.
- [14]. **Trumper, W., Cherif, C., Krzywinski, S., Diestel, O., Schulz, C., Lin, H. and Klug, P.,** 2012. Development of a process chain for the realization of multilayer weft knitted fabrics showing complex 2D/3D geometries for composite applications, *Textile Research Journal*, 82, 1195-1210.
- [15]. **Sun, B.Z., and Gu, B.H.** 2011. Energy absorption of 3D orthogonal woven fabric under ballisti penetration of hemispherical-cylindrical projectile. *Journal of the Textile Institute*, 102(10), 875-889.
- [16]. **Menges, A.,** 2009, Integral Computational Design for Composite Spacer Fabric Structures: Integral Processes of Form Generation and Fabrication for Sandwich Structured Composites with 3D Warp-Knitted Textile Core. *Computation: The New Realm of Architectural Design*, 27th eCAADe Conference Proceedings, Istanbul (Turkey) 16-19 September 2009, pp. 289-298.
- [17]. **Wang, Y., Zhou, G., and Sun, X.** 2004. Multi-chain digital element analysis in textile mechanics. *Composites Science and Technology*, 64: 239–244.
- [18]. **Liu, Y., Labanieh, A.R., Vasiukov, D., Soulat, D., Panier, S.,** 2017. Influence of off-axis in-plane yarns on the mechanical properties of 3D composites. *Composites: Part A*, 98(8), 45-57.

- [19]. **Yan, S., Zeng, X., Long, A.,** 2018. Experimental assessment of the mechanical behaviour of 3D woven composite T-joints, *Composites Part B: Engineering*, 3, 108-113.
- [20]. **Zhang, Y., Zhang, Q., Zhou, C., Zhou, Y.,** 2010, Mechanical properties of PTFE, Coated Fabrics, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(24), 3624-3630.
- [21]. **Patel, D.K., Waas, A.M., Yen, C.F.,** 2018. Compressive response of hybrid 3D woven textile composites (H3DWTCs): An experimentally validated computational model. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 8, 381-405.
- [22]. **Li, Z., Guo, L., Zhang, L., Wang, Q.,** 2018. In situ experimental investigation on the out-plane damage evolution of 3D woven carbon-fiber reinforced composites. *Composites Science and Technology*, 101-109.
- [23]. **Zhong, S., Guo, L., Liu, G., Pan, S.,** 2017. A random waveness model for the stiffness and strength evaluation of 3D woven composites, *Composite Structures*, 11, 1024-1032.
- [24]. **Mack, P.E. and Smith, M.D.,** 2003. Advances in Vacuum Infusion Processing Using Spacer Fabrics as Engineered Reinforcing Interlaminar Infusion Media. *Society for the Advancement of Material and Process Engineering*, 2(3), 71-98.
- [25]. **Shiah, Y.C., Tseng, L., Hsu, J.C., Huang, J.H,** 2004. Experimental Characterization of an Integrated Sandwich Composite Using 3D Woven Fabrics as the Core Material, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1(4), 46-63.
- [26]. **Tita, V., Carvalho, J. and Lirani, J.,** 2011. A procedure to estimate the dynamic damped behavior of fiber reinforced composite beams submitted to flexural vibrations, *Journal of Materials Research and Technology*. 4, 315–321.
- [27]. **Sayman, O., Ozen, M., Korkmaz, B.,** 2013. Elasto-plastic stress distributions in adhesively bonded double lap joints. *Materials and Design*, 45, 31-35.

- [28]. **Turan, K. ve Kaman, M.O.** 2010. Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında İlerlemeli Hasar Analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(3), 315-323.
- [29]. **Bannister, M.K.**, 2004. Development and application of advanced textile composites. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: *Journal of Materials Design and Applications*, 218(3), 253-260.
- [30]. **Mahadik, Y., Brown, K.A.R. and Hallett, S.R.**, 2010. Characterisation of 3D woven composite internal architecture and effect of compaction. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 41(7), 872-880.
- [31]. **Karataş Altın, M., Gökkaya, H.**, 2018. A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials, *Defence Technology*, 14, 318-326.
- [32]. **Safari, H., Karevan, M. ve Nahvi, H.**, 2018. 0 Mechanical characterization of natural nano-structured zeolite/polyurethane filled 3D woven glass fiber composite sandwich panels, *Polymer Testing*, 15, 284-294.
- [33]. **Baba, B.O.**, 2017. Curved sandwich composites with layer-wise graded cores under impact loads. *Composite Structures*, 159, 1-11.
- [34]. **Badawi, S.S.**, 2015. Development of the weaving machine and 3D woven spacer fabric structures for lightweight composites materials, PhD Thesis, Technische Universität Dresden.
- [35]. **Karahan, M., Lomov, S.V., Bogdanovich, A., Verpoest, I.**, 2013. Fatigue behavior of carbon/epoxy composites reinforced with 3-Dimensional woven fabric, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 19, 310-318.
- [36]. **Abbas, W.A., Gorgis, I.N., Moneem, N.**, 2018. Impact strength for the 3D textiles fiber reinforced cementitious composites plates, *Iraqi Journal of Civil Engineering*, 12, 96-109.
- [37]. **Zeybek, F.**, 2018. Üç boyutlu dokuma ve örme kumaşlar ile takviye edilen kompozit malzeme yapıları, *Akademia Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 4, 25-35.

- [38]. **Potluri, P. and Thammandra, V.S.**, 2007. Influence of uniaxial and biaxial tension on meso-scale geometry and strain fields in a woven composite. *Composite Structures*, 77(3), 405-418.
- [39]. **Topal, S., Baiocchi, L., Crocombe, A.D., Ogin, S.L., Potluri, P., Withers, P.J., Quaresimin, M., Smith, P.A., Poole, M.C. and Bogdanovich, A.E.**, 2015. Late-stage fatigue damage in a 3D orthogonal non-crimp woven composite: An experimental and numerical study. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 79, 155-163.
- [40]. **Umer, R., Alhussein, H. , Zhou J. and Cantwell, W.J.** 2016. The mechanical properties of 3D woven composites. *Journal of Composite Materials*, 1(2), 0-14.
- [41]. **Guénon, V.A., Chou, T.-W. and Gillespie, J.W.** 2009. Toughness properties of a three-dimensional carbon-epoxy composite. *Journal of Materials Science*, 24(11), 4168-4175.
- [42]. **Brandt, J., Drechsler, K. and Arendts, F.J.**, 2006. Mechanical performance of composites based on various three-dimensional woven-fibre preforms. *Composites Science and Technology*, 56(3), 381-386.
- [43]. **Saleh MN, Wang Y, Yudhanto A, Joesbury A, Potluri P, Lubineau G, et al.** 2016. Investigating the potential of using off-axis 3D woven composites in composite joints' applications. *Applied Composite Materials*. 24, 377-396.
- [44]. **McHugh C.** 2009. Creating 3-D, One piece, woven carbon preforms using conventional weaving and shedding. *SAMPE Journal*, 45, 33-41.
- [45]. **Chen X, Chen X, Taylor LW, Tsai L.** 2011. An overview on fabrication of three- dimensional woven textile preforms for composites. *Textile Research Journal*. 81, 932-944.
- [46]. **EL-Dessouky H, Snape A, Tew H, Scaife R, Modi DK, Kendall K, et al.** 2016. Design, weaving and manufacture of a large 3d composite structure for automotive applications. *The 7th World Conference on 3D Fabrics and Their Applications*. 2(4), 16-29.
- [47]. **Hemrick JG, Lara-Curzio E, Loveland ER, Sharp KW, Schartow R.**, 2011. Woven graphite fiber structures for use in ultra-light weight heat exchangers. *Carbon* 49, 4820-4829.

- [48]. **Ansar M, Xinwei W, Chouwei Z.**, 2011. Modeling strategies of 3D woven composites: A reviewn. *Composite Structures*, 93, 1947-1963.



ÖZGEÇMİŞ

Sümeyye ERDEM 1993 yılında Islahiye’de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya’da tamamladı. 2011 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nü kazanarak 2015 yılında mezuniyet dönem üçüncüsü olarak mezun oldu. 2015 yılında Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

