

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK HIZLI DARBEYE MARUZ CAM FİBER
TAKVİYELİ TERMOPLASTİK
KOMPOZİTLERİN TAMİR YÖNTEMLERİ



Veysel Erdem ZORER

Eylül, 2019
İZMİR

DÜŞÜK HIZLI DARBEYE MARUZ CAM FİBER TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN TAMİR YÖNTEMLERİ

Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı

Veysel Erdem ZORER

Eylül, 2019

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

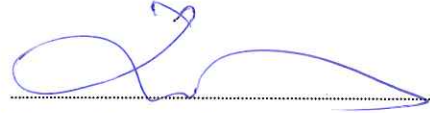
VEYSEL ERDEM ZORER, tarafından DR. ÖĞR.ÜYESİ OKAN ÖZDEMİR yönetiminde hazırlanan “DÜŞÜK HIZLI DARBEYE MARUZ CAM FİBER TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN TAMİR YÖNTEMLERİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Dr. Öğr. Üyesi Okan ÖZDEMİR

Yönetici


Doç. Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi


Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Fadıl SOYKÖK

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Kadriye ERTEKİN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda vermiş olduğu destekten ötürü danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Okan ÖZDEMİR'e teşekkür ediyorum.

Deneysel çalışmalarım sırasında desteğini esirgemeyen Mekanik Test Laboratuvarı teknisyeni Canip DURAK'a teşekkür ediyorum. Ayrıca tez çalışmalarımızın aynı döneme denk geldiği ve bu süre içerisinde çok güzel bir arkadaşlık kurduğumuzu düşündüğüm Halis KANDAŞ'a ve Samir AĞAYEV'e teşekkür ederim.

Son olarak, hayatım boyunca desteklerini benden esirgemeyen çok değerli aileme ve yoğun çalışmalarım sırasında verdiği destek ve anlayışından dolayı sevgili Merve TEKİN'e sonsuz teşekkürler ediyorum.

Veysel Erdem ZORER

DÜŞÜK HIZLI DARBEYE MARUZ CAM FİBER TAKVİYELİ TERMOPLASTİK KOMPOZİTLERİN TAMİR YÖNTEMLERİ

ÖZ

Yapılan literatür çalışmalarında, termoplastik kompozitlerdeki tamirat işlemi ile ilgili yeterli çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu sebeple, termoplastik kompozitlerin darbe karakteristikleri ve tamirat sonrası malzemelerin darbe karakteristiklerinde ne gibi değişiklikler olduğu deneysel olarak incelenmiştir. Bununla birlikte termoplastik kompozit malzemelerde cam elyaf yoğunluk oranının darbe karakteristiğine etkisi de araştırılmıştır. Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit malzemeler, Dokuz Eylül Üniversitesi Kompozit Üretim Laboratuvarında, sıcak pres yöntemi ile 100 derece santigrat sıcaklık, 100 kN yük altında 100x100x4 mm formlarında, yüzde 40 ve yüzde 60 cam elyaf yoğunluk oranlarında üretilmiştir.

Kompozitlerin darbe karakteristiklerini incelemek amacıyla, Dokuz Eylül Üniversitesi Kompozit Üretim Laboratuvarı'nda CEAST Fractovis Plus darbe cihazında altı farklı enerji düzeyinde (10, 15, 20, 30, 40, 50J) düşük hızlı darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numunelerin darbeli yüzeyleri 54 mm çapındaki bir matkap ağzı ile boşaltılmış ve boşaltılan yüzeylere malzeme ile aynı cam elyaf yoğunluğuna sahip dolgu malzemesi eklenmiştir. Daha sonra hasar bölgelerinin alt ve üst yüzeylerine 2'şer adet 54x54 mm boyutlarında tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen lamine malzemeler 0 ve 90 derece açı dizilimlerinde yerleştirilmiştir ve sıcak pres yöntemi ile 100 derece santigrat sıcaklık, 100 kN yük altında üretimleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra granül ile üretilmiş numuneler ile aynı şartlarda darbe testlerine tabi tutulmuştur. Bu işlemlerin sonucunda kompozitlerin darbe karakteristiklerinde cam elyaf artışına ve tamirat işlemine bağlı olarak yaşanan değişimler incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, sonuçlar bölümünde özetlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Cam elyaf, düşük hızlı darbe testi, kompozitlerin tamirata, polipropilen, termoplastik kompozitler

REPAIR METHODS OF GLASS FIBER REINFORCEMENT THERMOPLASTIC COMPOSITES SUBJECTED TO LOW VELOCITY IMPACT

ABSTRACT

Literature studies have shown that there is not enough work on repairing thermoplastics composites. With this reason, the impact characteristics of the thermoplastic composites and the changes in the impact characteristics of the materials after repair were experimentally investigated. However, the effect of glass fiber density rate on the impact characteristics of thermoplastic composite materials was also investigated. Glass fiber reinforced polypropylene composite materials were produced for two glass fiber density rates (40 percent and 60 percent) in the Composite Production Laboratory of Dokuz Eylul University by hot press method (at 100 degrees temperature at 100 kN load) in 100x100x4 mm forms.

In order to investigate the impact characteristics of composites, low velocity impact tests were carried out in the Composite Production Laboratory of Dokuz Eylul University at CEAST Fractovis Plus impact device for six energy level (10, 15, 20, 30, 40, 50J). Then, two pieces 54x54 mm uniaxial fiberglass reinforced polypropylene laminated materials were placed on the top and bottom surfaces of the damage zones at 0 and 90 degree angles and produced by hot press method under 100 degree centigrade temperature, 100 kN load. Then, repaired composites were subjected to low velocity impact tests under the same conditions as composite samples produced with granules. After these processes, changes in impact characteristics of composites were investigated due to glass fiber increase and repair process. The results obtained from the study summarized in the results section.

Keywords: Glass fiber, low velocity impact test, repair of composites, polypropylene, thermoplastic composites

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ.....	xv
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
1.1 Kompozitlerin Tanımı	2
1.2 Kompozitlerin Önemi.....	3
1.3 Kompozitlerin Tarihi	4
BÖLÜM İKİ – KOMPOZİTLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER	6
2.1 Kompozitlerin Uygulama Alanları	6
2.2 Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları.....	7
2.3 Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	9
2.3.1 Takviye Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması.....	9
2.3.2 Matris Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması	12
2.3.2.1 Metal Matrisli Kompozitler	12
2.3.2.2 Seramik Matrisli Kompozitler	13
2.3.2.3 Polimer Matrisli Kompozitler	14
2.3.2.3.1 Polimer Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması	16
2.4 Termoplastik Kompozitlerin Üretim Yöntemleri.....	19
2.4.1 Termal Şekillendirme	20
2.4.2 Basınçlı Kalıplama	20
2.4.3 Enjeksiyonlu Kalıplama	22
2.4.3.1 Pistonlu Enjeksiyonlu Kalıplama.....	22

2.4.3.2 Döner Vidalı Enjeksiyonlu Kalıplama.....	23
2.4.4 Şişirmeli Kalıplama	24
2.4.5 Pultrüzyon.....	24
2.5 Literatür Taraması	25
BÖLÜM ÜÇ – ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER.....	30
3.1 Polipropilen	30
3.1.1 Polipropilenin Avantajları ve Dezavantajları	32
3.1.2 Polipropilenin Kullanım Alanları	33
3.2 Cam Elyaf.....	34
3.2.1 Uzun Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Granül	36
3.3 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Lamine	39
BÖLÜM DÖRT – DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
4.1 Çalışmada Kullanılan Cihazlar	41
4.1.1 Fontijne LabEcon 600 Pres Cihazı	41
4.1.2 CEAST Fractovis Plus Darbe Cihazı.....	42
4.2 Kompozit Numune Üretimi.....	43
4.3 Kompozit Numunelerin Deney İçin Hazırlanması	45
4.4 Düşük Hızlı Darbe Deneyi	45
4.4.1 Düşük Hızlı Darbelerde Hasar Modları.....	46
4.4.1.1 Matris Hasarı.....	47
4.4.1.2 Elyaf Ayrılması (Delaminasyon)	47
4.4.1.3 Fiber Kırılması	48
4.4.1.4 Nüfuziyet ve Delinme	48
4.5 Kompozit Malzemelerin Tamirâtı	48
4.5.1 Kompozitlerin Tamirat Yöntemleri	49
4.5.1.1 Koruyucu Bant Yöntemi	50
4.5.1.2 Reçine İnfüzyon Yöntemi	50
4.5.1.3 Dolgu Yama Yöntemi	50

4.5.1.4 Civatalama ile Tamirat Yöntemi.....	51
4.5.2 Uzun Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Tamiratı	52
BÖLÜM BEŞ – DENEY SONUÇLARI	56
5.1 Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrileri	56
5.1.1 Sadece Granülden Oluşmuş %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrileri....	57
5.1.2 Kritik Enerji Değerlerinde Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrilerinin Cam Elyaf Yoğunluk Değişimi Açısından İncelenmesi	59
5.1.3 Lamineli Tamiratlı %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrileri.....	62
5.1.4 Kritik Enerji Değerlerinde Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrilerinin Tamirat İşlemi Açısından İncelenmesi	64
5.2 Ortalama Değerler Kullanılarak Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi	66
5.2.1 Maksimum Temas Kuvveti – Darbe Enerjisi Eğrilerinin İncelenmesi....	67
5.2.2 Maksimum Yer Değiştirme – Darbe Enerjisi Eğrilerinin İncelenmesi ...	71
5.2.3 Temas Süresi – Darbe Enerjisi Eğrilerinin İncelenmesi.....	76
5.3 Enerji-Zaman Eğrileri.....	81
5.3.1 Sadece Granülden Oluşmuş %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Enerji-Zaman Eğrileri	81
5.3.2 Kritik Enerji Seviyelerinde Kompozitlerin Enerji-Zaman Eğrilerinin Cam Elyaf Yoğunluk Değişimi Açısından İncelenmesi.....	83
5.3.3 Lamineli Tamiratlı %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Enerji-Zaman Eğrileri	84
5.3.4 Kritik Enerji Seviyelerinde Kompozitlerin Enerji-Zaman Eğrilerinin Tamirat İşlemi Açısından İncelenmesi.....	85
5.4 Enerji Profili Metodu.....	87
5.5 Kompozitlerde Darbe Testleri Sonrasında Oluşan Hasar Bölgelerinin İncelenmesi	91

BÖLÜM ALTI – SONUÇLAR	97
KAYNAKLAR	100
EKLER.....	106



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 Cam elyaf-epoksi matrisli kompozitlerden yapılmış rüzgâr gülü.....	2
Şekil 1.2 Kompozit malzemelerin bileşenleri	3
Şekil 1.3 Olszyna köyünde bulunan bir kilise duvarı	5
Şekil 2.1 Airbus A380’de kompozit malzeme kullanımı.....	7
Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması	9
Şekil 2.3 Süreksiz fiber türlerinin şematik gösterimi a) kırılmış ve b) keçe	10
Şekil 2.4 Sürekli fiber türlerinin şematik gösterimi a) tek eksenli, b) örgülü ve c) sarmal fiber.....	10
Şekil 2.5 Çeşitli takviye yapılı a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabaka yapılı, d) hibrit yapılı ve e) dolgulu yapılı kompozitlerin şematik görünümü	11
Şekil 2.6 Kısa fiber takviyeli alüminyum alaşımlı metal matrisli kompozitten yapılmış piston kafası.....	13
Şekil 2.7 Boeing Dreamliner için seramik matrisli kompozitlerden yapılmış GEnx jet motoru.....	14
Şekil 2.8 Polimer matrisli kompozitler (termoplastikler) kullanılarak Audi A8’de ağırlık azaltma	16
Şekil 2.9 Termoset polimerlerin moleküler yapıları	17
Şekil 2.10 Termoplastik polimerlerin moleküler yapıları	18
Şekil 2.11 Termoplastiklerin moleküler yapılarının gösterilişi a) amorf ve b) yarı-kristal yapılı	19
Şekil 2.12 Çeşitli termal şekillendirme ile kalıplamanın şematik görüntüleri.....	20
Şekil 2.13 Basınçlı kalıplama makinesini şematik görünümü	21
Şekil 2.14 Basınçlı kalıplama yönteminde işlem sırası.....	21
Şekil 2.15 Pistonlu enjeksiyon kalıplamanın şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.16 Döner vidalı enjeksiyon kalıplamanın şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.17 Şişirmeli kalıplama yönteminin şematik gösterimi	24
Şekil 2.18 Pultrüzyon yönteminin şematik gösterimi	25
Şekil 3.1 İzotaktik, sindiyotaktik ve ataktik formlarda PP polimer molekülleri.....	31

Şekil 3.2 Farklı polipropilen türlerinin a) elastisite modülü ve b) darbe dayanımı değerleri	31
Şekil 3.3 Araba kaporta parçalarında polipropilen kullanımı a) far taşı, b) kalorifer gövdesi, c) havalandırma kafesi d) hava deflektörü ve e) akü kutusu.....	33
Şekil 3.4 Cam elyaf üretim süreci	35
Şekil 3.5 Cam elyaf uzunluğunun PP'in mekanik özellikleri üzerindeki etkisi.....	36
Şekil 3.6 Uzun cam elyaf takviyeli PP'den üretilmiş otomobil bagaj paneli	37
Şekil 3.7 a) Kaplama ve b) pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller	38
Şekil 3.8 Pultrüzyon yöntemi ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen üretimi	38
Şekil 4.1 Numune üretiminde kullanılan Fontijne markasının LabEcon 600 serisine ait pres cihazı	42
Şekil 4.2 CEAST Fractovis Plus darbe cihazı a) dış gösterim ve b) iç gösterim.....	43
Şekil 4.3 Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin üretim şeması	44
Şekil 4.4 100x100 mm ebatında uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit....	45
Şekil 4.5 Kompozit malzemelerde darbe sonucu oluşan hasar modları.....	46
Şekil 4.6 Matris çatlağı a) çekme ve b) kayma	47
Şekil 4.7 Dolgu yama uygulaması	51
Şekil 4.8 Civatalama tamirat yöntemi uygulaması	52
Şekil 4.9 Tamirat işlemi öncesi kalıplama	53
Şekil 4.10 a) Silika kumaş kaplaması ve b) tamiratlı numune.....	54
Şekil 4.11 Lamineli tamirat işlemi uygulanmış numunelerde işlem sırası	55
Şekil 5.1 Örnek temas kuvveti-yer değiştirme eğrisi.....	57
Şekil 5.2 Sadece granülden oluşmuş %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri.....	58
Şekil 5.3 Sadece granülden oluşmuş %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri.....	59
Şekil 5.4 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 10 J darbe enerjisi altındaki temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri.....	60

Şekil 5.5 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 15 J darbe enerjisi altındaki temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri.....	61
Şekil 5.6 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 40 J darbe enerjisi altındaki temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri.....	62
Şekil 5.7 Lamineli tamiratl %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri	63
Şekil 5.8 Lamineli tamiratl %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri	64
Şekil 5.9 %40 cam elyaf takviyeli a) sadece granülden oluşmuş ve b) lamineli tamiratl polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri.....	65
Şekil 5.10 %60 cam elyaf takviyeli a) sadece granülden oluşmuş ve b) lamineli tamiratl polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri	66
Şekil 5.11 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin maksimum temsa kuvveti-darbe enerjisi eğrileri	67
Şekil 5.12 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi eğrileri	69
Şekil 5.13 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi eğrileri	70
Şekil 5.14 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri	72
Şekil 5.15 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri	73
Şekil 5.16 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri	75

Şekil 5.17 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin temas süresi-darbe enerjisi eğrileri.....	76
Şekil 5.18 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin temas süresi-darbe enerjisi eğrileri	78
Şekil 5.19 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin temas süresi-darbe enerjisi eğrileri	80
Şekil 5.20 Örnek enerji-zaman grafiği	81
Şekil 5.21 Sadece granülden oluşmuş %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları	82
Şekil 5.22 Sadece granülden oluşmuş %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları	83
Şekil 5.23 Lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları	84
Şekil 5.24 Lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları	85
Şekil 5.25 Örnek enerji profili diyagramı	88
Şekil 5.26 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri.....	89
Şekil 5.27 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri.....	90
Şekil 5.28 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri.....	91
Şekil 5.29 Sadece granülden oluşmuş %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin çeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası görüntüsü.....	92

Şekil 5.30 Sadece granülden oluşmuş %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin çeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası görüntüsü.....	93
Şekil 5.31 Lamineli tamiratlı %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin çeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası görüntüsü	94
Şekil 5.32 Lamineli tamiratlı %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin çeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası görüntüsü	96



TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Polipropilenin diğer malzemelerle karşılaştırılması: Avantajlar	32
Tablo 3.2 Polipropilenin diğer malzemelerle karşılaştırılması: Dezavantajlar	33
Tablo 3.3 Çeşitli cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri.....	34
Tablo 3.4 Çeşitli cam elyaf türlerinin kimyasal bileşimi	34
Tablo 3.5 %40 ve %60 elyaf oranına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilen mekanik özellikleri	39
Tablo 3.6 Cam elyaf takviyeli polipropilen laminenin mekanik özellikleri	40
Tablo 5.1 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri maksimum temas kuvveti değerleri	68
Tablo 5.2 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri maksimum temas kuvveti değerleri	69
Tablo 5.3 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri maksimum temas kuvveti değerleri	71
Tablo 5.4 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri yer değiştirme miktarları	72
Tablo 5.5 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri yer değiştirme miktarları.....	74
Tablo 5.6 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri yer değiştirme miktarları.....	75
Tablo 5.7 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri temas süresi değerleri	77
Tablo 5.8 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri	

temas süresi değerleri	79
Tablo 5.9 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri temas süresi değerleri	80
Tablo 5.10 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında absorbe ettikleri enerji miktarları	83
Tablo 5.11 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında absorbe ettikleri enerji miktarları	86
Tablo 5.12 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratl %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında absorbe ettikleri enerji miktarları	86

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Teknolojik problemleri çözmek için kompozit malzemeler uzun zamandır kullanılmaktadır; ancak 1960'lı yıllarda bu malzemeler, polimerik bazlı kompozitlerin piyasaya sürülmesiyle başta otomotiv sektörü olmak üzere birçok sektörün dikkatini çekmeye başlamıştır. Daha sonra, kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleri haline gelmiş ve otomotiv parçaları, spor malzemeleri, havacılık ürünleri, tüketim malları, deniz ve petrol endüstrileri gibi çeşitli alanlar için tasarlanmış ve üretilmiştir. Kompozit kullanımındaki büyüme, ürün performansı ile ilgili artan farkındalık ve dünya pazarında hafif malzemelere artan rekabet nedeniyle ortaya çıkmıştır. Tüm malzemeler arasında, kompozit malzemeler, yaygın olarak kullanılan çelik ve alüminyumun yerini alma ve daha iyi performans gösterebilme potansiyeline sahiptir. Çelik bileşenlerin kompozit bileşenlerle değiştirilmesi ile malzemelerde ağırlıkça %60 ile %80, alüminyum bileşenlerin değiştirilmesiyle ise %20 ile %50 oranında tasarruf sağlanabilmektedir (Mazumdar, 2001).

Genel olarak, farklı özelliklere sahip iki veya daha fazla bileşenden ve bileşenler arasındaki ayrı sınırlardan oluşan herhangi bir malzeme, bir kompozit malzeme olarak adlandırılmaktadır. Buna ek olarak, ayrı ayrı bileşenlerle elde edilemeyen özelliklere sahip bir malzeme üretmek için birkaç bileşenin birleştirilmesi fikri, binlerce yıldır insanlar tarafından kullanılmaktadır. Buna bağlı olarak, uzun bir gelişim sürecinin sonucu olarak ortaya çıkan doğal malzemelerin çoğu, kompozit malzemeler olarak ele alınmaktadır (Vasiliev ve Morozov, 2013).

Kompozitler, insan zekasıyla üretilen malzemelerdir. Ayrıca, odun gibi doğada bulunan malzemeler, kendi başlarına doğal polimer kompozit malzemeler olarak kabul edilmektedir. Doğal ve üretilmiş kompozit malzemeler, günümüz dünyasında çok sayıda uygulamalarda bulunmaktadır. İnşaat malzemeleri, otomobil parçaları ve tıbbi cihazlardan uçak gövdelerine ve uzay gemilerine kadar kompozitler, mühendislik malzemeleri ve ürünlerinin genişletilmiş bir evrenini içermektedir. Belirli bir uygulama için istenen malzeme performansına ulaşmak için, bazı kompozitler doğal

oluşumlu kompozit malzemeler ile yapay imalatların bir kombinasyonu ile oluşturulabilmektedir. Şekil 1.1’de geliştirilmiş eğilme özelliklerine sahip 50 m uzunluğunda muazzam elektrik üretim rüzgâr gülü pervaneleri, boyuna dikey yönde ince katmanlı kesilmiş balsa ağacı içeren cam elyaf-epoksi matrisli kompozitlerden yapılmıştır (Stokke, Wu ve Han, 2013).



Şekil 1.1 Cam elyaf-epoksi matrisli kompozitlerden yapılmış rüzgâr gülü (Stokke, Wu ve Han, 2013)

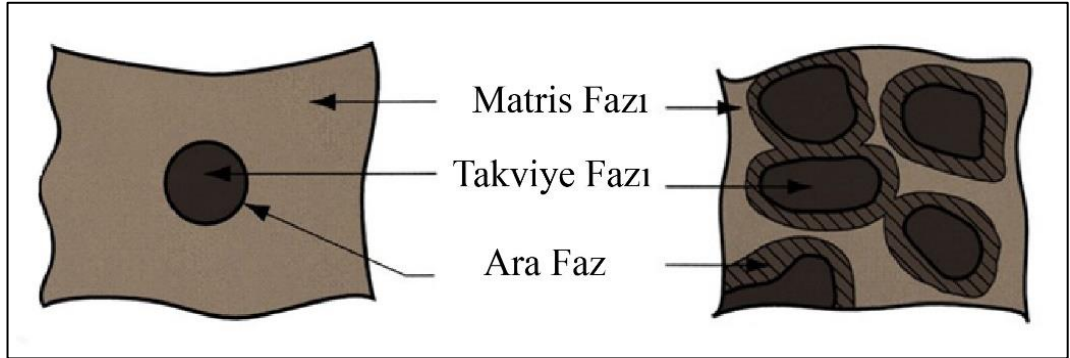
1.1 Kompozitlerin Tanımı

Kompozit malzeme terimindeki *kompozit* kelimesi, geliştirilmiş halde üçüncü bir malzeme oluşturmak için makroskopik ölçekte iki veya daha fazla malzemenin birleştirildiğini belirtmektedir (Jones, 2014).

Bir kompozit malzeme oluşturarak yorulma ömrü, sertlik, rijitlik, korozyon ve aşınma dayanımı, ısı ve ses yalıtımı, termal iletkenlik, ağırlık ve zamana bağlı davranış gibi özellikler geliştirilmektedir. Doğal olarak, bu özelliklerin hepsi aynı zamanda geliştirilemez ve genellikle bunu yapmak için herhangi bir gereksinim yoktur. Aslında,

bu özelliklerden bazıları, örneğin ısı yalıtımı ile termal iletkenlik birbiriyle çelişmektedir. Amaç ilgili tasarımın görevini yerine getirmek için gerekli özelliklere sahip bir malzeme elde etmektir (Jones, 2014).

Kompozit malzemeler, Şekil 1.2’de gösterildiği üzere *matris* ve *takviye fazı* olmak üzere iki ana fazdan ve onların arasında bulunan ara fazdan oluşmaktadır. Kompozitlerde sürekli olarak tanımlanan ve daha fazla bulunan bileşen olan matris fazının iki önemli rolü vardır. İlk olarak, takviye fazını yerinde tutar. İkinci olarak, uygulanan bir kuvvet altında yükü takviye bileşenlerine transfer ederek tabakalar arası kayma dayanımını sağlar. Bazen matrisin kendisi de bir takviye edici eleman rolü oynamaktadır. Bu durum, metal matris kompozitlerde meydana gelmektedir. Diğer durumlarda, matris fazı ısıya ve soğuğa karşı dayanıklı olmak zorunda kalmaktadır. Ayrıca, matris fazı kompozitlerde termal iletkenliği veya ısı yalıtımını sağlamakta, nemden uzak tutmakta ve korozyona karşı korumaktadır. Takviye fazı, bir kompozitin temel yük taşıyıcı elemanıdır. Bu nedenle, kompozitlerin özelliklerine takviye fazının oryantasyonu karar vermektedir (Hu, 2012). Ara faz ise, matris fazı ile takviye fazı arasındaki yapışmayı belirlemektedir.



Şekil 1.2 Kompozit malzemelerin bileşenleri (Mechscience, 2016)

1.2 Kompozitlerin Önemi

Kompozit teknolojisi ve bilimi, yapısal analiz ve tasarım, malzeme mekaniği, malzeme bilimi ve süreci gibi çeşitli bilim dallarının karşılıklı olarak etkileşimlerine gerek duymaktadır. Kompozitler üzerine yapılan araştırmaların hedefleri, kompozit malzemelerin ve bileşenlerin temel özelliklerini araştırmak, etkili ve verimli üretim

yöntemleri geliştirmek, hizmet koşullarına yönelik malzemeyi optimize etmek, malzeme özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak, malzeme özelliklerini belirlemek, analitik yöntemlerle yapısal davranışı tahmin etmek ve böylece malzeme özelliklerinin belirlenmesi, hasar ve stres analizi için etkili deneysel teknikler geliştirmektir (Daniel ve Ishai, 1994).

Yüksek sıcaklıklarda çalışabilen yapısal tasarımlar ve sistemler, seramik/matris, metal/seramik ve karbon/karbon kompozitleri gibi yüksek sıcaklıktaki kompozitleri yoğun araştırmalara teşvik etmiştir. Geleneksel ve yeni kompozit malzemelerin kullanımı, imalat yöntemlerinin geliştirilmesi ile yakından ilişkilidir. Üretim süreci, nihai ürün kalitesinin sağlanmasında ve özelliklerinin kontrol edilmesinde en önemli aşamalardan biridir. Halen gelişmekte olmasına rağmen, kompozit malzemeler teknolojisi bir olgunluk seviyesine ulaşmıştır. Bununla birlikte, sürekli olarak gelişen endüstriyel alanlar ve talepler nedeniyle geleceğe yönelik beklentiler parlaktır. Otomotiv endüstrisi gibi büyük hacimli sektörler kompozit kullanımını geniş ölçüde arttırmaktadır (Hu, 2012).

1.3 Kompozitlerin Tarihi

Malzemeler, insanlar için yaşam standartlarını iyileştirmek için temel oluşturmaktadır. Onlar, insan gelişiminde kilometre taşları sağlamaktadırlar. İnsanlar binlerce yıldır malzemelere erişim sağlamak ve kullanmaktadır. İnsan uygarlığı tarihine bakıldığında, gelişimin insanların sosyal üretici güçler, bilim ve teknoloji kullanarak malzemeye erişmesi ve kullanımı ile ilgili olduğu görülmektedir. Yeni bir çıkır açan malzeme meydana çıktığında, üretkenlik de büyük bir gelişme alacak ve insan toplumu da ilerleyecektir. Bu nedenle, malzemeler insan uygarlığının ilerleyişinin bir simgesi haline gelmiş ve insanlık tarihinin bölünme dönemleri için kilometre taşları haline gelmiştir. Kompozit tarihine bakıldığında, insan uygarlığı Taş Devri, Tunç Çağı ve Demir Çağından beri kompozit malzemeleri kullanmaktadır. XX. yüzyılda ortaya çıkan yüksek performanslı plastikler ve kompozitler, ülke ekonomisine ve insanların yaşam standartlarına tarihte nadir görülen bir gelişme oranıyla girmiştir. Günümüzde, bilim ve teknolojinin hızla gelişmesiyle birlikte,

kompozitler ülke ekonomisinde ve savunmasında önemli bir rol oynamaktadır (Wang, Zheng, ve Zheng, 2011).

Kompozit malzemeler beşeri faaliyetine uygarlığın başlangıcından itibaren eşlik etmiştir. Doğal yapıların yanı sıra, insanlar ilk çağlarda bile ahşap gibi çeşitli yapılarda kullanılan çok bileşenli malzemeler icat etmişlerdir. Eski zamanlardaki kompozitlerin en mükemmel uygulamalarından biri, tek bir yapıya dahil edilmiş farklı malzemelerle dayanıklılığı ve rijitliği sağlanan Çin Seddi olmuştur. Orta Avrupa’da geliştirilen ve popüler hale getirilen bir sonraki uygulama, tuğlalarla dolu ahşap iskeleti birleştiren Orta Çağlarda Prusya duvarı olarak da bilinen kompozit duvarlardır. Prusya duvarına örnek olarak Şekil 1.3’de gösterilen güney Wielkopolskanın Olszyna köyünde bulunan bir kilise duvarını gösterebiliriz.



Şekil 1.3 Olszyna köyünde bulunan bir kilise duvarı (Trekearth, 2005)

Modern kompozitler tarihinin en önemli kilometre taşlarından biri ise, on dokuzuncu yüzyılın sonunda Fransa’daki çelik çubuklarla güçlendirilmiş betonun uygulanması olmuştur.

BÖLÜM İKİ

KOMPOZİTLER HAKKINDA GENEL BİLGİLER

2.1 Kompozitlerin Uygulama Alanları

Kompozit malzemelerin kullanımı gün geçtikçe artarak yaygın hale gelmektedir. Yeni business jetlerden (iş jetleri) bazılarının neredeyse tamamı kompozit uçak gövdelerinden oluşmaktadır. Hem küçük hem de büyük ticari hava araçlarında ağırlığı azaltmak ve yakıt performansını artırmak için kompozit malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Askeri hava araçlarında ağırlık, performans ve taşıma kapasitesi gibi faktörlerden en önemlisidir ve kompozitler genellikle uçak gövde ağırlıklarında %20 ile %30 oranında tasarruf sağlamaktadırlar. Ayrıca kompozitler hem tekrar kullanılabilen hem de tek seferlik fırlatma araçlarında ve uydu yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Campbell, 2003).

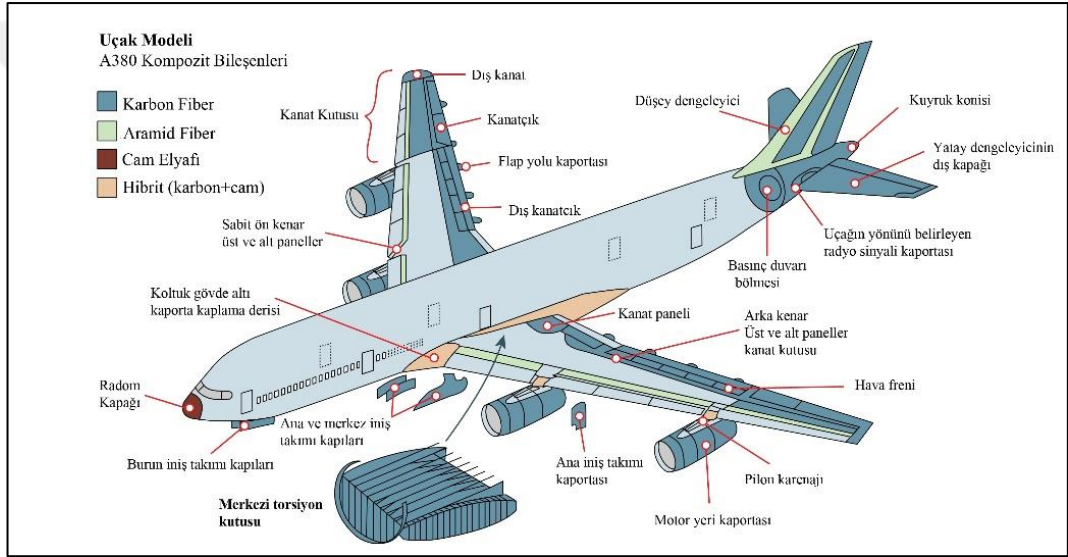
Büyük otomobil üreticileri, performans ve ağırlık gereksinimlerinin yanı sıra pürüzsüz bir şekilde kalıplanmış bileşenler elde edebilmek için kompozitlere yönelmektedirler. Maliyet, ticari taşımacılık için en önemli faktörlerden biri olduğundan, kompozitler onlara daha düşük ağırlık ve daha düşük bakım maliyetleri sunmaktadır (Campbell, 2003).

Yollar ve köprü altyapılarını geliştirmek için kompozit kullanmak nispeten yeni ve heyecan verici bir uygulamadır. Dünya yollarının ve köprülerinin birçoğu kötü bir şekilde aşınmış ve sürekli bakım ya da değişim gerektirmektedir. Kompozitler korozyon direncinden ötürü daha az bakım gerektirdiği için daha uzun ömür sağlamaktadırlar. Buna ek olarak, olgun uzun boylu ağaçların sayısı azaldıkça, elektrik kuleleri ve ışık direkleri için kompozit malzemelerin kullanımı büyük ölçüde önem arz etmektedir. Büyük rüzgâr türbinleri için pervaneler elektrik enerjisi üretiminin verimliliğini artırmak için kompozit malzemelerden yapılmaktadır (Campbell, 2003).

Kompozit uygulamalarının hızla büyümesinin birçok nedeni vardır; ancak birincil neden, kompozitler ile üretilen ürünlerin daha güçlü ve hafif olmasıdır. Günümüzde,

kompozit malzemelerin faydalarını kullanmayan herhangi bir endüstri bulmak zordur. Kompozit malzemelerin en büyük kullanıcısı, 2000 yılında 590 bin ton kompozit tüketen ulaştırma endüstrisi olmuştur. Kompozit malzemeler birçok endüstri için tercih edilen malzemeler haline gelmiştir (Mazumdar, 2001).

Kompozit malzemelerin halihazırdaki kullanımı başlıca olarak havacılık sektörü tarafından. Şekil 2.1’de gösterilen Airbus A380 gibi modern uçak yapılarının büyük bir yüzdesi karbon, cam ve aramid fiberler kullanılarak imal edilmektedir (Abramovich, 2017).



Şekil 2.1 Airbus A380’de kompozit malzeme kullanımı (Abramovich, 2017)

2.2 Kompozitlerin Avantajları ve Dezavantajları

Kompozitler, yüksek performans ve hafifliğe ihtiyaç duyulan uygulamalar için rutin olarak tasarlanmakta ve üretilmektedir. Aşağıda ele alınmış geleneksel mühendislik malzemelerine göre çeşitli *avantajlara* sahiptirler:

- Kompozit malzemeler, parça entegrasyonu imkânı sağlamaktadır. Birkaç metalik bileşen, tek bir kompozit bileşenle değiştirilebilmektedir (Mazumdar, 2001).
- Kompozit malzemeler yüksek korozyon direncine sahiptir. Demir ve alüminyum, su ve hava ortamında korozyona uğrar, özel kaplamalar ve

alaşımlar gerektirir. Kompozitlerin dış yüzeyleri plastikler tarafından oluşturulduğunda, çok iyi korozyon ve kimyasal direnç sağlamaktadırlar (Mazumdar, 2001).

- Kompozit malzemeler artan tasarım esnekliği sunmaktadır. Örneğin, kompozit yapıların termal genleşme katsayısı uygun materyaller ve yerleştirme dizisi seçilerek sifra indirilebilmektedir. Kompozitlerin termal genleşme katsayısı metallere göre çok daha düşük olduğu için, kompozit yapılar daha iyi boyutsal kararlılık sağlamaktadırlar (Mazumdar, 2001).
- Net-şekilli (*net-shape*) veya yakın-net-şekilli (*near net-shape*) parçalar kompozit malzemelerle üretilebilmektedir. Bu özellik birkaç talaşlı şekillendirme işlemini ortadan kaldırmakta ve böylece işlem döngüsü süresini ve maliyetini azaltmaktadır (Mazumdar, 2001).
- Bazen üretilmesi metallerle mümkün olmayan karmaşık görünümlü ve özel konturlu parçalar, ayrı ayrı parçaları kaynaklamadan veya perçinlemeden kompozit malzemeler kullanılarak imal edilebilmektedir. Bu daha fazla üretim fizibilitesi sunarak, verimliliği artırmakta ve üretim sürelerini azaltmaktadır (Mazumdar, 2001).
- Kompozit malzemeler, imalat ve montaj için tasarım teknikleri açısından daha fazla fizibilite sunmaktadır. Bu teknikler, bir üründeki parça sayısını en aza indirmeye yardımcı olmakta ve böylece montaj ve birleştirme sürelerini azaltmaktadır. Bağlantıları ortadan kaldırarak, yüksek mukavemetli yapısal parçalar daha düşük maliyetlerle üretilebilmektedir (Mazumdar, 2001).

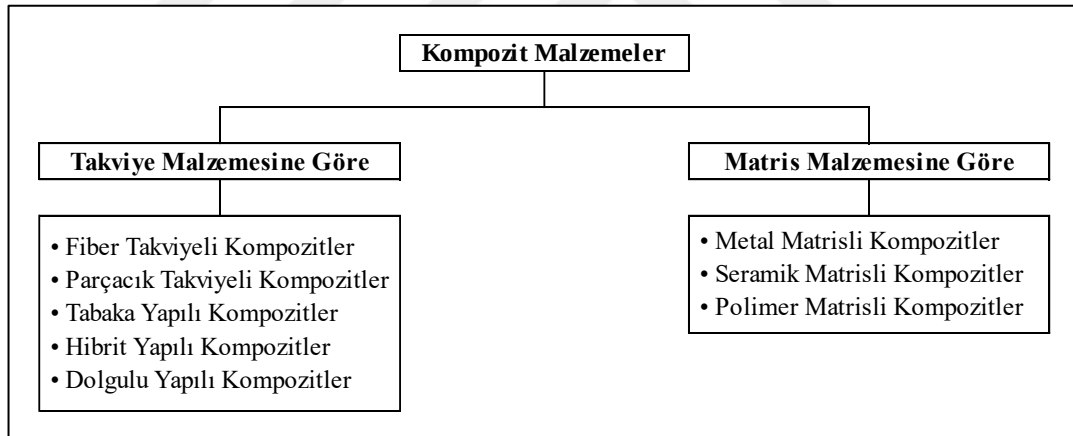
Kompozit malzemeler birçok avantaj sunmalarının yanı sıra, aşağıdaki dezavantajlara sahiptirler:

- Ürünleri malzemelerle tasarlanmanın klasik yolu, makine ve malzeme el kitaplarının, tasarım ve veri el kitaplarının kullanımına bağlıdır. Metaller için geniş tasarım veri tabanları mevcut olmasına karşın, veri tabanı eksikliğinden dolayı kompozit parçaların tasarlanması zor hale gelmektedir (Mazumdar, 2001).
- Kompozitler metallere yapışmazlar. Fırınlamadan kullanılmaları oldukça zordur (Mazumdar, 2001).

- Hava ve nem, kompozit malzemelerin mekanik özelliklerini ve yorulma dirençlerini olumsuz yönde etkilemektedir (Mazumdar, 2001).
- Üretimleri diğer malzemelerle kıyaslandığında nispeten pahalıdır (Mazumdar, 2001).

2.3 Kompozitlerin Sınıflandırılması

Son yıllarda malzemeler arasındaki önemli gelişmelerde kompozit malzemeler de bulunmaktadır. Aslında, kompozitler günümüzde en önemli mühendislik malzemelerinden birisidir, çünkü geleneksel malzemelere kıyasla çok çeşitli özelliklere sahiptirler. Kompozit malzemeleri sınıflandırmanın birçok yolu vardır; ancak onların sınıflandırılmaları sonsuz denilebilecek kadar fazla olduğundan yaygın sınıflandırılmalar üzerinde durulmuştur. Şekil 2.2’de kompozit malzemelerin genel sınıflandırılması gösterilmiştir.

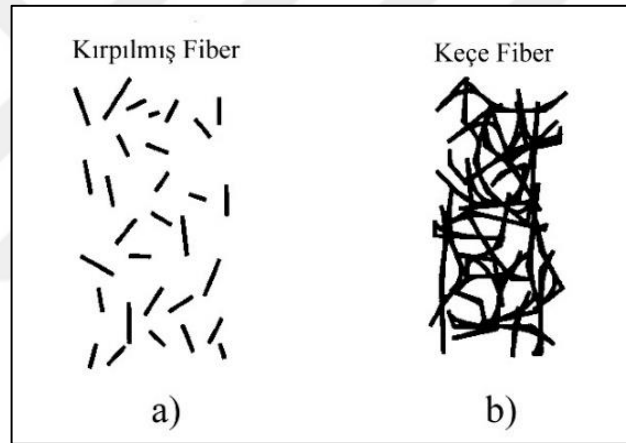


Şekil 2.2 Kompozit malzemelerin sınıflandırılması (Balasubramanian, 2013)

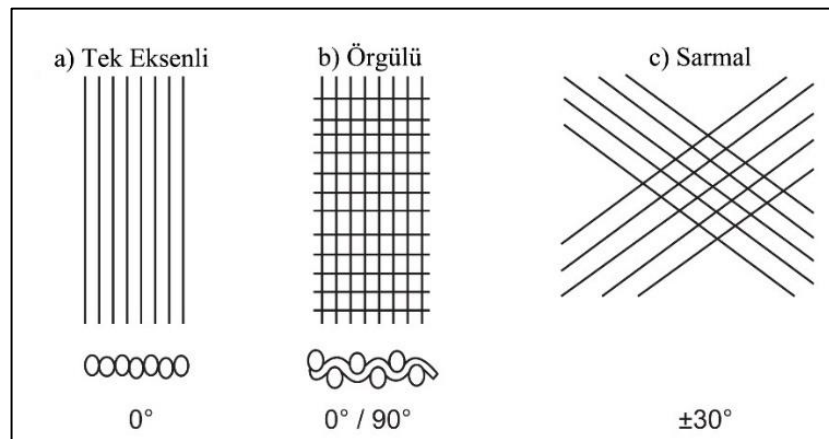
2.3.1 Takviye Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Kompozitler, yapı bileşenlerini oluşturan takviye malzemesine göre fiber takviyeli, parçacık takviyeli, tabaka yapılı, hibrit ve dolgulu yapılı kompozitler olmak üzere sınıflandırılabilir.

- Fiber takviyeli kompozitler: Matris malzemesine gömülü halde olan liflerden oluşmaktadır. Bu tür bir kompozitin özellikleri elyaf uzunluğuna göre değişiklik gösteriyorsa, onlar süreksiz veya kısa fiber (Şekil 2.3) takviyeli kompozitler, yapı içinde kesintisiz olarak uzuyorsa onlar sürekli veya uzun fiber (Şekil 2.4) olarak adlandırılmaktadır. Mühendislik uygulamalarında kullanılan malzemelerin birçoğu fiber şeklinde üretildiklerinden mukavemet ve rijitlik değerleri, kütle halindeki değerlerinden fazla olabilmektedir. Örnek vermek gerekirse, karbon fiberlerin rijitlik değeri kütle halindeki grafitten 3 kat, çekme dayanımı ise 50 kat daha yüksektir. Fiberlerdeki bu özellik fark edildikten sonra fiber takviyeli kompozitlerin kullanım süreci başlamıştır (Balasubramanian, 2013).



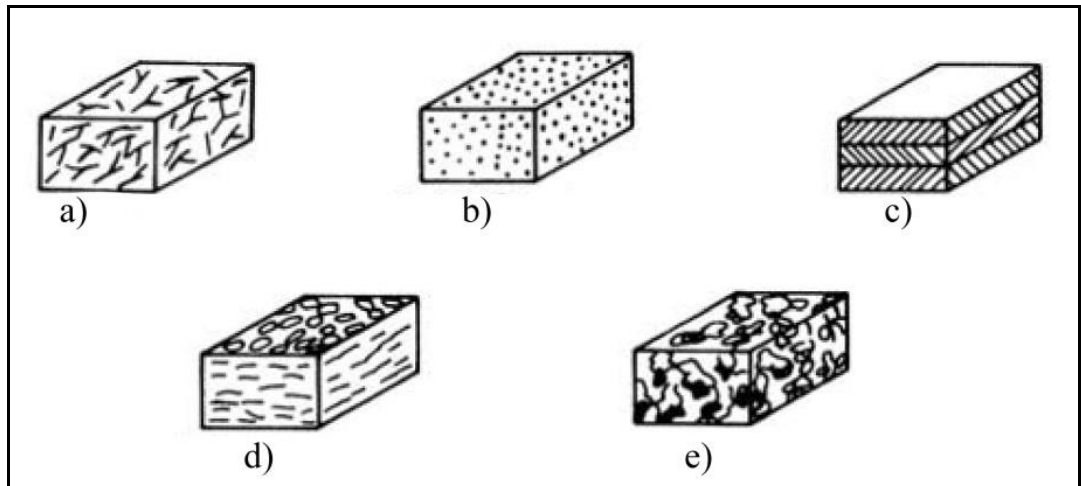
Şekil 2.3 Süreksiz fiber türlerinin şematik gösterimi a) kırpılmış ve b) keçe (Campbell, 2003)



Şekil 2.4 Sürekli fiber türlerinin şematik gösterimi a) tek eksenli, b) örgülü ve c) sarmal fiber (Abramovich, 2017)

- Parçacık (partikül) takviyeli kompozitler: Matris fazı tarafından bir veya iki boyutlu makroskopik parçacıkların veya sıfır boyutlu olarak düşünülen çok küçük mikroskobik parçacıklardan oluşan malzemelerdir.
- Tabaka yapılı (lamine) kompozitler: Matris tarafından bir arada tutulan malzemelerden oluşmaktadır. Yaygın olarak kullanılan ve en eski kompozit tipi olan tabaka yapılı kompozitler farklı özelliğe sahip en az 2 tabakanın bir araya getirilmesiyle oluşturulmaktadır. Tercih edilmelerinin en önemli nedenlerinden biri de ısıya ve neme dayanıklı yapılar olmaları, metallerden daha hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmalarıdır (Balasubramanian, 2013).
- Hibrit yapılı kompozitler: İki veya daha fazla takviye bileşeni, daha iyi özelliklere sahip, hibrit kompozit malzemeler olarak adlandırılan yeni bir malzeme oluşturmak için matris ile birleştirilmektedir. Bu sayede tek bir fiber ile elde edilemeyen özellikler sağlanabilmektedir (Balasubramanian, 2013).
- Dolgulu yapılı kompozitler: Bu kompozit türü, üç boyutlu olup sürekli ve matris malzemesinin üç boyutlu dolgu maddesi ile doldurulması ile elde edilen malzemelerdir (Balasubramanian, 2013).

Şekil 2.5’te çeşitli yapıya sahip kompozitlerin şematik görünümeleri gösterilmiştir.



Şekil 2.5 Çeşitli takviye yapıları a) fiber takviyeli, b) partikül takviyeli, c) tabaka yapılı, d) hibrit yapılı ve e) dolgulu yapılı kompozitlerin şematik görünümü (Vinson ve Sierakowski, 2006)

2.3.2 Matris Malzemesine Göre Kompozitlerin Sınıflandırılması

Bir kompozit içindeki matris malzemesi seramik bazlı, polimer veya metal bazlı olabilir. Matrise bağlı olarak, kompozit malzemeler inorganik metalik olmayan matrisli kompozitler veya seramik matrisli kompozitler (SMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve polimer matrisli kompozitler (PMK) olmak üzere sınıflandırılmaktadır.

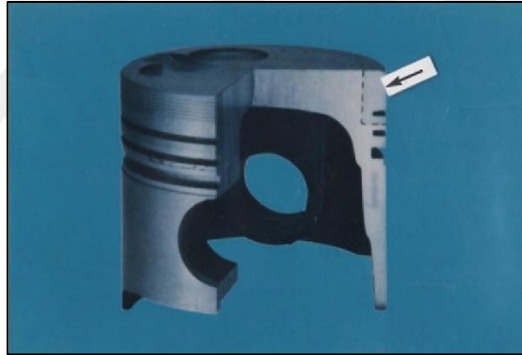
2.3.2.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler, istenen mekanik özellikleri sağlamak için en az biri metal olan iki ve daha fazla malzemenin bir araya getirilmesiyle üretilen malzemelerdir. Metal matrisli kompozitler, ikinci fazın sıkıca derine sabitlendiği ve gerekli özelliklerin iyileştirilmesi için eşit olarak dağıtıldığı bir eleman veya alaşımlı matris içeren bir kompozit sınıfıdır. Kompozitin özelliği, ikinci fazın büyüklüğüne, şekline ve miktarına göre değişmektedir. Metal matrisli kompozitler, dünya çapında büyük bir sanayi ilgisi gören ve yatırım yapılan yeni bir malzeme çeşididir. Mikro yapıları içine ikinci bir fazın veya fazların yapay olarak sokulduğu, sürekli bir metalik fazı ile uyuşan malzemeler olarak tanımlanırlar. Metal matrisli kompozitler, daha geniş çapta geliştirilmiş reçine matris kompozitlerinden fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından ayrılmaktadır. Elektrik iletkenliği, ısı iletkenlik ve yanmazlık, süneklik ve aşınma direnci, kaplanabilme, birleştirilebilme, şekillendirilebilme ve ısı işleme tabi tutulabilen metal matrisli kompozitleri reçine matris kompozitlerinden ayıran özelliklerden bazılarıdır (Hu, 2012).

Metal matrisli kompozitlere önem kazandıran en önemli nedenler bir tanesi takviye edici bileşenlerin termal genleşme katsayısını azaltmaya ve mukavemeti arttırmaya olanak tanımasıdır. Grafitleşmiş karbon fiber kullanımı, termal iletkenliği önemli derecede arttırabilmektedir. Bu nedenle düşük termal genleşme katsayısı ile yüksek termal iletkenliğin kombinasyonu, metal matrisli kompozitleri elektronik ambalajlama için çok çekici hale getirmektedir. İyi termal özelliklerin yanı sıra, düşük yoğunluklu

olmaları onlara havacılık elektroniği ve uzay yapılarında önem kazandırmıştır (Chung, 2012).

Otomotiv alanında metal matrisli kompozitlerin en önemli uygulamalarından bir tanesi dizel motorlarında kullanılan piston kafalarıdır. Bu uygulama, alümina-silika kısa fiberlerinin piston kafasına monte edilmesi ile ortaya çıkmıştır. Sıradan dizel motorlarındaki pistonlar, alaşımlı Al-Si dökümü ile nikelli dökme demirden yapılmış piston kafasından oluşmaktadır. Nikel dökme demirin alüminyum alaşımlı matris kompozitler ile değiştirilmesi, daha hafif, aşınmaya dayanıklı ve daha ucuz bir ürünün elde edilmesi ile sonuçlanmıştır. Şekil 2.6'da alüminyum alaşımlı metal matris kompozitli bir pistonun resmi gösterilmiştir. Şekildeki ok, kısa fiber takviyeli alüminyum alaşımlı kompozit malzemeden yapılmış piston kafasını göstermektedir (Chawla, 2012).



Şekil 2.6 Kısa fiber takviyeli alüminyum alaşımlı metal matrisli kompozitten yapılmış piston kafası (Chawla, 2012)

2.3.2.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik malzemeler genel olarak çok çekici özelliklere sahiptirler. Çok yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve sertlik, kimyasal bozunmazlık ve düşük yoğunluk sergilemektedirler (Chung, 2012).

ABD'nin Ohio eyaletindeki jet motoru mühendislerinin, Boeing Dreamliner Firması için geliştirmiş oldukları seramik matrisli kompozitlerden oluşan yeni bir süper seramik malzemeden yapılmış motor parçaları GE adı verilen bir jet motorunda

kullanılmaktadır. Jet motorlarındaki sıcaklıklar o kadar uç seviyededir ki, yüksek kaliteli titanyum alaşımlarında bile parçalar verimli çalışmak için karmaşık bir soğutma sistemine gerek duymaktadır; ancak seramik matrisli kompozitlerin %20 oranında daha az soğutmaya ihtiyacı vardır. Bu durum, mühendislerin ekstra ısıdan daha fazla güç elde etmesini sağlamaktadır. Soğutma bileşenlerine olan ihtiyaçlar azaltılarak, bu sayede motorların aerodinamik olarak daha verimli ve daha fazla yakıt tasarruflu çalışması sağlanmıştır. Şekil 2.7’de parçaları seramik matrisli kompozitlerden yapılmış GENx jet motoru gösterilmiştir (Ge, 2015).

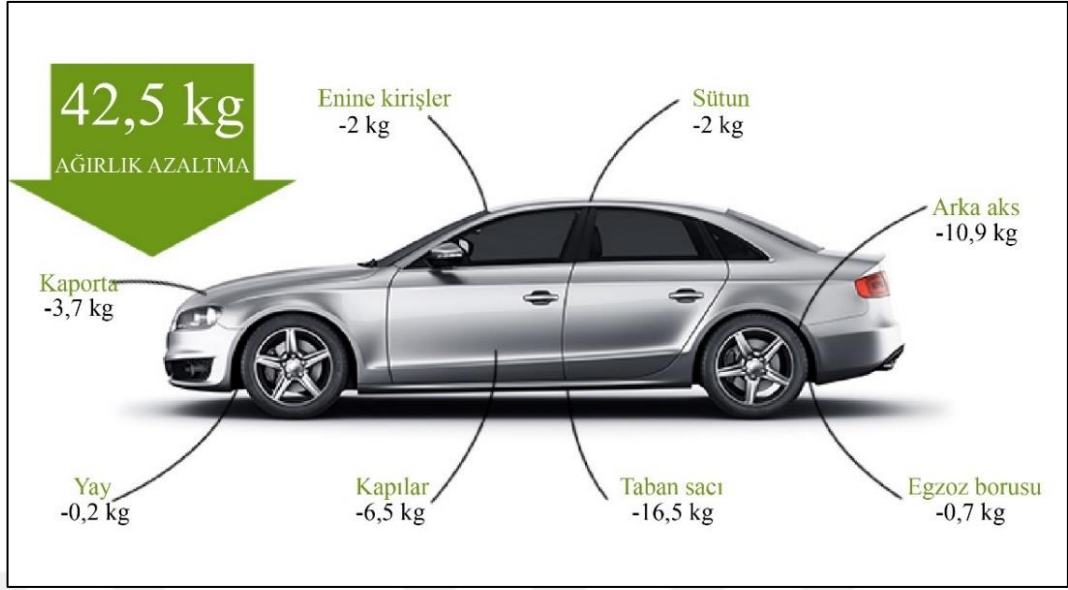


Şekil 2.7 Boeing Dreamliner Firması için seramik matrisli kompozitlerden yapılmış GENx jet motoru (Ge, 2015)

2.3.2.3 Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler, düşük imalat maliyeti nedeniyle hafif olması istenen yapılar olan uçaklar, spor malzemeleri, tekerlekli sandalyeler ve benzeri uygulamalarda kullanılan kompozitlerdir. Polimer matrisli kompozitler geniş çaplı mühendislik uygulamalarında sadece hafiflik ve iyi mekanik özellikler sağladıkları için değil, aynı zamanda insan dokuları ile uyum sağlayabilmesi ve sertlik derecelerinin yapay dokular ve organlar için ayarlanabilir olması nedeniyle metal ve seramik matrisli kompozitler yerine tercih edilmektedir (Chung, 2012).

Aerodinamik, güç aktarım mekanizmalarındaki yenilikler, rejeneratif frenleme ve geliştirilmiş lastikler, otomobil üreticilerinin ürettiği araçlarının hava kirliliğine ayak uydurmasını sağlayan teknolojik çözümlerden sadece birkaç tanesidir. Ancak şu günlerde giderek bir uyarı halini alan başka bir tasarım stratejisi daha vardır. Bu da, “hafif ağırlık (*lightweighting*)” olarak da bilinen araç ağırlıklarının azaltılmasıdır. Artık araçların ağırlığını azaltmak için yüksek mukavemetli çelik, alüminyum, magnezyum ve termoplastik kompozit malzemeler gibi üzerinde çalışılan malzemeler bulunmaktadır. Bu son malzeme sınıfı olan termoplastikler, büyük bir umut vadetmektedir. Bir termoplastik kompozit, bir polimer matrisi içinde cam, karbon veya doğal elyaf takviyesinden oluşabilmektedir. Termoplastik kompozitler, metallerle karşılaştırıldıklarında ağırlık, rijitlik, boyutsal kararlılık ve hasar dayanımı açısından daha iyi sonuçlar sergilemektedir. Dünya çapında otomotiv endüstrisi için termoplastik kompozit üretiminin artmasının olumlu bir sebebi vardır. Termoplastikler artık çelik için istenen ve uygun maliyetli bir alternatif haline gelmiş ve otomobil üreticilerinin karbon dioksit emisyonunu (CO₂) azaltma hedeflerini karşılamada değerli yeni bir müttefik olarak hizmet vermektedir. Küresel ısınmayı yavaşlatmak amacıyla, dünyanın dört bir yanındaki ülkeler, araçlardaki karbon-dioksit emisyonlarını azaltmak için yeni hedefler belirlemektedirler. Bir araçta düşürülecek ortalama 5 kg’lık ağırlığın yılda doğaya 11 kg’dan daha az karbon-dioksit emisyonu sağladığı dikkate alınırsa, 5 kg’lık bir hafifleme 1 ağacın kurtarılması anlamına gelecektir. Dünya üzerinde bir yılda üretilen motorlu araç sayısı hesaba katıldığında ağırlık azaltmanın önem derecesi net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Şekil 2.8’de gösterildiği gibi, büyük otomobil üreticilerinden biri olan Audi markasının A6 serisine ait bir otomobili için DuPont USA firması termoplastik malzemelerin kullanılması ile toplamda yaklaşık olarak 42,5 kg ağırlık azaltma yapmışlardır (Dupont, 2017).



Şekil 2.8 Polimer matrisli kompozitler (termoplastikler) kullanılarak Audi A8’de ağırlık azaltma (Dupont, 2017)

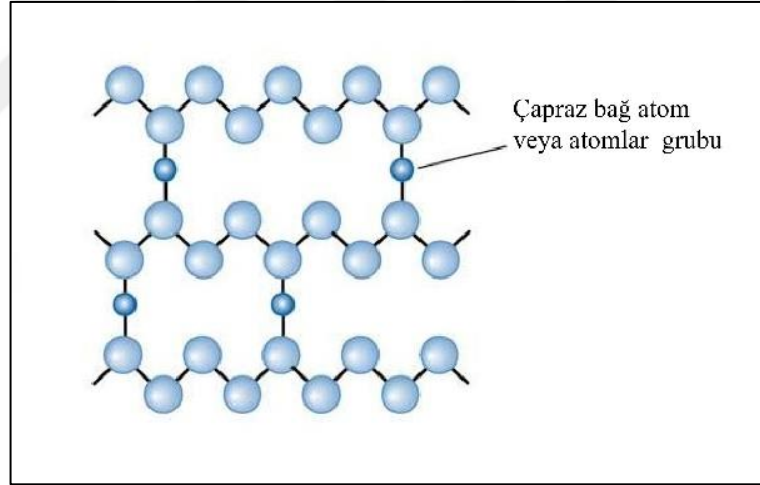
Polimeri ister termoset ister termoplastik olsun, polimer matrisli kompozitler, metal matrisli, karbon matrisli ve seramik matrisli kompozitlerden daha kolay imal edilmektedir. Bunun nedeni, polimer matrisli kompozitlerin imal edilmesi için gerekli işlem sıcaklıklarının nispeten düşük olmasıdır. Epoksi, fenolik ve furfuril reçineler gibi termosetler için, işleme sıcaklığı tipik olarak oda sıcaklığı ile yaklaşık 200 °C arasında değişmektedir. Poliimid (PI), polietersülfon (PES), polietereterketon (PEEK), polieterimid (PEI) ve polifenil sülfür (PPS) gibi termoplastik polimerler için ise işleme sıcaklıkları tipik olarak 300 ile 400 °C arasındadır (Chung, 2012).

2.3.2.3.1 Polimer Matrisli Kompozitlerin Sınıflandırılması. Polimer matrisli kompozitler için matris malzemesi bir elastomer polimer, termoset polimer ve termoplastik polimer olabilmektedir. Termoplastik polimerler, termosetlere kıyasla daha büyük süneklik, işleme hızının olması ve son zamanlarda yüksek sıcaklıklara dayanıklı termoplastik polimerlerin bulunması nedeniyle daha da önem kazanmıştır (Chung, 2012).

- **Elastomerler.** Bir elastomer, yüksek oranda uzatılabilen ve çekme kuvvetinin serbest bırakıldığı anda eski uzunluğuna geri dönen malzemelerdir. Elastomerleri diğer polimerlerden farklı kılan esneklik özelliğini tanımlamamız gerekirse,

elastomerleri çekme kuvvetine maruz bıraktığımızda büyük oranda uzamaları, uygulanan kuvveti serbest bıraktığımızda ise çok az deformasyona uğrayarak eski uzunluklarına geri dönmeleridir diyebiliriz. Bunun asıl nedeni polimer zincirleri arasındaki düzensiz yapı ve düşük çapraz bağ yoğunluğudur (Whelan ve Goff, 1990).

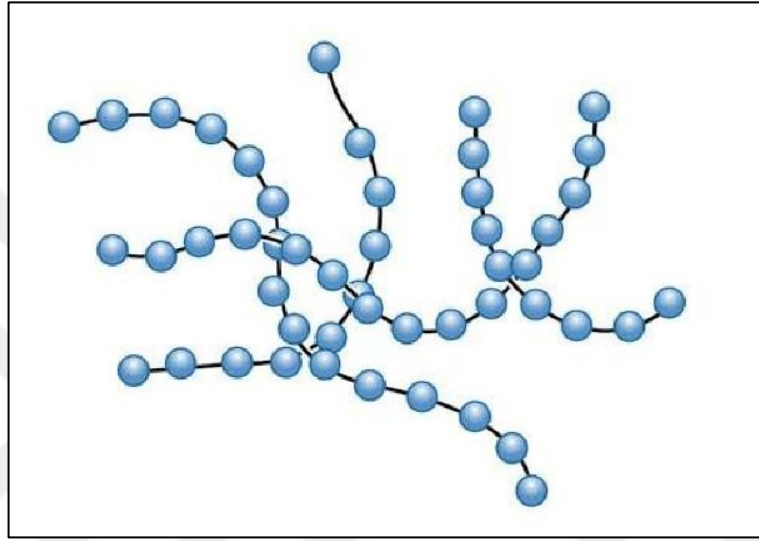
- *Termosetler*. Kritik bir ısı ve basınç üzerinde kalıcı olarak sertleşen ve şekillendirilebilen, yeniden ısıtıldıklarında yumuşamayan ve yeniden işlenemeyen bir polimer malzeme olarak tanımlanmaktadır. Termosetler genel olarak rijit malzemeler olarak bilinmektedirler; çünkü eşdeğer bağların bir araya getirdiği çapraz-bağlar polimer zincirinin hareketini büyük oranda kısıtlamaktadır (Şekil 2.9). Termosetlerin çapraz-bağ dereceleri arttıkça moleküllerin hareketleri daha fazla kısıtlandığından, rijitlik ve darbe dayanımı gibi mekanik özellikleri ön plana çıkmaktadır (Whelan ve Goff, 1990).



Şekil 2.9 Termoset polimerlerin moleküler yapıları (İTÜ, 2007)

Termosetler, genel olarak üç grupta incelenmektedir. Bunlar, düşük sıcaklıktaki termosetler (çoğunlukla polyesterler), orta sıcaklıktaki termosetler (çoğunlukla fenolikler) ve yüksek sıcaklıktaki termosetlerdir (poliamid ve bizmalemid reçineleri). Bu üç grup içerisinde en sık kullanılan termosetler polyesterler ve epoksiler, ardından ise bizmalemid ve poliamid reçineleridir (Akovali, 2001).

- *Termoplastikler*. Termoplastik genel olarak, termosetlerden daha sünek ve daha serttirler. Termoplastikler ısıtılarak eritilebilir ve soğutma ile katılaştırılabilirler. Bu özellikleri onlara yeniden şekillendirilebilme ve biçimlendirilebilme özelliği sunmaktadır. Termoplastiklerin moleküler yapıları çapraz bağlanmazlar ve bu nedenle esnek ve yeniden biçimlendirilebilirler. Termoplastik polimerlerin moleküler yapıları Şekil 2.10’da gösterilmiştir (Mazumdar, 2001).

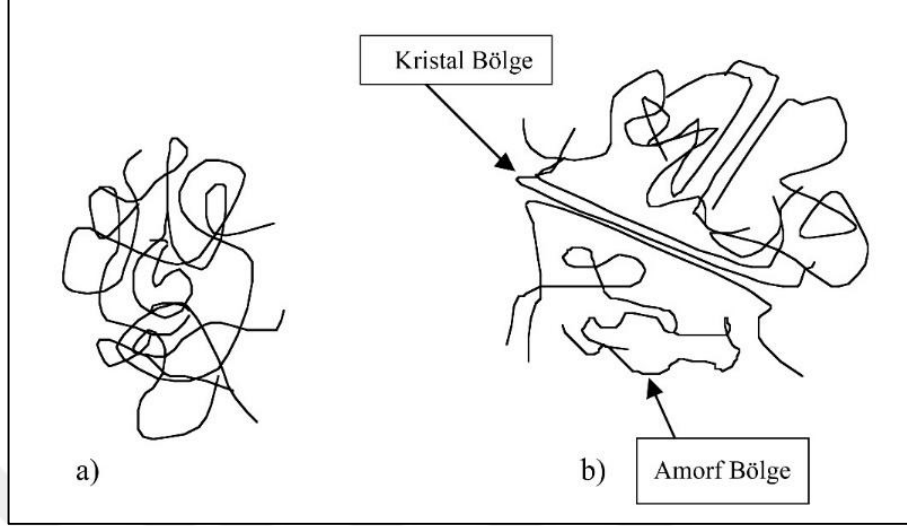


Şekil 2.10 Termoplastik polimerlerin moleküler yapıları (İTÜ, 2007)

Termoplastikler genellikle termosetlere kıyasla özellikle yüksek sıcaklıklarda düşük sürünme dayanımı gösterirler. Termoplastik reçinelerin birbiriyle kaynak yapılabilmesi, parçaların onarım ve birleştirilmesi termosetlere göre daha basittir. Termoset kompozitlerin onarımı, yapıştırıcılar ve dikkatli bir yüzey hazırlığı gerektiren karmaşık bir işlemdir. Termoplastiklerin yüksek viskozite değerinin olması, el yatırma ve bant sarma gibi bazı üretim yöntemlerini daha zor hale getirmektedir. Bunun bir sonucu olarak, bu problemlerin üstesinden gelmek için termoplastik üretimi, araştırmacılar tarafından çok ilgi görmektedir (Mazumdar, 2001).

Termoplastikler, Şekil 2.11’de gösterildiği gibi amorf veya yarı kristal olabilir. Amorf yapılı termoplastiklerde moleküller rastgele dizilirken, yarı-kristal yapılı termoplastiklerin kristalin bölgesinde, moleküller düzenli bir şekilde dizilmektedir. Düşük rijitlik ve mukavemet değerleri nedeniyle, yapısal uygulamalarda dolgu ve

takviye kullanımı gerekmektedir. Genel olarak yarı-kristaldeki kristal yapı rijitliği ve mukavemeti sağlarken, amorf yapı ise elastikliği sağlamaktadır (Mazumdar, 2001).



Şekil 2.11 Termoplastiklerin moleküler yapılarının gösterilişı a) amorf ve b) yarı-kristal yapı (Mazumdar, 2001)

Yarı-kristal yapılı termoplastiklere polipropilen (PP), poliamid (PA), polietilen-tereftalat (PET), polioksimetilen (POM), Polietilen (PE), termoset polyesterler ve naylonlar gibi termoplastikler örnek gösterilebilir. Amorf yapılı termoplastiklere ise polistiren (PS), akrilonitril bütadien stiren (ABS), policarbon (PC), poli metil metakrilat (PMM), polivinilklorür (PVC) örnek verilebilir (El-Sonbati, 2012).

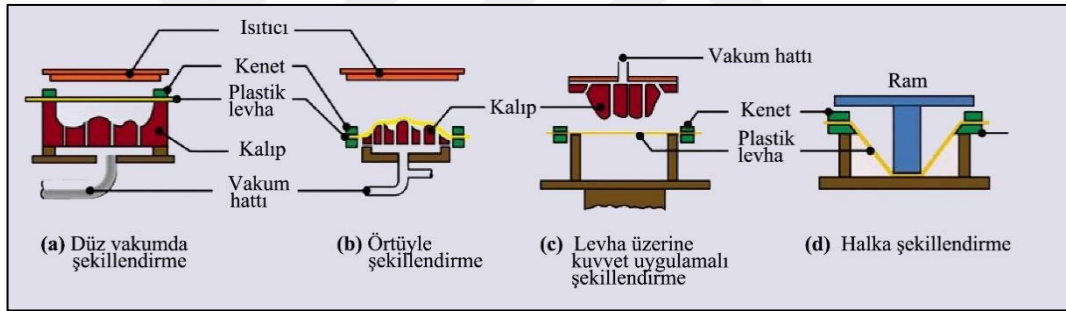
2.4 Termoplastik Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Gelişmiş bileşen performansına olan talepler daha hafif, daha dayanıklı ve daha verimli parçalar üretmeye yönelik çalışmalara sebep olmaktadır. Kullanılan reçine ve takviye malzemesine ek olarak, kompozit malzemelerin nihai özelliklerinin belirlenmesinde üretim yöntemleri önemli rol oynamaktadır. Bu bölümde termoplastik kompozitlerin üretiminde kullanılan bazı yöntemlere yer verilecektir.

2.4.1 Termal Şekillendirme

Daha önce belirtildiği gibi, termoplastikler ısıtıldıklarında yumuşadıklarından dolayı, eriyik halde şekillendirme teknikleri kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında termal şekillendirme, enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama bulunmaktadır.

Termal şekillendirme, ısıtılmış ve ıstampalanmış, ardından da vakum veya basınç uygulanmış bir tabakanın üretimini içermektedir. Genellikle, erime viskozitesinin artmasına yardımcı olduğu için süreksiz fiber (özellikle cam) takviyeleri kullanılmaktadır. Kısa elyaf takviyeli termoplastik reçine kompozitleri ise güçlendirilmiş basınçlı enjeksiyonlu kalıplama adı verilen yöntemle üretilmektedir. Çeşitli termal şekillendirme yöntemlerinin şematik görüntüleri Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Chawla, 2012).

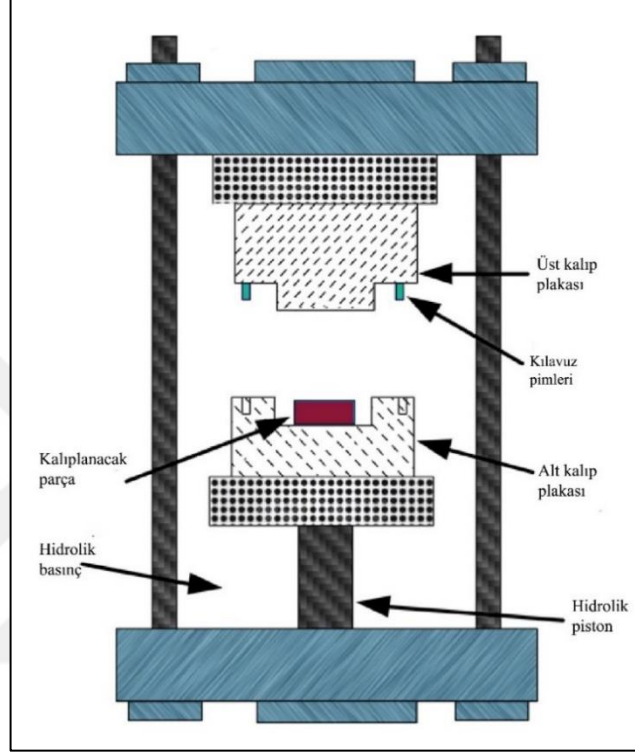


Şekil 2.12 Çeşitli termal şekillendirme ile kalıplamanın şematik görüntüleri (Badrossamay, 2015)

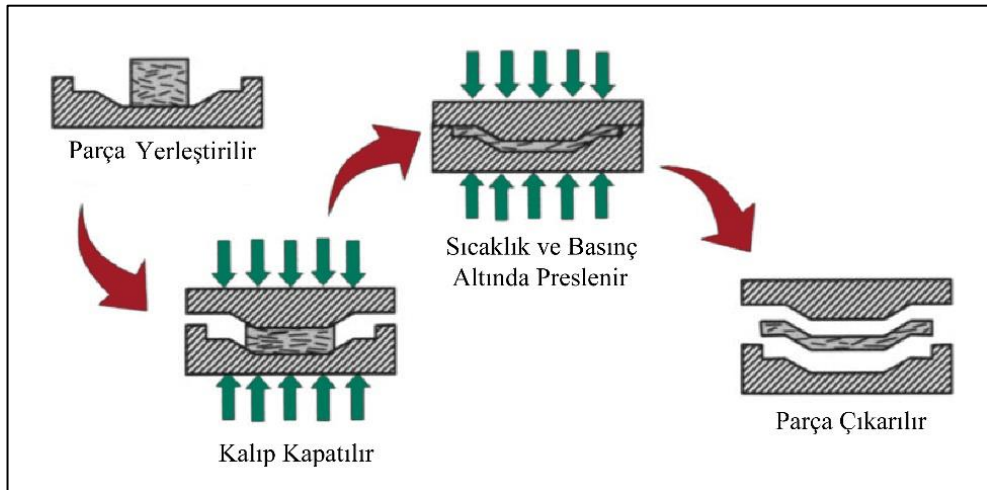
2.4.2 Basınçlı Kalıplama

Üretim spektrumunun diğer ucunda, termoset veya termoplastik reçineler kullanılarak karmaşık yüksek mukavemetli cam elyaf takviyeli parçaların kalıplanması için uygun yüksek hacimli, yüksek basınçlı bir üretim yöntemi olan basınçlı kalıplama durmaktadır. Basınçlı kalıplama, kompozit malzemelerin çeşitliliğini geliştirmek için iyi bilinen bir teknik olup, mükemmel yüzey kaplamalı, iyi boyutsal denetime sahip ve oldukça karmaşık büyük parçalar üretilebilen kalıplama yöntemidir. Bu yöntemde, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14’te gösterildiği gibi, kompozit malzeme üretebilmek için iki adet uyumlu metal kalıp kullanılmaktadır. Üst plaka hareketli iken alt plaka sabit kalmaktadır. Parça kalıba yerleştirilir ve tüm düzenek

sıkıştırma kalıbı arasında tutulmaktadır. Daha sonra istenen gereksinime göre ısı ve basınç uygulanmaktadır. Kalıplama plakaları arasında yerleştirilen parça, basınç ve ısı uygulamasına bağlı olarak akmakta ve kalıp boşluğunun şeklini almaktadır (Badrossamay, 2015).



Şekil 2.13 Basınçlı kalıplama makinesini şematik görünümü (Badrossamay, 2015)



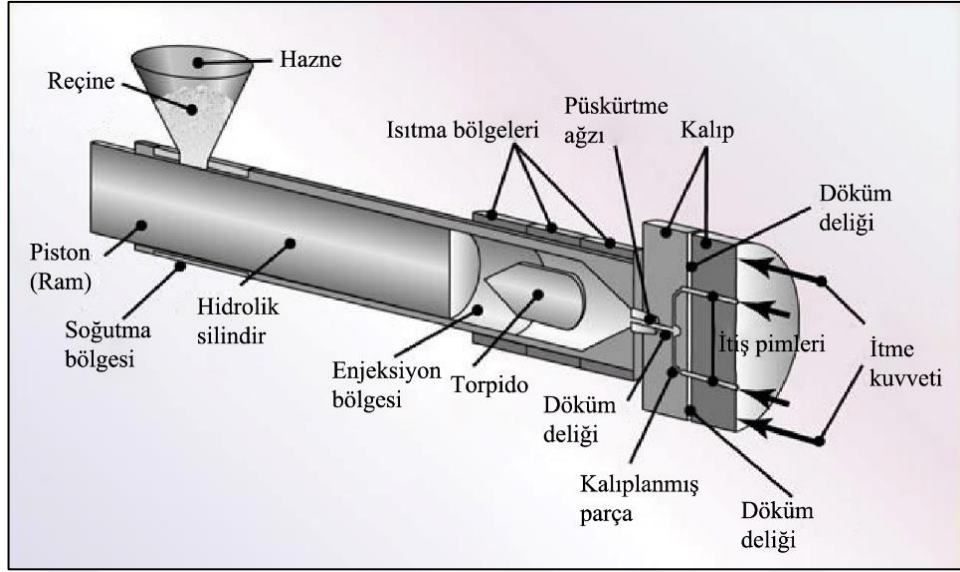
Şekil 2.14 Basınçlı kalıplama yönteminde işlem sırası (Campbell, 2003)

2.4.3 Enjeksiyonlu Kalıplama

Enjeksiyonlu kalıplama yöntemi, termoplastik malzemeler kullanarak farklı şekillerde parçalar oluşturabilmek için kullanılan yaygın bir üretim tekniğidir. Enjeksiyonlu kalıplama, cam elyaf takviyeli kompozitler için her yıl bir milyondan fazla parça üretmeye olanak sağlayan en yüksek hacimli üretim yöntemidir. Bu kalıplama yöntemi, takviyeli veya takviyesiz parçaların üretiminde kullanılmaktadır. Basınçlı kalıplama gibi, enjeksiyonlu kalıplama yöntemi de yüksek işleme sıcaklıkları ve basınçları nedeniyle pahalı ve uyumlu metal kalıplar gerektirmektedir. Yine de birçok karmaşık parçalar yüksek üretim hızında kalıplanabilmektedir; çünkü parça başına düşen maliyet genellikle düşük olmaktadır. Diğer takviye malzemeleri zaman zaman kullanılsalar da cam elyaflar daha üstün ürün sınıfında yer almaktadırlar. Tek veya çok boşluklu kalıba sahip presler yüksek üretim hızında çeşitli özellikler sağlayan enjeksiyonla kalıplanabilir geniş kapsamlı termoplastik reçineler üretmek için kullanılmaktadır (Campbell, 2003).

2.4.3.1 Pistonlu Enjeksiyonlu Kalıplama

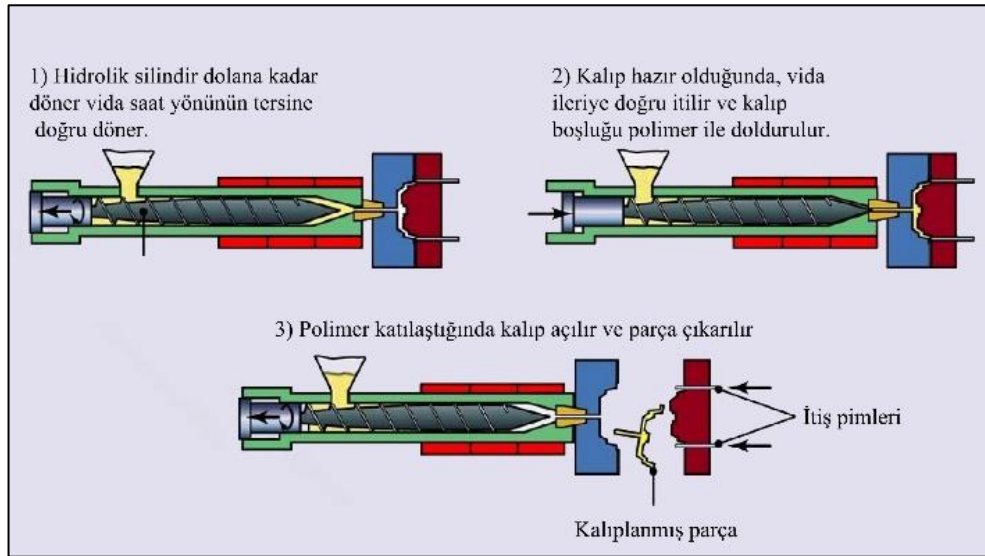
Enjeksiyon kalıplama yönteminde kullanılan cihazlar enjeksiyon ünitesinin tipine göre sınıflandırılmaktadır. Şekil 2.15'te *tek kademeli piston ünitesinin* bir kesiti gösterilmiştir. Pistonun (ram) geri çekilmesiyle granüllerin hazneden varil içine dökülmesi sağlanmaktadır. Piston ileri doğru itilerek ısınmış ve yumuşatılmış malzeme ısıtma bölgesine aktarılır. Eriyik halde olan polimerler püskürtme ağzından ileri doğru itilerek kalıbın pürüzsüz bir şekilde üretilmesini sağlamak için döküm deliklerinin tüm kısımlarına ulaştırılmaktadır. En son aşamada ise kalıp açılarak parça çıkarılır (Chanda, 2018).



Şekil 2.15 Pistonlu enjeksiyon kalıplamanın şematik gösterimi (Badrossamay, 2015)

2.4.3.2 Döner Vidalı Enjeksiyonlu Kalıplama

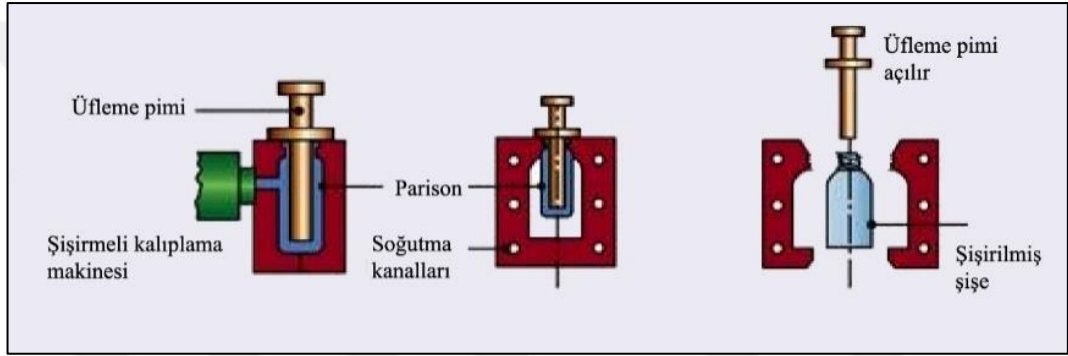
Bir önceki bölümde ifade edilen *tek kademeli piston üniteleri* sade ve basit olmalarına karşın, ısıtma değerinin sınırlı olması yüzünden popülerliğini yitirerek yerini *döner vidalı ve pistonlu* tip cihazlara bırakmıştır. Şekil 2.16’da gösterilen piston tipli cihazların ana bileşenleri piston ve torpido, hidrolik silindiri içinde ileri geri hareket edebilen döner vida ile değiştirilmiştir (Chanda, 2018).



Şekil 2.16 Döner vidalı enjeksiyon kalıplamanın şematik gösterimi (Badrossamay, 2015)

2.4.4 Şişirmeli Kalıplama

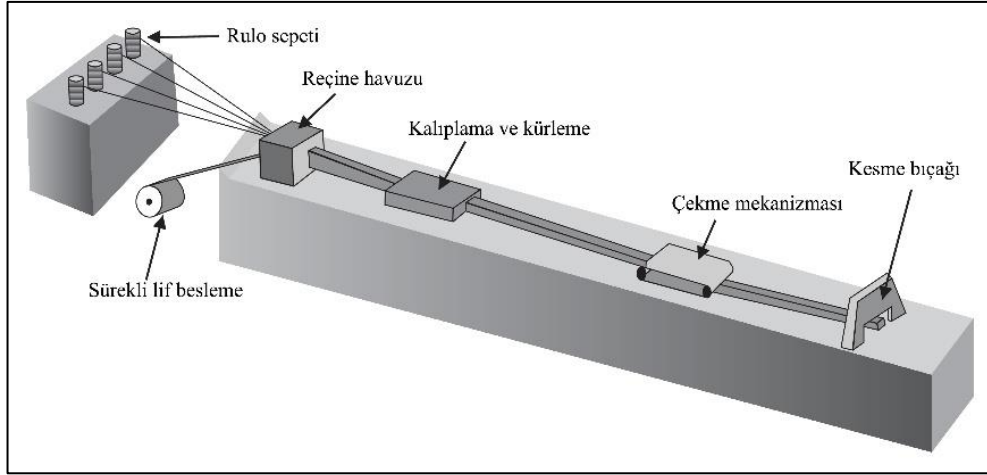
Şişirmeli kalıplama yöntemi, termoplastik reçine kullanılarak oyuk nesnelerin üretilmesi olarak adlandırılmaktadır. Şişirmeli kalıplama süreci polimerlerin eriyik hale getirilmesi ve parison olarak bilinen oyuk tüp içerisine şekillendirilmesiyle başlamaktadır. Her iki kalıp arasında bağlantı sağlanarak kalıbın şeklini alması için polimer basınçlı havayla şişirilmektedir. Soğuk kalıp duvarıyla temas eden polimer sertleşince kalıp açılarak parça çıkarılır. Şekil 2.17’de şişirmeli kalıpla yönteminin şematik gösterimi görülmektedir (Badrossamay, 2015).



Şekil 2.17 Şişirmeli kalıplama yönteminin şematik gösterimi (Badrossamay, 2015)

2.4.5 Pultrüzyon

Pultrüzyon (profil çekme), 1950’lerden beri ticari uygulamalarda kullanılan oldukça gelişmiş ve halen gelişmekte olan, sabit kesitli parçalar üretebilmek için kullanılan sürekli ve yüksek hacimli bir imalat yöntemidir. Pultrüzyon yönteminde karbon ve cam elyaf gibi çeşitli takviye elemanları ile dokuma ve keçeler bir reçine havuzundan geçirilerek kalıp içinde sıcaklık altında şekillendirilmektedir. Elyaf bir havuz içerisinde istenen özelliklere uygun olarak reçine ile ıslatılıp, şekillendirilmenin yapılacağı kalıp içine alınmaktadırlar. Kalıp içerisindeki çeşitli bölgelerde kontrol edilen sıcaklık dağılımı altında şekillendirilmektedirler. Son olarak, çekme mekanizması kullanılarak çekilip istenilen boyutlarda kesilmektedirler. Pultrüzyon yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.18’de gösterilmiştir (Strong, 2008)



Şekil 2.18 Pultrüzyon yönteminin şematik gösterimi (Strong, 2008)

2.5 Literatür Taraması

Cam elyaf takviyeli termoplastikler ile ilgili yapılmış önceki çalışmalar incelendiğinde, polipropilenin kabul edilen farklı mekanik özelliklere sahip bir malzeme olduğunu görülmektedir. Bu farklılıklar hem üretici firmanın kullandığı malzemenin üretim koşullarına hem de üretim yöntemlerinden kaynaklanmaktadır.

Doğan ve Arikan (2017), tarafından yapılmış bir deneysel çalışmada, E-cam takviyeli termoset ve termoplastik esaslı sandviç kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları incelenmiştir. Çalışmada E-cam takviyeli epoksi (termoset) ve polipropilen (termoplastik), polimer matrisli kompozit yüzey tabakaları üretmek için kullanılmıştır. Çekirdek (hammadde) malzeme olarak PVC köpük kullanılmıştır. Termoset plakalar vakum destekli reçine infüzyon yöntemi ile, termoplastik yüzey tabakalar ise sıcak pres kullanarak E-cam takviyeli PP esaslı prepregler ile üretilmiştir. Sandviç panellerin darbe davranışlarının incelenmesinden önce, yüzey tabakaların darbe davranışlarını bireysel olarak belirlemek için 25, 50, 75, 100 ve 125 J darbe enerjisi seviyelerinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, termoplastik numunelerin eğilme rijitliğinin, termoset numunelerinkinden daha düşük olduğu, yani termoset kompozitlerin daha rijit ve dayanıklı oldukları belirlenmiştir. Diğer yandan ise termoplastik yüzey tabakaların yük taşıma ve deformasyon kabiliyetlerinin, termosetlerden daha yüksek olduğunu sonucuna varılmıştır.

Evcı ve Gülgeç (2012) yaptıkları kompozit malzemelerin darbe davranışlarının incelenmesi adlı çalışma, üç farklı tipteki kompozitlerde Hertz çatlağı adı verilen darbe hasarının ve maksimum kuvvet eşiğinin belirlenmesinin araştırılmasını kapsamaktadır. Çalışmada, 100x100 boyutundaki tek yönlü E-Cam, D-dokuma E-cam ve dokuma aramid kompozit numuneler, ağırlık düşürme prensipli darbe test sistemi ile düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, dokuma kompozitlerin (*woven composites*) düşük hızlı darbeye karşı koruma sınırının tek yönlü kompozitlerden (*unidirectional composites*) daha üstün oldukları belirlenmiştir. Ayrıca, dokuma kompozitlerin hasar büyümesinin daha küçük bir alanla sınırlı olduğu da gözlemlenmiştir. Darbe deneylerinde, dinamik yükler altındaki kompozit malzemelerin mukavemetinin, gerinim duyarlılığının bir sonucu olarak statik yükleme durumuna kıyasla önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır.

Alcock, Cabrera, Barkoula, Loos ve Peijs (2007) çalışmalarında geri dönüştürülebilir tüm polipropilen kompozitlerin düşük hızlı darbe performanslarını incelemişlerdir. Tüm PP kompozit malzemelerin penetrasyon ve perforasyon davranışları düşme ağırlık prensipli sistem ile analiz edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, tüm PP kompozit plakalar, düşme ağırlıklı darbe penetrasyonuna karşı mükemmel direnç göstermiş ve cam veya doğal elyaf takviyeli polipropilenden daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Özdemir ve Kandaş (2018) yaptıkları çalışmada uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerden üretilmiş termoplastik kompozitlerde kalınlık ve sıcaklığın düşük hızlı darbe davranışlarına etkilerini incelemiştir. Üretilen kompozitlerin darbe dayanımlarını iyileştirmek amacıyla cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit prepregler kullanılmış ve sandviç yapıda yeni dizilimlere sahip kompozit malzemeler üretilmiştir. Kalınlık ve sıcaklığın darbe dayanımına olan etkilerini incelemek için 4 ve 6 mm kalınlığındaki kompozitlere oda sıcaklığında ve 50°C’de düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre, 2 farklı diziliimli kompozitlerde kalınlığın artması maksimum temas kuvvetinin artmasına, sıcaklığın yükselmesi ise maksimum temas kuvvetinin düşmesine neden olmuştur.

Boumbimba ve diğer. (2017) yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli akrilik termoplastik reçine esaslı üç bloklu kopolimerler kompozit malzemelerin çeşitli sıcaklıklardaki düşük hızlı darbe davranışlarını incelemişlerdir. Termoset bazlı lamine kompozitlerin eşdeğer geri dönüştürülebilir termoplastik esaslı kompozitlerle değiştirilmesi için Elium akrilik matris ve cam elyaf bazlı lamine kompozitler, ortam sıcaklığında bir infüzyon işlemi ile hazırlanmıştır. Daha sonrasında kompozitlerin darbe dayanımını arttırmak için, akrilik reçineye, farklı miktarlarda akrilik tri-blok kopolimerleri ilave edilerek katılaştırma yapılmıştır. Düşük hızlı darbe deneyi sonuçlarına göre, özellikle yüksek darbe enerjisi seviyelerinde *nanostrength* ilavesinin geliştirilmiş bir darbe direncine yol açtığını belirlenmiştir. Ayrıca, tomografik gözlemler hem darbe enerjisinin hem de sıcaklığın artmasıyla, hasar bölgesinin de arttığını göstermiştir.

Boria, Scattina ve Belingardi (2017), hem takviye malzemesinin hem de matrisin polipropilenden yapıldığı, tamamen termoplastik malzemeden yapılmış kompozitlerin ağırlık düşürme prensipli cihaz kullanılarak farklı darbe enerji seviyelerinde darbe kütlesinin ve hızının malzemelerin enerji absorbe etme kabiliyeti üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, darbe kütlesinin artırılması ile absorbe edilen enerji ve rijitlik artarken, darbe hızının artırılması ile absorbe edilen enerji ve rijitlik azalmıştır.

Çakır ve Berberoğlu (2018) yaptıkları çalışmada E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozitlerin farklı elyaf oranları ile mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Yapılan çalışmada değişik elyaf oranlarına sahip ve vakum destekli reçine transfer metodu ile üretilmiş kompozit malzemelerin çekme, darbe ve üç nokta eğme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda cam elyaf oranının artmasıyla birlikte kompozit malzemelerin maksimum gerilme, çekme, darbe dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Crema, Sorgato, Zanini, Carmignato ve Lucchetta (2018) yaptıkları çalışmada kalıp sıcaklığını ve enjeksiyon hızını değiştirerek, hızlı ısı döngülü kalıplama yönteminin (RHCM) ağırlıkça %30 oranında uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarından, enjeksiyon

hızındaki artışın her zaman yüksek fiber kopmasına bağlı olarak maksimum çekme gerilmesinin azalmasını gözlemlemişlerdir. Bu etki, fiber oryantasyonunun artmasına bağlı olarak düşük kalıp sıcaklığında kısmen azalmıştır. Diğer taraftan, hızlı ısı döngülü kalıplama yöntemi kullanıldığında, enjeksiyon hızındaki artış hem fiber uzunluğunun hem de fiber yönünün azalmasına neden olduğu için maksimum çekme gerilmesinde daha büyük bir düşüşe neden olmuştur.

Suresh ve Kumar (2014) sürekli cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin mekanik davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmada, polimer matrisi olarak 0,6 mm kalınlığında bir film ile izotaktik bir polipropilen homopolimeri ve lifli takviye malzemesi olarak ise E-cam elyaf takviyeli dokuma kumaş kullanılmıştır. Termoplastik kompozit lamineler, film istifleme tekniği kullanılarak, bir sıcak pres makinesinde üretilmiştir. Daha sonra, kompozit laminelere çekme ve üç nokta eğme deneyleri uygulanmış ve üretilmiş termoplastik kompozit laminelerin, literatürde tartışılan benzer yapıları laminelerinkinden daha iyi mekanik özellikler gösterdiği gözlenmiştir.

Reyes ve Sharma (2010) düşük hızlı darbe testlerine tabi tuttıkları cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin tamirat sonrası mekanik özelliklerindeki değişimleri incelemişlerdir. Bu doğrultuda öncelikle numunelere 4 ile 16J aralığında darbe testleri uygulanmış daha sonra hasarlı numuneleri dört nokta eğme testlerine tabi tutmuşlardır. Farklı darbe enerjilerindeki düşük hızlı darbe testleri sonrası numunelerin eğilme mukavemetlerindeki değişimler deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra numuneler kalıplara yerleştirilerek 180°C sıcaklığına ısıtılmış ve ardından soğuk pres işlemi yapılarak tamiratları gerçekleştirilmiştir. Tamiratlı numunelerin de dört nokta eğme testleri gerçekleştirilmiş ve tamirat sonrası eğilme mukavemetindeki geri kazanımı incelenmiştir. Yaptıkları çalışmalar doğrultusunda, tamirat işlemi ile birlikte numunelerdeki eğilme mukavemeti değerlerinde büyük oranda geri kazanım elde etmişlerdir.

Vodicka (1996) havacılık uygulamalarında kullanılan Grafit/PEEK termoplastik kompozitlerin tamirat yöntemleri üzerine bir inceleme yapmıştır. Görülen birçok hasar

durumu için tek bir onarım yönteminin optimum sonucu vermeyeceğini belirten Vodicka, hasarlı yüzeyleri basınç altında birbirine yaklaştırarak sıcaklık etkisi ile yüzeyler arasında bir füzyon bağı oluşturma esasına dayanan füzyon yapıştırma tekniği, hasar bölgesine yapı ile uyumlu yama malzemesi yerleştirerek sıcaklık altında onarım esasına dayanan dolgu yama yöntemi ve hasarlı bölgenin yüzeyden çıkartılarak sıcaklık ve basınç altında yeniden şekillendirilmesi esasına dayanan termal şekillendirme onarım yöntemlerini incelemiştir. Elde ettiği sonuçlar doğrultusunda üç yöntemin de havacılık sektöründe kullanılan Grafüt/PEEK termoplastiklerin onarımı için olumlu sonuçlar verdiğini bununla birlikte dolgu yama yönteminin uygulanabilirlik açısından diğer yöntemlere oranla daha uygun olduğunu belirtmiştir.

Davies, Cantwell, Jar, Bourban, Zysman ve Kausch (1991), havacılık ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan karbon fiber takviyeli PEEK matris malzemeli termoplastik kompozit malzemelerin onarım yöntemlerini araştırmışlardır. Bu konuda en yaygın onarım yöntemleri olarak görülen hasarlı bölge üzerine uygulanan epoksi yapıştırıcılar ile gerçekleştirilen yapışkanlı birleştirme onarım yöntemini ve basınç ve sıcaklık etkisi ile hasarlı bölgelerin arasında yeniden bağ oluşturma esasına dayanan füzyon yapıştırma onarım tekniğini ele almışlardır. Onarım uygulanan cam elyaf takviyeli PEEK termoplastik kompozitlerin onarım sonrası mekanik özelliklerini inceleyen araştırmacılar, her iki yöntemin de başarılı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Park ve Kong (2011), havacılık sektöründe kullanılmakta olan karbon takviyeli epoksi termoset kompozitlerin darbe davranışlarını deneysel olarak incelemişlerdir. Üretilen numuneleri çeşitli darbe enerjileri seviyelerinde düşük hızlı darbe testlerine tabi tutarak numunelerin darbe davranışlarını inceleyen araştırmacılar, daha sonra darbeli yüzeyleri özel bir alet ile numunelerden çıkartmışlardır. Boşaltılan yüzeylere özel bir bağlayıcı yapışkan doldurduktan sonra, vakum ve sıcaklık etkisi ile onarım işlemini gerçekleştirmişlerdir. Onarımı yapılan numuneler aynı şartlarda darbe testlerine tabi tutulmuştur ve elde edilen sonuçlar ışığında numunelerin darbe dayanımlarını %91 oranında geri kazandığı sonucuna ulaşmışlardır.

BÖLÜM ÜÇ

ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

Bu tez çalışmasında, kompozit malzemelerin üretimi için matris malzemesi olarak termoplastik polimer türü olan polipropilen ve takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. Çalışmada cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitler üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Elyaf tipi olarak farklı oranlara sahip *uzun cam elyaf* kullanılmıştır.

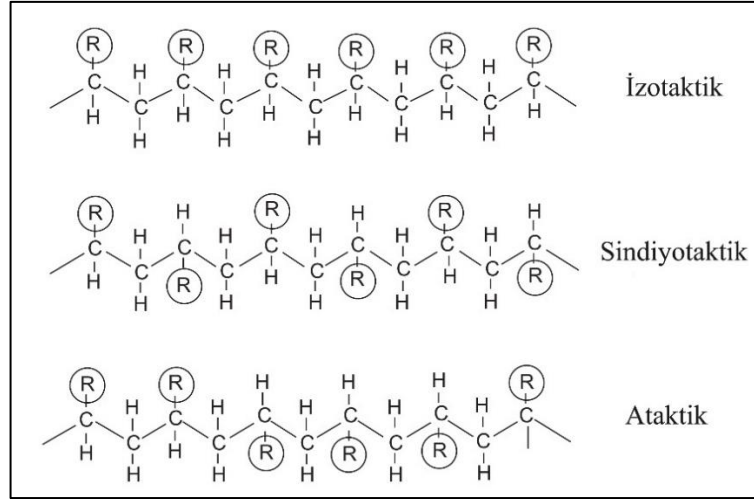
3.1 Polipropilen

Polipropilen (PP) ilk olarak 1954 yılında, uygun bir stereo-spesifik katalizörün başarılı bir şekilde geliştirilmesinden sonra ticari olarak üretilmiş ve bu da polimerlerin rijit parçalar için yararlı olan yapısal özelliklere sahip olmasını sağlamıştır. Polipropilen, oda sıcaklığı uygulamalarında kullanıldığında mükemmel ve istenen fiziksel, mekanik ve termal özelliklere sahip bir polimer türüdür. Nispeten sert ve yüksek bir erime noktasına, düşük yoğunluğa ve iyi darbe dayanımına sahiptir (Tripathi, 2002).

Polipropilen polimeri 3 farklı molekül formasında bilinmektedir. Bunlar:

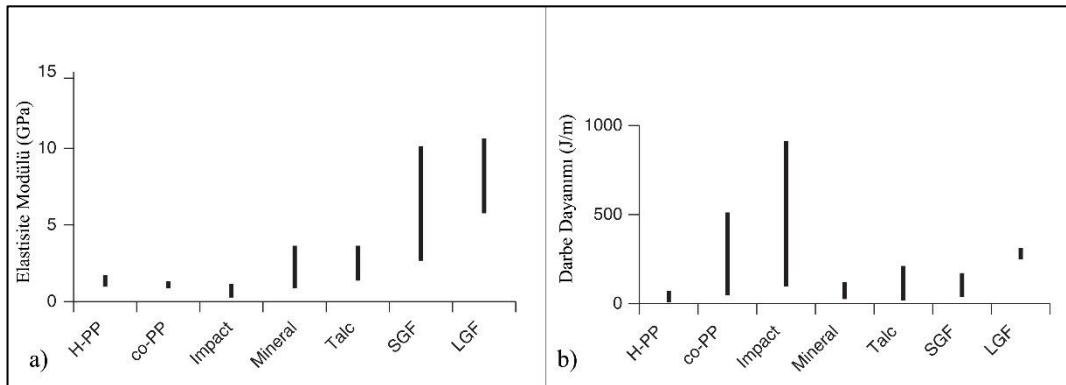
- İzotaktik: Mühendislik uygulamalarında sadece bu moleküler form kullanılmakta olup, kullanışlı bir plastik malzeme için gerekli olan tüm özelliklere sahiptir. İzotaktik yapılar, bütün R yan gruplarının, polimer ana zincir iskelet düzleminin tek tarafında bulunduğu yapılardır (Tripathi, 2002).
- Sindiyotaktik: R yan gruplarının polimer ana zincir iskelet düzleminin her iki tarafında düzenli bir sıralamayla bulunduğu bir yapıdır (Tripathi, 2002).
- Ataktik: Polimer zincirinde rastgele şekilde yerleşen bir yapı olup mühendislik uygulamalarında genel olarak tercih edilmemektedir (Tripathi, 2002).

Bu polimerlerin moleküler yapıları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 İzotaktik, sindiyotaktik ve ataktik formlarda PP polimer molekülleri (Jacoby, 2013)

İki ana tip polipropilen vardır. Bunlar, homopolimerler (H-PP) ve kopolimerlerdir (co-PP). Her bir kategorideki polimerler, belirli uygulamalar için diğerlerinden daha iyi performans göstermektedirler. Polipropilen genellikle plastik endüstrisinin “çeliği” olarak adlandırılır; çünkü belirli bir amaca en iyi şekilde hizmet edecek şekilde değiştirilebilmenin veya özelleştirilebilmenin çeşitli yollarına sahiptir. Bu genellikle ona özel katkı maddeleri ekleyerek veya çok özel bir şekilde üreterek elde edilmektedir. Homopolimer (H-PP) ve kopolimerlerin (co-PP) yanı sıra, Şekil 3.2’de darbe sınıfı polipropilen (impact), talk takviyeli polipropilen (talc), mineral takviyeli polipropilen (mineral), kısa (SGF) ve uzun cam elyaf takviyeli polipropilen (LGF) türlerinin elastisite modüllerini ve darbe dayanımlarını gösteren grafik sunulmuştur (Biron, 2007). En yüksek elastisite modülü LGF, en yüksek darbe dayanımı ise Impact tipi polipropilende görülmektedir.



Şekil 3.2 Farklı polipropilen türlerinin a) elastisite modülü ve b) darbe dayanımı değerleri (Biron, 2007)

3.1.1 Polipropilenin Avantajları ve Dezavantajları

Polipropilen, yüksek hacimli ticari plastik olarak çok popülerdir. Bununla birlikte, düşük maliyetli bir mühendislik plastiği olarak bilinmektedir. Daha düşük yoğunlukta daha yüksek rijitlik ve gerilmelere maruz bırakılmadığı sürece daha yüksek sıcaklıklara karşı dirençli olması (özellikle yüksek ve alçak yoğunluklu polietilen (PE) ile karşılaştırıldığında) polipropilenin temel özelliklerinden biridir. Buna ek olarak, polipropilen kolay işlenebilme özelliğine, kimyasal dirence ve yorulma dayanımına sahip bir polimerdir. Tablo 3.1’de saf Polipropilenin, alçak yoğunluklu polietilen (AYPE), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), yüksek darbe sınıfı polisitren (HIPS), polivinil klorür (PVC) ve akrilonitril bütadien stiren gibi diğer rekabetçi malzemeler üzerindeki karşılaştırılmalı avantajları gösterilmektedir (Tripathi, 2002).

Tablo 3.1 Polipropilenin diğer malzemelerle karşılaştırılması: Avantajlar (Tripathi, 2002)

Mekanik Özellikler	PP	AYPE	YYPE	HIPS	PVC	ABS
Eğilme modülü (GPa)	1,5	0,3	1,3	2,1	3	2,7
Çekme dayanımı (MPa)	33	10	32	42	51	47
Özgül yoğunluk (gr/cm ³)	0,905	0,92	0,96	1,08	1,4	1,05
Özgül katsayı (GPa)	1,66	0,33	1,35	1,94	2,14	2,57
Maksimum sürekli kullanım sıcaklığı (°C)	100	50	55	50	50	70

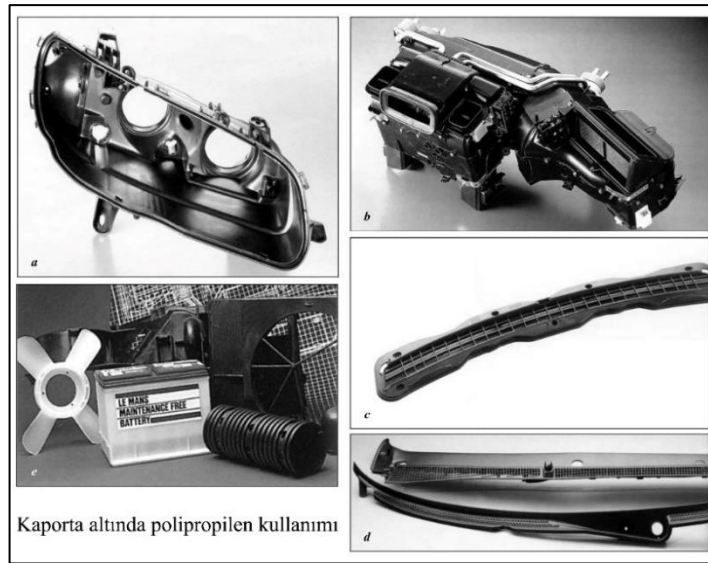
Tablo 3.2’de ise saf polipropilenin diğer rekabetçi termoplastiklere kıyasla en belirgin dezavantajları gösterilmektedir. Tablo 3.2’den PP’nin özellikle düşük ortam sıcaklıklarında, HIPS, PVC ve ABS’den daha yüksek kalıp çekmesine, daha yüksek termal genişlemeye ve düşük darbe dayanımına ve YYPE ve AYPE’den daha düşük kalıp çekmesine ve termal genişleme katsayısına sahip olduğu görülmektedir. PP’nin diğer dezavantajları, zor çözücü ve yapışkanlı bağlama, düşük dereceli yanıcılık, sınırlı saydamlık, zayıf aşınma özellikleri, sürtünmeli uygulamalar için uygunsuzluk ve gama ışınlamaya karşı zayıf dirençtir. Ancak bu dezavantajların birçoğu ya tamamen ya da belli bir dereceye kadar doğru malzeme seçimi, hassas tasarım ve iyi üretim ile aşılabilmektedir (Tripathi, 2002).

Tablo 3.2 Polipropilenin diğer malzemelerle karşılaştırılması: Dezavantajlar (Tripathi, 2002)

Özellikler	PP	AYPE	YYPE	HIPS	PVC	ABS
Kalıp çekmesi (%)	1,9	3	3	0,5	0,4	0,6
Termal genleşme katsayısı ($1/^\circ\text{C} \times 10^{-5}$)	10	20	12	7	6	8
Çentikli izod darbe dayanımı (kJ/m), 23(°C)'de	0,07	>1,06	0,15	0,1	0,08	0,2

3.1.2 Polipropilenin Kullanım Alanları

Otomobillerin iç ve dış kısmında ve kaportanın altında polipropilen yaygın olarak kullanılmaktadır. Polipropilen otomobil endüstrisinde diğer polimerlerden daha fazla kullanılmaktadır ve gün geçtikçe kullanım alanı daha da büyümektedir. Opel Astra'da, termoplastik bileşenlerin %68'i polipropilenden, %10'u naylondan, %6'sı ABS'den, %4'ü polietilenden ve %12'si ise diğer termoplastiklerden oluşmaktadır. Ford modellerinde, polipropilen kullanımı 1980 yılında ortalama 5,5 kg, 1985'te 8,0 kg, 1990'da ise 17,0 kg olmuştur. Otomotiv uygulamalarındaki polipropilenin yaygın olarak kullanımı ve çok yönlülüğü, daha az malzeme ayrışması gerektirdiği, yeniden işleme tabi tutulduktan sonra iyi mekanik özellikler gösterdiği ve geri dönüşüm sağladığı içindir. Şekil 3.3'te otomobil kaporta parçalarında polipropilenin kullanımı gösterilmiştir (Maier ve Calafut, 1998).



Şekil 3.3 Araba kaporta parçalarında polipropilen kullanımı a) far taşı, b) kalorifer gövdesi, c) havalandırma kafesi d) hava deflektörü ve e) akü kutusu (Maier ve Calafut, 1998)

3.2 Cam Elyaf

Düşük maliyete, iyi kimyasal dirence, yüksek gerilme mukavemeti ve darbe dayanımına sahip olması nedeniyle, cam elyaflar ticari kompozit uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Karbon fiberlere kıyasla nispeten düşük yorulma özelliklerine sahiptirler. Kompozitlerde genel olarak kullanılan en yaygın üç cam elyaf türü bulunmaktadır. Bunlar; E-cam, S-2 cam ve saf silika camı olarak da bilinen kuvars camıdır. E-cam, bu üç tür arasında en yaygın kullanılan ve daha az maliyetli sayılan cam elyaf türüdür. E-cam ile kıyaslandığında S-2 cam %40 oranında daha fazla çekme dayanımına ve elastisite modülüne sahip olduğu için daha pahalıdır. Oldukça pahalı olan kuvars cam ise, ultra saf bir silika camıdır ve özellikle zorlu elektrik uygulamalarında kullanılmaktadır. Tablo 3.3-3.4'te sırasıyla çeşitli cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimleri gösterilmiştir (Campbell, 2003).

Tablo 3.3 Çeşitli cam elyaf türlerinin mekanik özellikleri (Campbell, 2003)

Fiber türü	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (Msi)	Kopma Uzaması (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Termal Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ °C)	Elyaf Çapı (µm)
E-cam	3450	11	4,7	2,58	4,9-6,0	5-20
S-2 cam	4480	12,6	5,6	2,48	2,9	5-10
Kuvars cam	3380	10	5	2,15	0,5	9

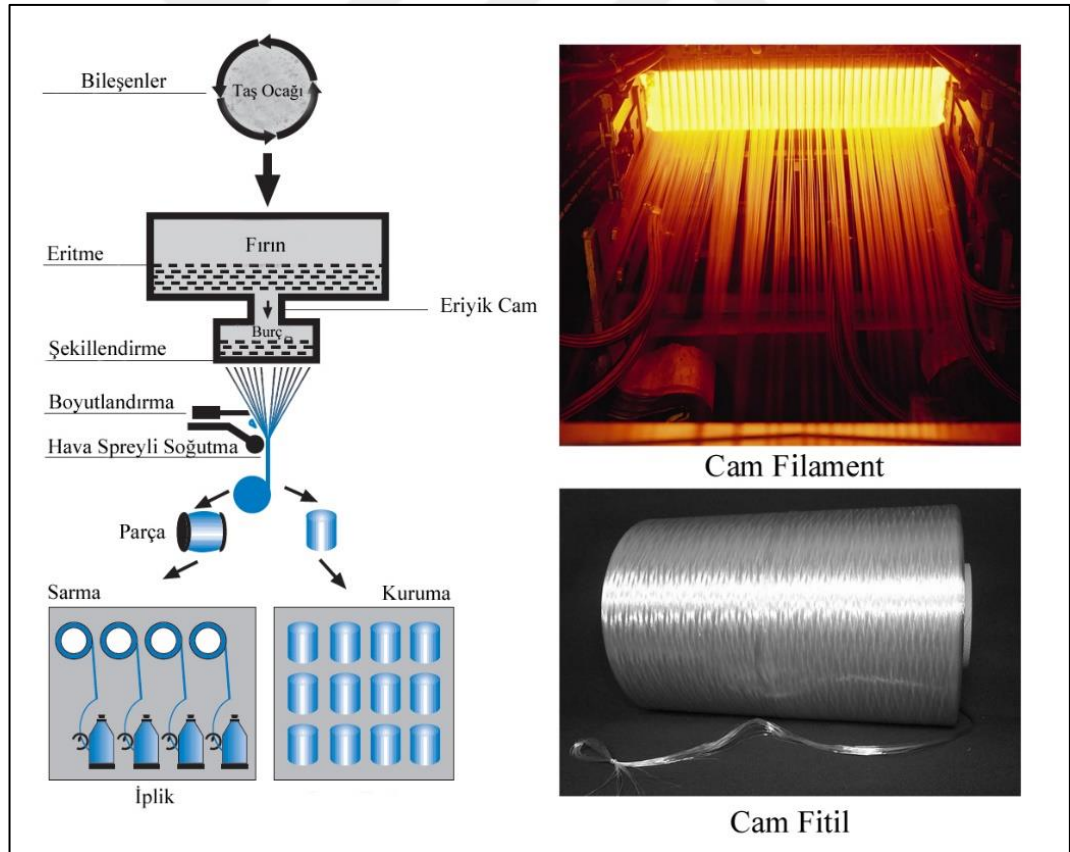
Tablo 3.4 Çeşitli cam elyaf türlerinin kimyasal bileşimi (Balasubramanian, 2013)

Elyaf Türü (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O / K ₂ O	Fe ₂ O ₃
E-cam	52,4-53,2	14,4-14,8	8,0-10,0	4,5	17,5	0,5	0,4
S-cam	64,2	24,8	0,01	10,27	0,01	0,24	0,21
Kuvars cam	99,99	-	-	-	-	-	-

Cam elyaf, ısıya dayanıklılık, elektrik yalıtımı, yüksek mukavemet ve mükemmel kimyasal kararlılık gibi iyi bir performans sergileyen mükemmel inorganik metalik olmayan bir malzemedir ve modern endüstrideki yüksek kaliteli malzemelerin vazgeçilmez bir temelidir. Cam elyaf takviyeli plastikler kompozit malzeme endüstrisinin ana parçası haline gelmiştir. Cam elyaf, ulaşım, inşaat, çevre koruma,

petrokimya, elektronik ve elektrikli cihazlar, makineler, havacılık, nükleer enerji, silahlar ve ulusal savunma departmanı ve yüksek teknoloji sektörü gibi diğer geleneksel endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Campbell, 2003).

Cam elyaflar silika kumu, kireçtaşı, borik asit ve az miktarda kil, kömür ve flüorit kullanılarak imal edilmektedir. Cam elyaf üretim prosesinde, bileşenler kuru halde karıştırılarak, yüksek sıcaklıkta ateşe dayanıklı endüstriyel fırınlarda eritilmektedir. Sıcaklık değeri 1350 ile 1650°C'ye ulaştığında, eriyik camlar küçük deliklerden oluşan burç içerisinde akarak cam filament formunu almaktadır. Daha sonra filamentler hava spreyi yardımıyla soğutulurak yaklaşık 80 km/saat hızla silindirler içine çekilmektedir. Son aşamada, cam filamentler kullanım alanına ve amacına göre boyutlandırılıp iplik haline getirildikten sonra silindir boyunca sarılmaktadırlar. Cam elyaf üretim süreci Şekil 3.4'te gösterilmiştir (Campbell, 2003).

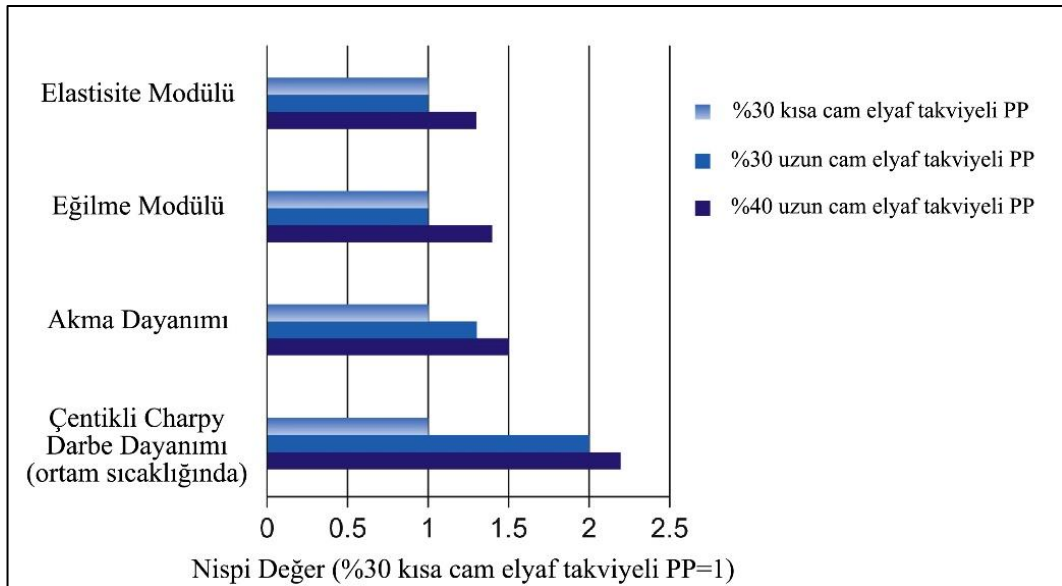


Şekil 3.4 Cam elyaf üretim süreci (Vetrotextiles, 2017)

3.2.1 Uzun Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Granül

Cam elyafın, polimerlerin mukavemet ve rijitliğini arttırdığı gerçeği göz önüne alındığında, cam elyaf polimerler için kullanılan en yaygın fiber takviyesi haline gelmiştir. Cam elyafın yaygın olarak kullanılmasına karşın, bileşiklerinin işlenmesi kolay değildir. Elyafın en-boy oranları nedeniyle farklı yönlerdeki mekanik özellikler, elyaf uzunluğu ve eritilmiş reçinenin akışı ile tetiklenen lif konumu ile büyük ölçüde etkilenmektedir. Kısa-cam elyaf bileşikler geliştirilmiş olduklarından ve günümüzde çeşitli polimer sistemlerinde nispeten rutin kullanım gördüklerinden, özellikle PP için takviye malzemesi olarak uzun cam elyaflar, yıllık çift haneli yüzde büyüme oranlarıyla, büyük bir ilgi görmektedirler (Tolinski, 2015).

Cam elyaf özelliklerinin en üst düzeye çıkarılması, 12 mm veya daha uzun başlangıç uzunluklarına sahip fiberlerin eklenmesi, uzun cam elyaf takviyeli polipropileni (LGFPP), otomotiv ve diğer uygulamalarda gerçek bir fiber kompozit gibi davranan ortak bir mühendislik malzemesi haline getirmiştir. Şekil 3.5'te cam elyaf uzunluğunun polipropilenin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini gösteren grafik sunulmuştur (Tolinski, 2015).



Şekil 3.5 Cam elyaf uzunluğunun PP'in mekanik özellikleri üzerindeki etkisi (Tolinski, 2015)

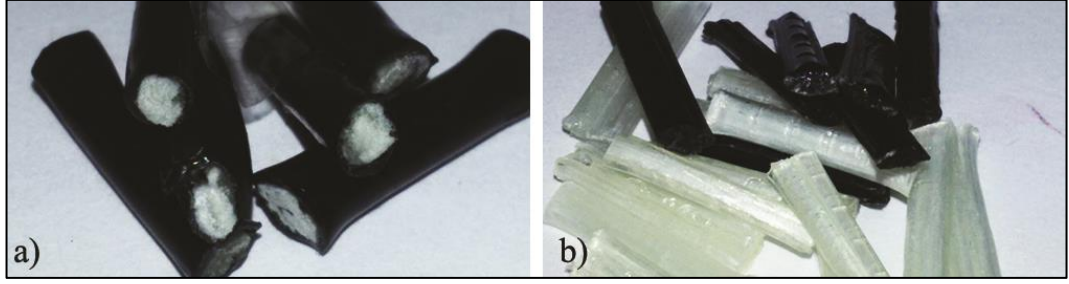
Şekil 3.5'teki mekanik özellikler göz önüne alındığında, uzun cam elyaf takviyeli PP kompozitlerin daha ağır ve daha pahalı mühendislik malzemelerinin ve hatta metallerin yerini almasına olanak sağlamaktadır. Şekil 3.6'da uzun cam elyaf takviyeli PP'den üretilmiş Ford Kuga crossover aracının bagaj kapağının yukarıya doğru açılan iç paneli gösterilmiştir (Tolinski, 2015).



Şekil 3.6 Uzun cam elyaf takviyeli PP'den üretilmiş otomobil bagaj paneli (Tolinski, 2015)

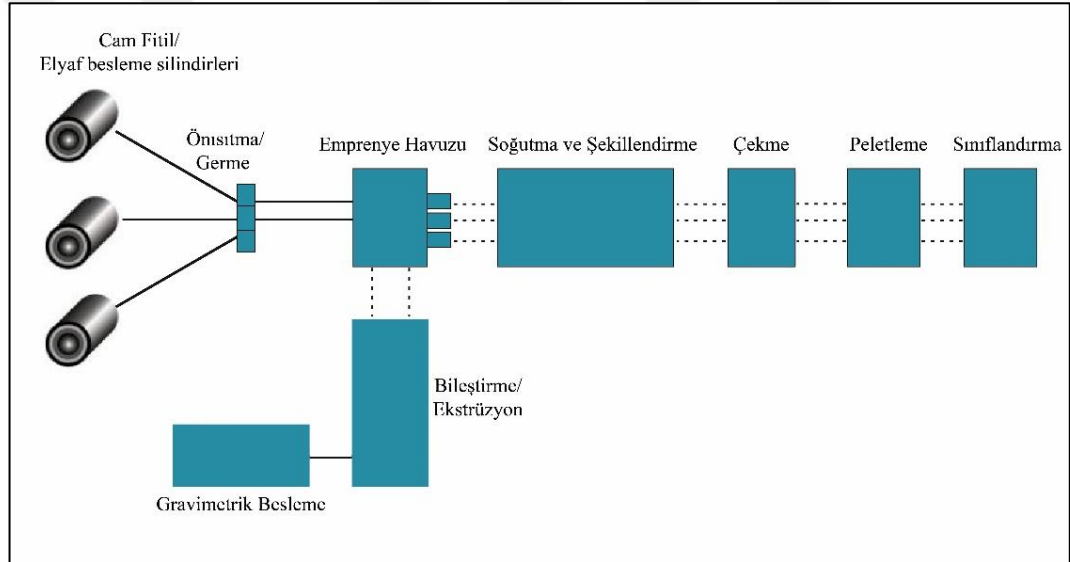
Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granülleri, *pultrüzyon* ve *kaplama* yöntemi ile üretilmektedir. Eski bir üretim yöntemi olarak bilinen kaplama yönteminde, üretilmek istenen kompozit granüller tam ıslanamadığından, enjeksiyon ile kalıplama sırasında elyafların parça içinde düzensiz bir şekilde dağılmasından dolayı parçaların mekanik özelliklerinde farklılıklar meydana geldiğinden, günümüzde bu yöntem tercih edilmemektedir (Nuhkompozit, 2015).

Profil çekme olarak da bilinen pultrüzyon yöntemi ise elyaflardaki ıslanmayı artırabilmek için gün geçtikçe gelişmiş ve halen gelişmeye devam eden bir üretim yöntemidir. Bu yöntemin en önemli bölmesi ıslanmanın kontrol edilebildiği emprenye havuzudur. Dünya üzerinde uzun cam elyaf takviyeli PP üretimi yapan firmalar kendilerine özgü havuz tasarımlarına sahiptirler. Bu sayede üretimlerini geliştirip üzerinde çalışmaktadırlar. Şekil 3.7'de bu iki yöntem kullanılarak üretilmiş granüller gösterilmektedir (Nuhkompozit, 2015).



Şekil 3.7 a) Kaplama ve b) pultrüzyon yöntemi ile üretilmiş uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller (Nuh Kompozit, 2015)

Şekil 3.8’de ise pultrüzyon yöntemi ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerin üretim şeması verilmektedir.



Şekil 3.8 Pultrüzyon yöntemi ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen üretimi (Coperion, 2018)

Çeşitli oranlardaki uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller Nuh Kompozit San. ve Tic. A.Ş. firmasından temin edilmiştir. Üretici firmada çeşitli elyaf oranlarına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller üretilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan 12 mm’lik polipropilen granüllerindeki elyaf oranı %40 ve %60 olarak belirlenmiştir. Firma resmi sitesinden alınan elyaf oranı %40 ve %60 olan uzun cam elyaf takviyeli homopolipropilen kompozit granüller için mekanik özellikler Tablo 3.5’te gösterilmiştir.

Tablo 3.5 %40 ve %60 elyaf oranına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin mekanik özellikleri (Nuhkompozit, 2015)

Mekanik Özellikler	%40 Elyaf Oranı	%60 Elyaf Oranı	Birimi	Test Metodu
Yoğunluk	1,2	1,43	g/cm ³	ISO 1183
Çekme Dayanımı	119	125	MPa	ISO 527
Çekme Dayanımı Modülü	8350	13800	MPa	ISO 527
Eğilme Dayanımı	190	215	MPa	ISO 178
Eğilme Dayanımı Modülü	7050	11250	MPa	ISO 178
IZOD Darbe Dayanımı, Çentiksiz (11j)	37,5	50,5	kJ/m ²	ISO 180
IZOD Darbe Dayanımı, Çentikli (11j)	14	22,5	kJ/m ²	ISO 180
Isıl Eğilme Sıcaklığı HDT (0,45 MPa)	157	158	°C	ISO 75B

3.3 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Lamine

Cam elyaf takviyeli termoplastik lamineler, geri dönüştürülebilirlik, daha düşük üretim süreleri, daha yüksek tokluk ve darbe dayanımı, uzun raf ömürleri, esneklik ve yeniden şekillendirilebilirlik gibi avantajları ile termoset laminelerden ayrılmaktadırlar. Bununla birlikte işlem görmeleri için termoset laminelere oranla genellikle daha yüksek sıcaklık ve basınç gerekmektedir (Mazumdar, 2001).

Termoplastik lamineler, reçine emdirme, sıcak eriyik kaplama, film istifleme ve kuru toz biriktirme gibi yöntemlerle üretilirler. Sıcak eriyik kaplama yöntemi bu yöntemler içerisinde en yaygın olanıdır. Bir çeşit ekstrüzyon yöntemi olan bu işlemde, lifler ve reçineler eş zamanlı olarak tabaka halinde ekstrüzyona tabi tutulurlar. Reçine emdirme yöntemi ise termoplastik laminelerin kimyasal dayanımının yüksek olması, yüksek sıcaklık ve basınç isterlerinden dolayı uygulamada zorluklarla karşılaşılacak ve bu sebeplerle daha az tercih edilen bir yöntemdir (Mazumdar, 2001).

Bu çalışmada, tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen lamineler kullanılmıştır. Malzemeye ait bazı mekanik özellikler Tablo 3.6’da sunulmuştur.

Tablo 3.6 Cam elyaf takviyeli polipropilen laminenin mekanik özellikleri

Çekme Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı Modülü (MPa)	Poisson Oranı
264±12	13700	0,232

BÖLÜM DÖRT

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında cam elyaf katkısının termoplastik malzemeler üzerindeki etkisini inceleyebilmek ve yorumlayabilmek amacıyla uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller kullanılmış ve granüller için üretim yöntemi olarak sıcak presleme yöntemi tercih edilmiştir. İki farklı cam elyaf yoğunluk oranında (%40 ve %60) üretilen kompozit numuneler altı farklı enerji seviyesinde (10, 15, 20, 30, 40 ve 50 joule) düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuş ve darbe karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra darbeli numunelere tamirat işlemi uygulanmış ve tamiratlı numuneler de aynı şartlarda darbe testlerine tabi tutulmuş ve darbe karakteristikleri elde edilmiştir. Bu çalışmaların ardından cam elyaf yoğunluk oranının ve tamirat işleminin, numunelerin darbe karakteristiklerine etkisi araştırılmıştır.

4.1 Çalışmada Kullanılan Cihazlar

Yapılan tez çalışmasında kompozit numune üretiminde ve düşük hızlı darbe deneyi aşamalarında kullanılan cihazlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Fontijne markalı sıcak pres
- Fractovis Plus darbe cihazı

4.1.1 Fontijne LabEcon 600 Pres Cihazı

Yapılan tez çalışmasında numune üretebilmek için PLC kontrol ünitesine sahip Fontijne markasının LabEcon 600 serisine ait bir sıcak pres cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 400x400 mm boyutunda hareketli üst ve hareketsiz alt çeneden oluşmaktadır. Çeneler arasındaki mesafe maksimum 200 mm'ye kadar çıkabilmektedir. Hareketli çenenin uygulayabileceği maksimum kuvvet 600 kN, cihazın ulaşabileceği maksimum sıcaklık değeri ise 300°C'dir. Sıcak pres, numunenin üretilmesi için istenen sıcaklık değerine (180°C) 8,5 dakikada ulaşabilmektedir. Kullanılan sıcak pres cihazı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Numune üretiminde kullanılan Fontijne markasının LabEcon 600 serisine ait pres cihazı (Kişisel arşiv, 2019)

4.1.2 Ceast Fractovis Plus Darbe Cihazı

Çalışma kapsamında düşük hızlı darbe deneyleri Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümündeki Kompozit Araştırma ve Test Laboratuvarında bulunan ağırlık düşürme prensipli darbe cihazı CEAST Fractovis Plus kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kullanılan cihazın iç ve dış gösterimi Şekil 4.2’de sunulmuştur.



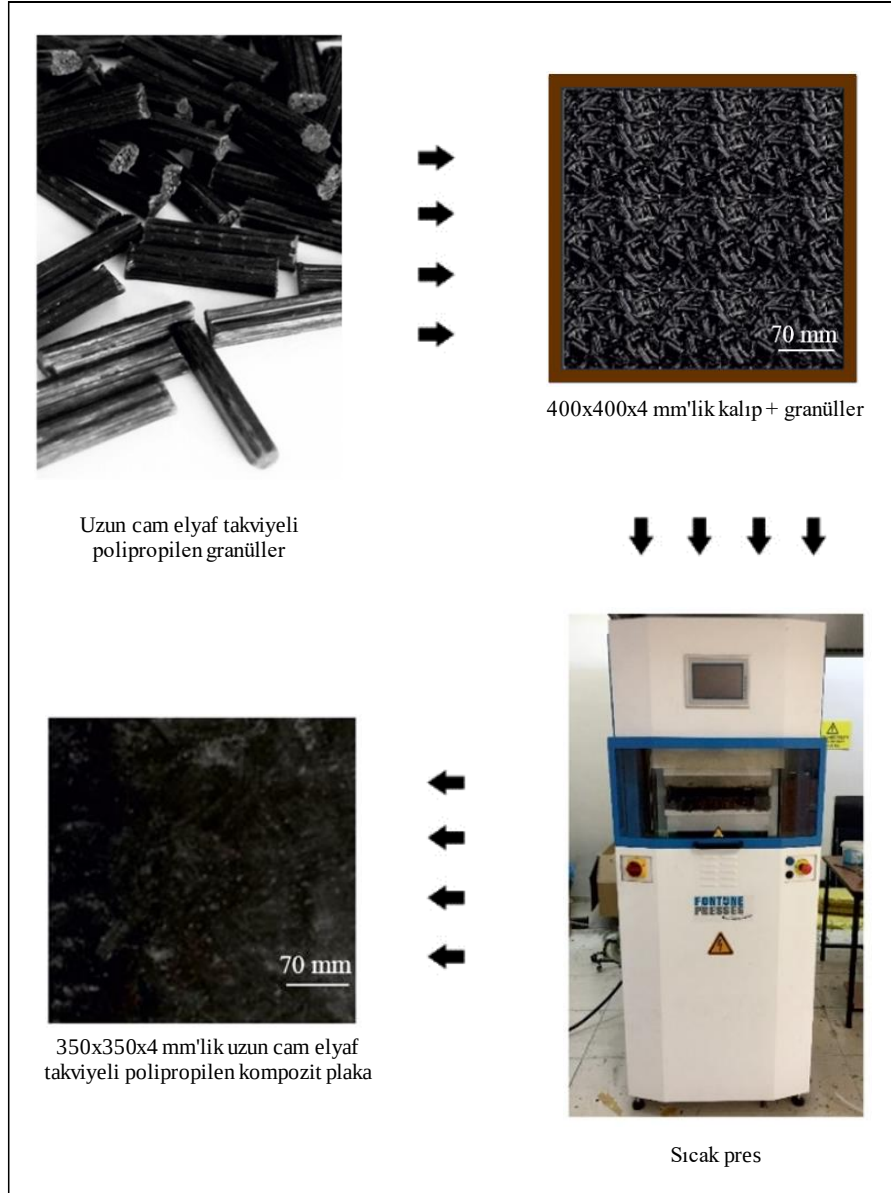
Şekil 4.2 CEAST Fractovis Plus darbe cihazı a) dış gösterim ve b) iç gösterim (Kişisel arşiv, 2019)

CEAST Fractovis Plus $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası ayarlanabilir termal şartlandırma kabinine, 1800 J enerjiye ve 24 m/s hızına kadar deney gerçekleştirebilme ve deney sırasında tekrarlı darbeyi önleyebilmek için darbe sonrası frenleme sistemi (geri sekme önleyici) gibi özelliklere sahip bir cihazdır. Deneylerde kullanılan çapı 12,7 mm, yarım küre şeklindeki vurucu uç 626 gr ağırlığa sahiptir. Darbe cihazı vurucu uç ile düşürülen ağırlık arasında bulunan kuvvet okuyucu (bayrak) yardımıyla ağırlığın kendinde bulundurduğu enerjiyi zamana bağlı olarak bilgisayara iletmektedir.

4.2 Kompozit Numune Üretimi

Bu tez çalışmasında, uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları tek kalınlıkta (4 mm) incelenmiştir. %40 ve %60 cam elyaf yoğunluk oranına sahip polipropilen granüller yoğunluk-hacim ilişkisi kullanılarak, 588 ve 700 gram olarak tartılmış ve 4 mm kalınlığındaki kalıba homojen bir biçimde eklenerek sıcak pres cihazında, $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta, 100 kN yük altında ve 60 dakika boyunca 350x350x4 mm ebatında plakalar halinde üretilmiştir. Daha öncesinde 4 mm'lik sac metalden yapılmış kalıbın cihaz çenelerine yapışmasını önlemek için

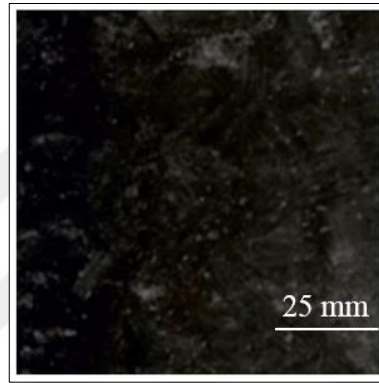
kalıbın her iki yüzeyi teflon kumaş ile kaplanmıştır. 60 dakikalık presleme süreci bittikten sonra cihaz kapatılmış ve plakaların içindeki kompozit numunelerde çarpılmanın olmaması için numuneler 100 kN yük altında 6 saat boyunca soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra kompozit numuneler kalıptan çıkarılmıştır. İşlem süreci Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin üretim şeması (Kişisel arşiv, 2019)

4.3 Kompozit Numunelerin Deney İçin Hazırlanması

İki farklı yoğunluk (%40 ve %60) ve tek kalınlık (4 mm) için elde edilen kompozit numuneler, darbe karakteristiklerinin araştırılması amacıyla düşük hızlı darbe testlerine tabi tutulmuştur. Bu amaçla 350x350 mm boyutlarındaki kompozit plakalar ASTM D3763 darbe deneyi standardına uygun olacak şekilde sulu testere yardımıyla 100x100 mm boyutlarına getirilmiştir. Bu şekilde 54 adet darbe numunesi elde edilmiştir. Şekil 4.4’de hazırlanan kompozit numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.4 100x100 mm ebatında uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozit (Kişisel arşiv, 2019)

4.4 Düşük Hızlı Darbe Deneyi

Darbe testleri, genel olarak günlük hayatta karşılaşılabileceğimiz, otomobil kazaları zamanı ortaya çıkan şiddetli çarpışmalar, araçların maruz kaldığı küçük tampon darbeleri, hareket halindeki araçlara sıçrayan taşlar, hızla giden bir araç tekerleğinin çukura aniden düşmesi veya kompozit malzemeler üzerine bakım ve onarım esnasında düşürülen bir parçanın darbe etkileri gibi gerçek olaylarla bir benzerlik göstermektedir. Mühendislik uygulamaları başta olmak üzere imalat, montaj ve kullanım aşamalarında dış etkenler tarafından oluşabilecek darbelere karşı beklenmedik ve istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilmektedir. Bunun önlemini alabilmek için malzemelerin böyle tip etkiler karşısında nasıl bir tepki göstereceğinin bilinmesi istenmektedir. Bu yüzden darbe deneyleri malzemelerin hasar şekillerinin ve dinamik deformasyonlarının belirlenmesinde kullanılmaktadır. Darbe dayanımı darbeye maruz kalan malzemelerde mühendislerin dikkat etmesi gereken en önemli faktörlerden biri olup, darbe dayanımı

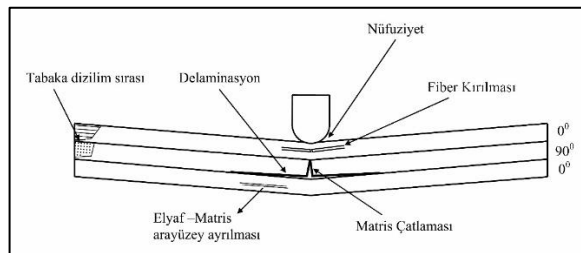
ile hem malzeme ömrü hem de malzeme güvenliğinin de belirlenmesi sağlanmaktadır (Safri, Sultan, Yidris, ve Mustapha 2014).

Darbeler genel olarak düşük ve hızlı olmak üzere sınıflandırılmaktadır. Düşük hızlı darbeler hedef rijitliğine, malzeme özelliklerine ve çarpan cismin rijitliğine ve ağırlığına bağlı olarak hızı 1 ile 10 m/s arasında değişiklik gösteren ve darbe sonucunda malzemelerin iç yapısında deformasyon oluşturan darbeler olarak bilinmektedir (Safri, Sultan, Yidris, ve Mustapha 2014).

Tez çalışması kapsamında tamiratlı ve tamiratsız uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlere yapılan tüm darbe deneylerinde, darbe karakteristiklerini belirleyebilmek için temas kuvveti-yer değiştirme, maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi, maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi, temas süresi-darbe enerjisi, darbe enerjisi-temas süresi ve eş enerji diyagramları, sonuçların güvenilirliğini arttırmak amacıyla üçer kez tekrarlanan altı farklı enerji değerindeki (10, 15, 20, 30, 40, 50 J) darbe deneyleri sonrasında çizdirilmiştir. Elde edilen eğriler incelenerek numunelerde ortaya çıkan maksimum temas kuvveti, maksimum yer değiştirme, maksimum temas süreleri ve absorbe edilen enerji değerleri sonraki bölümde karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

4.4.1 Düşük Hızlı Darbelerde Hasar Modları

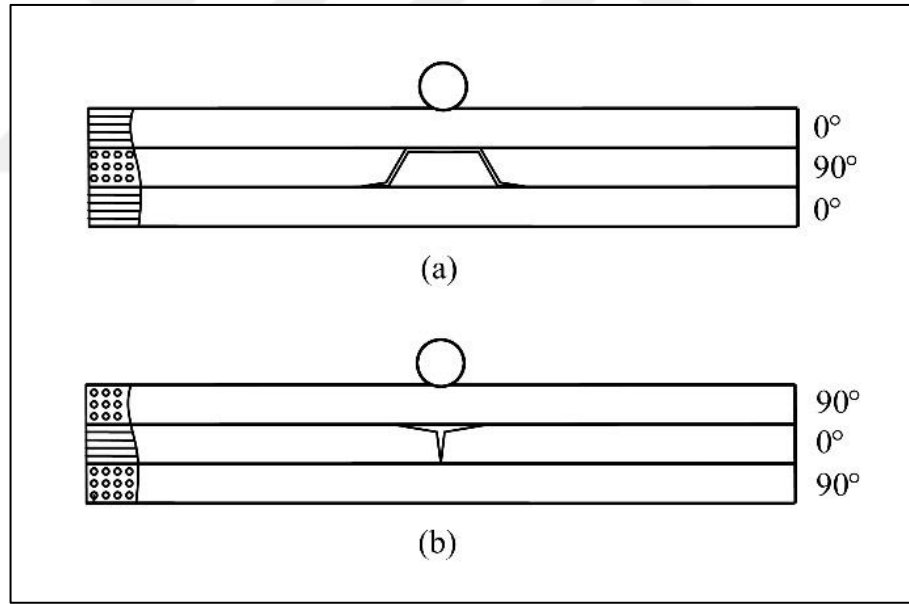
Düşük hızlı darbeler sonrası kompozit malzemelerde çarpan cismin şekline ve darbe enerjisine bağlı olarak matris hasarı, delaminasyon, fiber hasarı, nüfuziyet ve delinme gibi hasarlar meydana gelmektedir. Şekil 4.5’de darbe sonrası oluşan çeşitli hasar şekilleri gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Kompozit malzemelerde darbe sonucu oluşan hasar modları (Abrate, 2011)

4.4.1.1 Matris Hasarı

Matris hasarı genel olarak çarpma aygıtının (vurucu uç) temasından sonra malzemelerin üst katmanlarında oluşan, göz ile görülmesi zor olabilen ve genellikle 1 ile 5 J darbe enerjisi seviyelerinde gerçekleşen hasar modudur. Ayrıca, matris hasarı düşük hızlı darbeler nedeniyle matris kırılması, fiber ile matrislerde yapışkanlığın azalması, fiber ayrılması ve delaminasyon hasarının başlaması şeklinde gerçekleşmektedir. Matris hasarı, matris çatlaması şeklinde meydana gelerek darbeye maruz kalan kompozit malzemelerde görülen ilk hasar modudur. Matris çatlağı, çekme ve kayma çatlağı Şekil 4.6’da görülmektedir. Çekme çatlağı, düzlem içi gerilmelerde normal gerilmelerin katmanların enine uzanan kayma dayanımını aştığı zaman meydana çıkarken, kayma çatlağı ise düşük hızlı darbelerde enine kayma gerilmeleri nedeniyle oluşmaktadır (Abrate, 2011).



Şekil 4.6 Matris çatlağı a) çekme ve b) kayma (Abrate, 2011)

4.4.1.2 Elyaf Ayrılması (Delaminasyon)

Elyaf ayrılması (*debonding*) veya delaminasyon tabakalar arası ayrılma olarak bilinen bir hasar modudur. Kompozit malzemelerde tabakalar arasındaki mukavemetin düşük olması malzemelerde rijitlik kaybı ve malzeme ömrünün azalması gibi

sonuçlara neden olabileceğinden delaminasyon dikkate alınması gereken bir hasar modudur ve düşük hızlı darbelerde; tabakalı kompozit malzemelerde ve betonarme yapılarda meydana gelen en kritik hasar mekanizması olarak düşünülmektedir (Abrate, 2011).

4.4.1.3 Fiber Kırılması

Fiber kırılması genel olarak matris çatlağı ve delaminasyondan daha sonra meydana gelen hasar modudur. Çarpan cismin numuneye saplanması nedeniyle darbe uygulanan yüzeylerde oluşacağı gibi aynı zamanda darbeye maruz kalmayan bölgelerde de ortaya çıkabilmektedir (Abrate, 2011).

4.4.1.4 Nüfuziyet ve Delinme

Nüfuziyet çıplak gözle görülebilen ve fiber kırılmasının kritik boyuta ulaşarak çarpma aygıtının malzemeye tamamen nüfuz etmesi sonucunda ortaya çıkan bir darbe hasar modudur. Çarpan cismin ağırlığına ve hızına bağlı olarak nüfuziyet (penetration) ve delinme (perforation) gibi hasarlar oluşmaktadır. Kısaca özetlemek gerekirse, vurucu ucun malzemeye saplanması nüfuziyet, tümüyle delip geçmesi ise delinme olarak adlandırılmaktadır (Abrate, 2011).

4.5 Kompozit Malzemelerin Tamirâtı

Kompozit malzemeler çeşitli sebeplerden dolayı termal veya mekanik olarak hasara uğrayabilmektedirler. Hasarlı kompozit malzemenin, yeniden işleme zorluğu, parça ve değişim maliyetlerinin fazla olması gibi sebeplerden dolayı tamirat işlemi tekrar kullanım için önemli bir yöntem haline gelmiştir. Hasar alanının boyutuna göre üç onarım çeşidi vardır:

- Hemen onarılması gereken yapının yük taşıma kabiliyetini azaltan büyük ölçekteki hasarlar (Kara, 2012).

- Belirlenmiş süreçler kapsamında onarılması gereken yapının maksimum yüke dayanabildiği küçük hasarlar (Kara, 2012).
- Kozmetik iyileştirme gerektiren ihmal edilebilir derecede olan çok küçük ölçekteki hasarlar (Kara, 2012).

Teknolojinin gelişimiyle birlikte, kompozit malzemelerin tamirâtı için çeşitli teknikler geliştirilmektedir. Yapı kullanımda iken hasara maruz kalırsa, oluşan hasarın boyutuna ve durumuna göre üç tamirat metodundan biri uygulanarak onarılma yapılmalıdır.

- Kozmetik (yüzeysel) tamir: Kompozit malzemelerde meydana çıkan hasarın, bileşenlerin yapısal bütünlüğünü etkilemediği inceleme sonucunda teyit edildiğinde yüzeysel tamirat metodu uygulanmaktadır. Malzeme yüzeyini muhafaza etmek ve yeniden dekore etmek için kullanılan bu metotta takviye malzemesi kullanımı olmadan da onarım yapılabilmektedir (Kara, 2012).
- Geçici tamir: Kompozit malzeme bileşenlerinin mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemeyen küçük hasar alanları, kullanım sırasında sık sık görülen bir durumdur. Aynı zamanda hasarlı alanlara tamirat yapılmazsa nemden dolayı ısı sebebiyle veya yorulma ile hasarın hızla büyümesi söz konusu olabilmektedir. Bunun karşısını almak için öncelikle basit yamalar ile geçici tamiratlar yapılmaktadır. Dolayısıyla, kompozit malzemeye uygun yapısal tamirat işlemi uygulanıncaya kadar malzeme korunmuş olmaktadır (Kara, 2012).
- Yapısal tamir: Temel amacı uygulanan yükleri tam olarak desteklemek ve gerilmeleri tamirat bölgesi üzerinden iletmektir. Bunu yapabilmek için tamirat için kullanılan malzemeler özgün kompozit malzemenin katmanlarına yeteri kadar yapışmalı ve üzerini kaplamalıdır (Kara, 2012).

4.5.1 Kompozitlerin Tamirat Yöntemleri

Şu ana kadar geliştirilmiş çeşitli kompozit hasar tamir yöntemleri bulunmaktadır. Literatüre geçmiş başlıca tamirat yöntemleri aşağıda sunulmuştur.

4.5.1.1 Koruyucu Bant Yöntemi

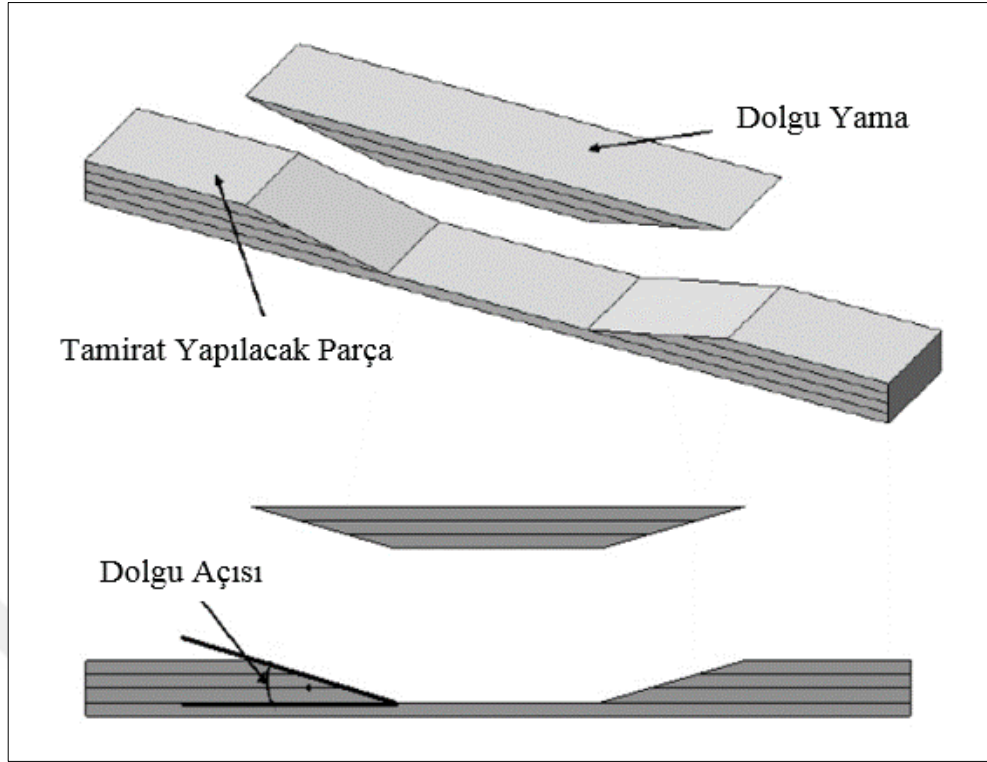
Geçici tamirat yöntemlerinden olan koruyucu bant yöntemi genellikle hava taşıtlarında küçük hasarların onarımı için kullanılmaktadır. Bu yöntemde 0,025 – 0,075 mm kalınlığındaki yapışkan özellikli bant, hassas bir şekilde temizlenmiş hasar yüzeyine yapıştırılmaktadır. Bu yöntemle hasarlı bölgede bir darbe dayanımı sağlanmasından ziyade hasarın büyümemesi amaçlanmaktadır (Dağdelen, 2010).

4.5.1.2 Reçine İnfüzyon Yöntemi

Geçici bir tamirat yöntemi olan reçine infüzyon yöntemi, hasarlı bölgenin içine belirli şartlardaki onarım reçinesinin enjekte edilmesi esasına dayanmaktadır. Havacılık ve denizcilik sektöründe oldukça yaygın olarak kullanılan bu tamirat yönteminde hasar bölgesi yüzeyinin hassas temizliğine gerek kalmazken reçine enjekte edilecek bölgenin kuru olması gerekmektedir. Oldukça hızlı ve pratik bir yöntemdir (Jefferson, Arumugam, Dhakal, 2018).

4.5.1.3 Dolgu Yama Yöntemi

Özellikle havacılık sektöründe sıklıkla kullanılan dolgu yama tamirat yöntemi, yüksek bağ dayanımı istenen hasar durumlarında uygulanmaktadır (Jefferson, Arumugam, Dhakal, 2018). Genellikle düz parçalara ve Şekil 4.7’de görülen dolgu açısı değeri 50:1 oranında olacak şekilde uygulanmaktadır. Uygulanacak yüzey parçanın kenar hatlarında ise dolgu açısı oranı 20:1 olarak belirlenmektedir (Dağdelen, 2010).

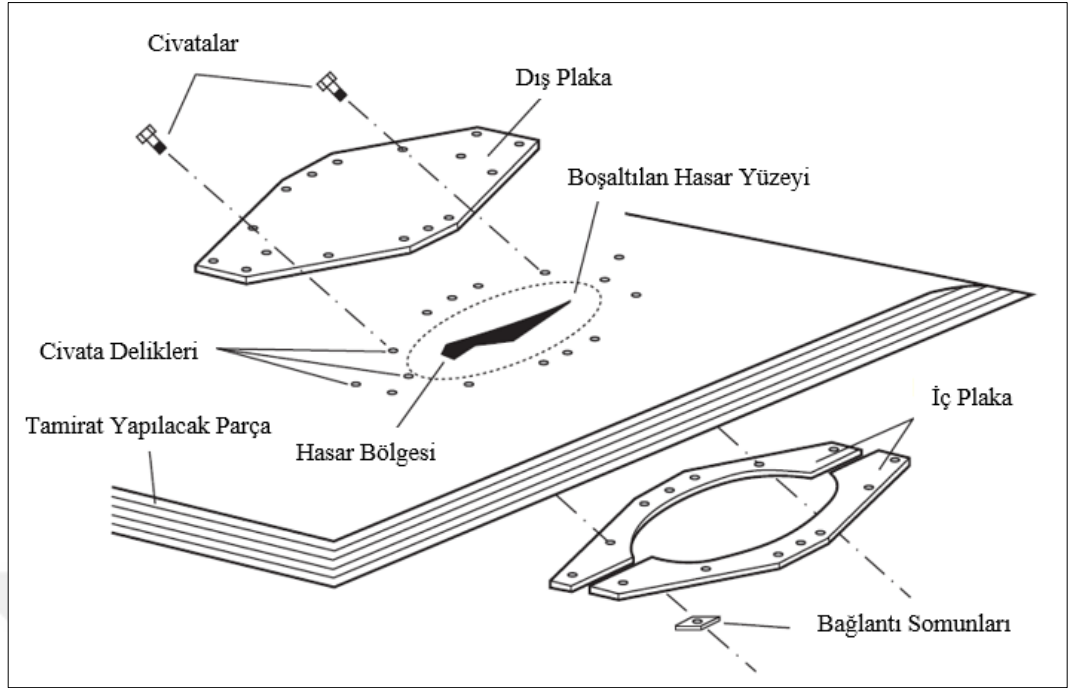


Şekil 4.7 Dolgu yama uygulaması (Dağdelen, 2010)

Yüksek bağ dayanımı ve pürüzsüz aerodinamik yüzey sağlama gibi avantajlarının yanında, yüksek ekipman maliyeti ve uzun işçilik gerekliliği gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Jefferson, Arumugam ve Dhakal, 2018).

4.5.1.4 Civatalama ile Tamirat Yöntemi

Bu tamirat yöntemi metal bir plaka çiftinin dıştan ve içten hasar bölgesine civatalanması esasına dayanmaktadır. 2 mm'den büyük parçalarda kalıcı tamirat yöntemi olarak uygulanabilmektedir (Akgün, 2010). Şekil 4.8'de civatalama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



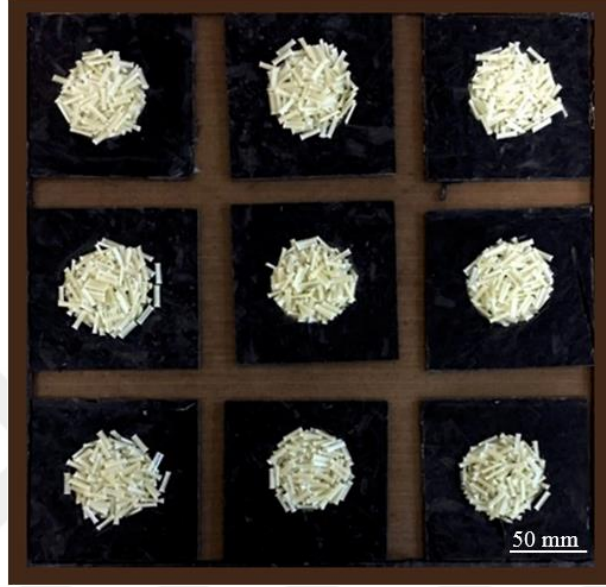
Şekil 4.8 Civatalama tamirat yöntemi uygulaması (Akgün, 2010)

Bu çalışmada tamirat yöntemi, dolgu malzemesinin hasar bölgesine doldurulması, hasar bölgesinin üzerine altlı üstlü olarak belirlenen oryantasyonda lamine plakaların yerleştirilmesi sonrası hasarlı numunelerin kalıplanıp sıcak pres yöntemi ile belirlenen sıcaklık ve basınç etkisi altında kürlenmesi olarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan tamirat çalışması detaylı olarak sonraki bölümde anlatılmıştır.

4.5.2 Uzun Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Tamiratu

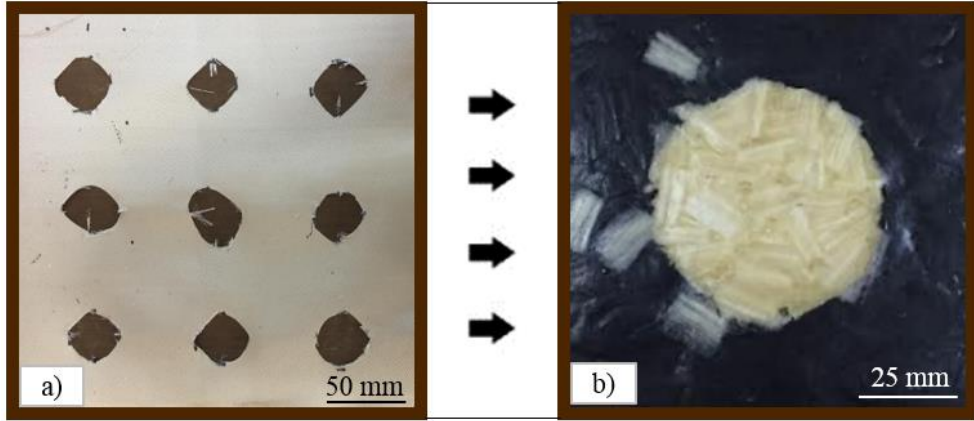
Tez çalışması kapsamında üretilen kompozit numuneler darbe karakteristiklerinin kıyaslanması amacıyla darbe testlerine tabi tutulmuştur. Düşük hızlı darbe testi uygulanan iki farklı hacimsel elyaf yoğunluğuna (%40 ve %60) ve 4 mm kalınlığa sahip numunelerin hasarlı yüzeyleri Ø54 mm'lik matkap ucu ile boşaltılmış ve boşaltılan yüzeyler malzeme ile aynı hacimsel elyaf yoğunluğuna sahip dolgu malzemesi ile doldurulmuştur. Dolgu malzemesi, darbe yüzeyinin ayırt edilebilmesi için beyaz renkli numunelerden seçilmiştir. Ayrıca dolgu malzemesinin miktarı yoğunluk-hacim ilişkisi kullanılarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, dolgu yapılacak bölgenin hacmi $V = \pi r^2 x h$ eşitliğinden hareket ile $V = 9,16 \text{ cm}^3$ olarak hesaplanmış ve $kütle = hacim \times yoğunluk$ ilkesinden hareketle, malzemelerin yoğunluk

değerleri ile çarpılarak kullanılacak miktarlar tespit edilmiştir. %40 cam elyaf yoğunluğuna sahip numuneler için 10,99 gr, %60 cam elyaf yoğunluğuna sahip numuneler için 13,1 gr dolgu malzemesi ihtiyacı tespit edilmiştir. Şekil 4.9'da tamirat işlemi öncesi kalıplama gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Tamirat işlemi öncesi kalıplama (Kişisel arşiv, 2019)

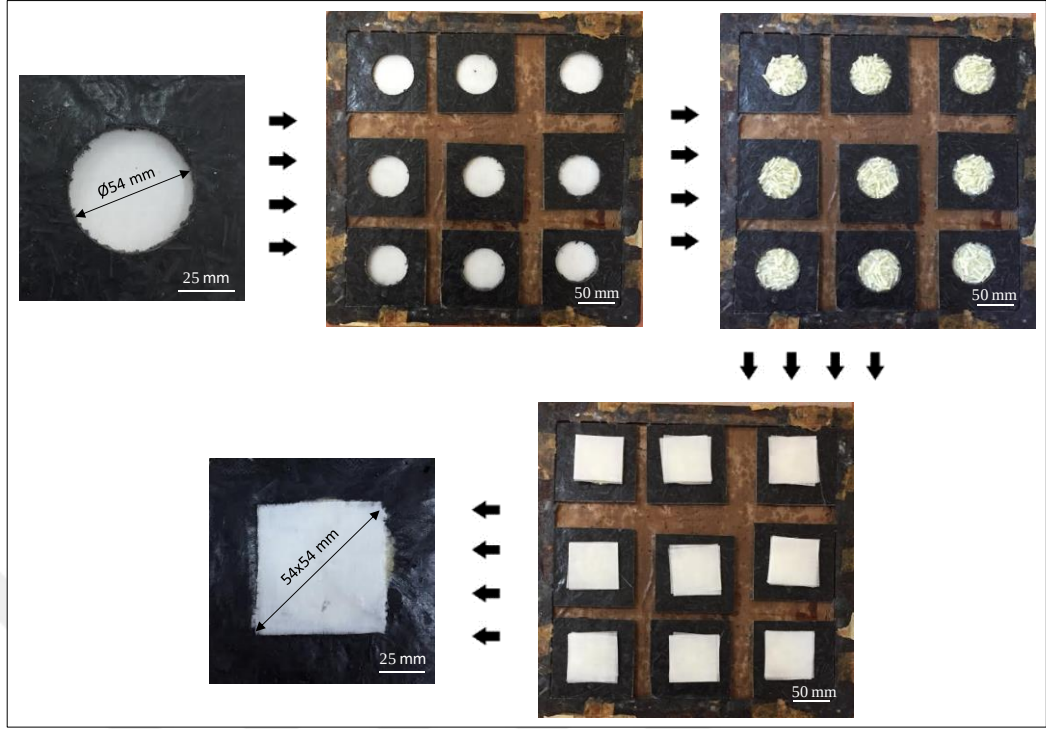
Tamirat işlemi için malzemelere aynı şartlarda sıcak pres işleminin uygulanması gerekmektedir. Fakat bu işlem sırasında, dolgu malzemesinin erimesi ve numune yüzeyinde bir erime olmaması gerekmektedir. Bu amaç ile yapılan araştırmalar sonucunda yüksek ısı yalıtım kumaşı olan Silika, Başarı Mühendislik Ltd. Şti. Firması'ndan temin edilmiş ve sıcak pres uygulanmadan önce tamirat gerçekleşmeyecek yüzeylere Şekil 4.10-a'daki gibi giydirilmiştir. Bu yöntem ile yapılan sıcak pres işleminden sonra, elde edilen malzemelerin kalınlık kontrolleri gerçekleştirildiğinde, numunenin kalınlığının belirlenen toleransın içinde olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.10-b'de ise dolgulu tamirat işlemi sonrası elde edilen numune resmi görülmektedir.



Şekil 4.10 a) Silika kumaş kaplaması ve b) tamiratlı numune (Kişisel arşiv, 2019)

Tamirat işleminden sonra, elde edilen numunelere altı farklı enerji seviyesinde (10, 15, 20, 30, 40, 50J) düşük hızlı darbe testleri 3 tekrar olarak uygulanmıştır. Elde edilen darbe deneyi verileri ile tamiratlı numunelerin darbe karakteristikleri karşılaştırılmıştır.

Dolgu malzeme ile yapılan tamirat çalışmasında numunelerin darbe karakteristiklerinde önemli oranda iyileşme olmaması üzerine lamineli tamirat işlemi uygulanmıştır. Bu işlemde, uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller ile tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen lamineler birlikte kullanılmıştır. Öncelikle, %40 ve %60 yoğunluklu uzun cam elyaf takviyeli polipropilen numunelerin darbeleri yüzeyleri Ø54 mm'lik matkap ucu ile boşaltılarak kendi yoğunluklarındaki uzun cam elyaf takviyeli beyaz renkli polipropilen granüller ile doldurulmuş ve hasarlı bölgelerin alt ve üst yüzeylerine 2 şer adet 54x54 mm boyutunda tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen lamine malzemeleri 0° ve 90° dizilimlerinde yerleştirilmiştir. Kısaca cam elyaf takviyeli polipropilen sandviç kompozit numunelerin tamirat oryantasyonunu [0/90/granül/90/0] şeklinde özetleyebiliriz. Yapılan işlemler sonrasında tamirat için hazırlanan numuneler, dolgulu tamirat yönteminde olduğu gibi 4 mm'lik kalıplara yerleştirilmiş, tamirat olmayacak yüzeyler silika kumaş ile kaplanmış ve sıcak pres işlemi ile tamiratları gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.11'de lamineli tamirat işlemi uygulanmış numuneye ait görsel ve işlem sırası verilmiştir.



Şekil 4.11 Lamineli tamirat işlemi uygulanmış numunelerde işlem sırası (Kişisel arşiv, 2019)

BÖLÜM BEŞ

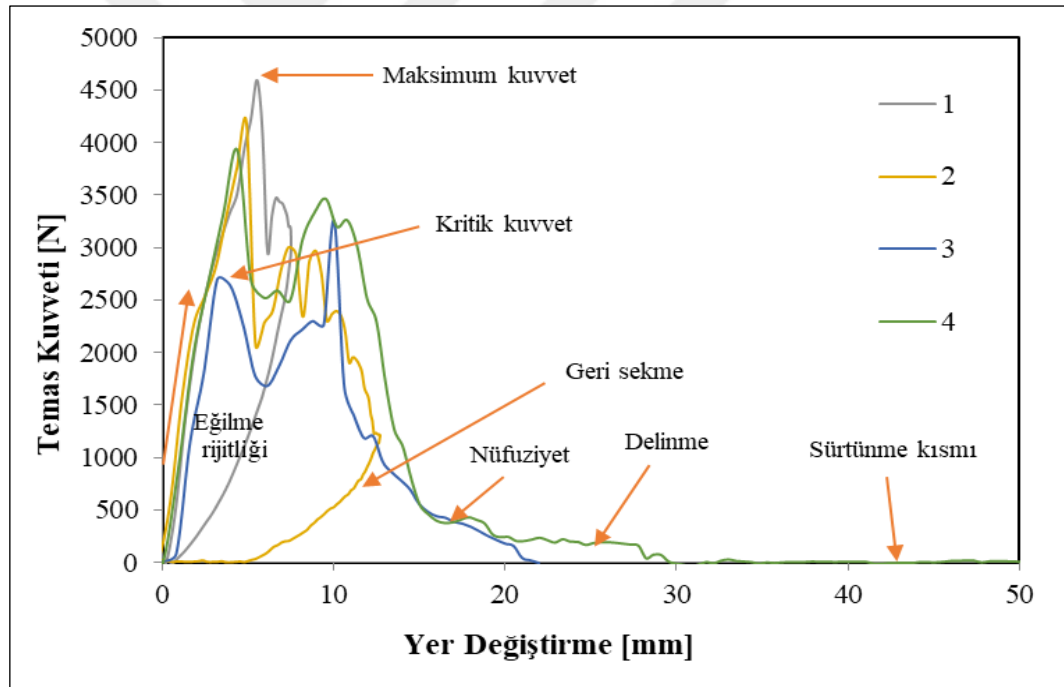
DENEY SONUÇLARI

Araştırma kapsamında yapılan düşük hızlı darbe deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak her bir deney numunesi için temas kuvveti-yer değiştirme, maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi, maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi, temas süresi-darbe enerjisi, absorbe edilen enerji-darbe enerjisi ve enerji-zaman grafikleri çizilmiştir. Deneylerden elde edilen değişkenleri değerlendirebilmek amacıyla her bir cam elyaf yoğunluk oranı ve tamirat durumu için değerler matrisi oluşturulmuş, numunelerin hasar sonrası resimleri paylaşılmıştır.

5.1 Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrileri

Düşük hızlı darbe deneyinde termoplastik malzemenin uygulanan darbe enerjisine gösterdiği tepki *temas kuvveti-yer değiştirme* eğrileri yardımıyla incelenebilmektedir. Temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri kullanılarak maksimum temas kuvveti, eğilme rijitliği ve kritik temas kuvveti gibi parametreler belirlenmektedir. *Maksimum temas kuvveti* kompozit malzemenin taşıyabileceği en büyük temas kuvveti olarak açıklanmaktadır. *Kritik kuvvet* ise temas kuvveti-yer değiştirme eğrisinde kuvvetin ani şekilde düşüş sergilediği nokta olarak açıklanmaktadır (Belingardi ve Vador, 2002). Şekil 5.1'deki örnek grafikten görüldüğü üzere grafikteki eğriler açık ve kapalı olmak üzere 2 tip şeklinde ortaya çıkmaktadır. Darbe enerjisinin seviyesine göre 3 farklı eğri oluşmaktadır. Düşük darbe enerjilerinde kapalı tip eğri, yani geri sekme eğrisi meydana gelmektedir. Başka bir deyişle, darbe deneyi sırasında uygulanmış darbe enerjisinin çoğunluğu numune tarafından absorbe edilmiştir ve absorbe edilmeyen darbe enerjisi ise vurucu ucun geri sekmesi için kullanılmıştır. Bu sebepten şekilden de görüleceği üzere 1 numaralı numune için oluşan eğri kapalı tip eğridir. Aynı zamanda temas kuvveti-yer değiştirme eğrisinin artan kısmı kompozit numunenin darbe enerjisine karşı göstermiş olduğu direnç yüzünden *eğilme rijitliği* olarak açıklanmaktadır. Darbe deneyi sırasında numuneyi delemek kadar yeterli darbe enerjisi uygulanmadığında geri sekme kısmı azalırken kapalı tip eğri genişlemekte ve yer değiştirme değeri artmaktadır. Şekil 5.1'den de görüleceği üzere 2 numaralı numune

kapalı tip olmasına karşın kapalı tip eğriden açık tip eğriye geçiş noktası olarak düşünülmektedir. Darbe enerjisinin delinme görülünceye kadar artırılmasıyla birlikte kapalı eğri açık eğriye dönüşmektedir. Eğri açık ise vurucu uç numuneye ya saplanmıştır ya da numuneyi delip geçmiştir. Şekil 5.1'den görüleceği üzere 3 numaralı numune için saplanma bir başka deyişle nüfuziyet durumu gerçekleşmiştir. Numuneye saplanan vurucu uç numune kalınlığı boyunca düşey yönde hareket etmekte ve numune üst yüzeyinden geri sekme olayı görülmemektedir. 4 nolu numune için ise delinme durumu gerçekleşmiştir. Delinme durumunda eğrilerin yatay eksenin sonuna doğru kapanan kısmı vurucu uç ile numune arasındaki sürtünmenin sonucunda meydana çıkan *sürtünme* kısmını ifade etmektedir. Bu yüzden bu noktadan sonra darbe enerjisi artık ne kadar artırılırsa artırılсын kompozit numunenin daha fazla enerjiyi absorbe etmeyeceği anlaşılmaktadır.

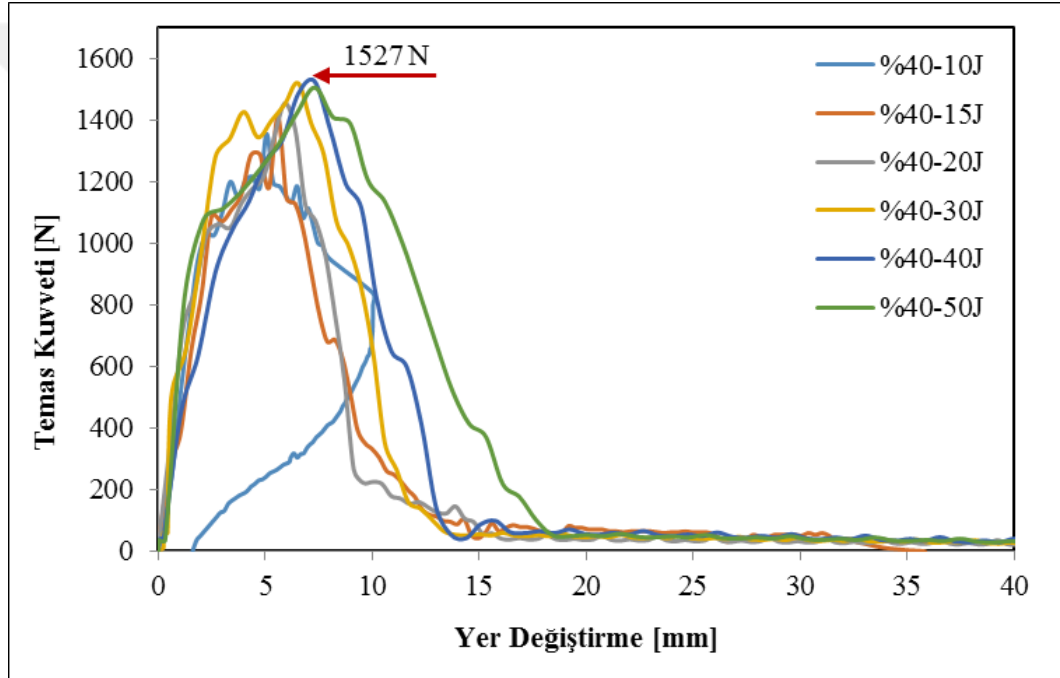


Şekil 5.1 Örnek temas kuvveti-yer değiştirme eğrisi

5.1.1 Sadece Granülden Oluşmuş %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrileri

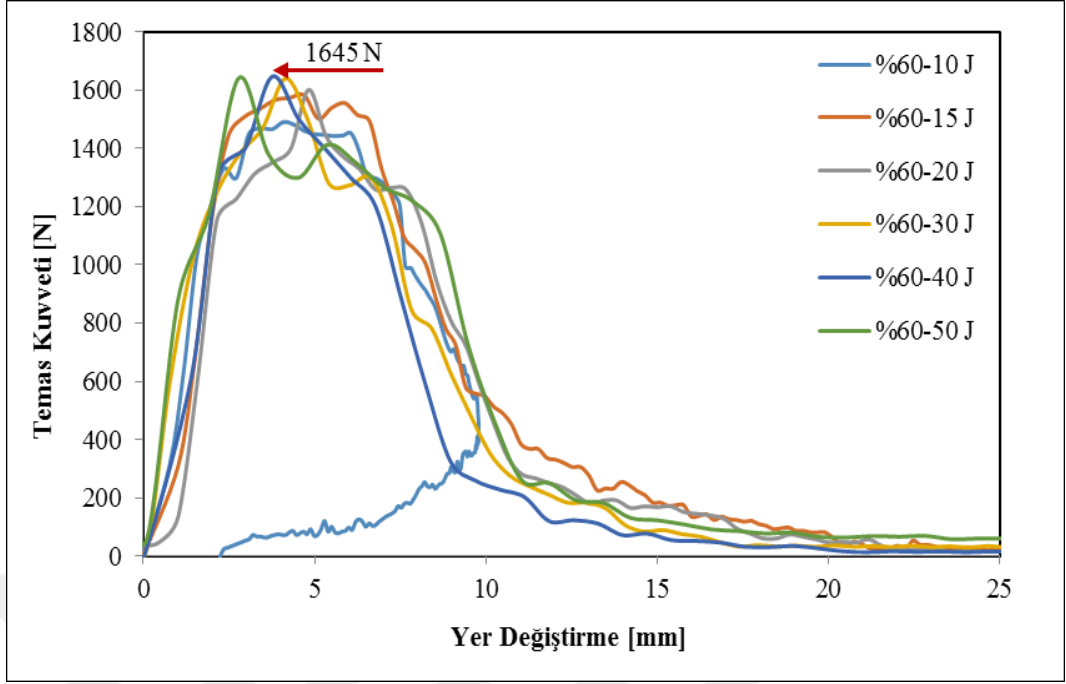
Şekil 5.2'de sadece granülden üretilmiş %40 yoğunluğa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde temas kuvveti-yer

değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Grafikteki eğrilerin alçalan kısımları incelendiğinde sadece 10J'luk darbe enerjisi seviyesinde eğrinin kapalı tip olduğu yani vurucu ucun numuneye çarparak geri sektiği anlaşılmaktadır. Darbe enerjisinin artırılmasıyla birlikte eğriler kapalı tipten açık tip eğrilere dönüşmüştür. Bu durum vurucu ucun numunelerin hepsini delip geçtiğini ifade etmektedir. Elde edilen maksimum temas kuvveti değeri 1527 N ile 40J'lük enerji seviyesinde meydana gelmektedir. Numunelerin darbeye karşı gösterdikleri direnç olarak tanımlanan ve eğrilerin maksimum temas kuvveti değerlerindeki eğim alınarak hesaplanan eğilme rijitliği değeri 209 N/mm olarak tespit edilmiştir.



Şekil 5.2 Sadece granülden oluşmuş %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

Şekil 5.3'te sadece granülden üretilmiş %60 yoğunluğa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. %40 yoğunluktaki kompozitlerde olduğu gibi %60 yoğunluğa sahip kompozitlerde de 10J'lük enerji seviyesinde geri sekme, diğer tüm enerji seviyelerinde ise delinme meydana gelmiştir. Yapılan darbe testlerinde elde edilen maksimum temas kuvveti ise 1645 N ile 40J'lük enerji seviyesinde gerçekleşmiştir. Eğilme rijitliği değeri ise 330 N/mm olarak hesaplanmıştır.

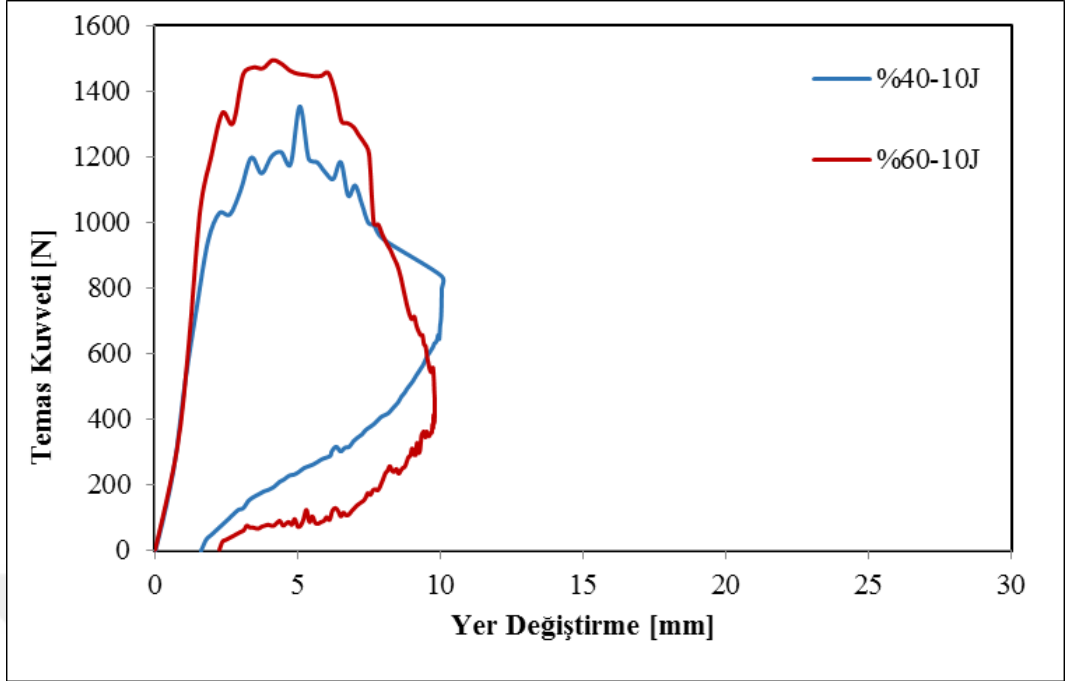


Şekil 5.3 Sadece granülden oluşmuş %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

5.1.2 Kritik Enerji Değerlerinde Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrilerinin Cam Elyaf Yoğunluk Değişimi Açısından İncelenmesi

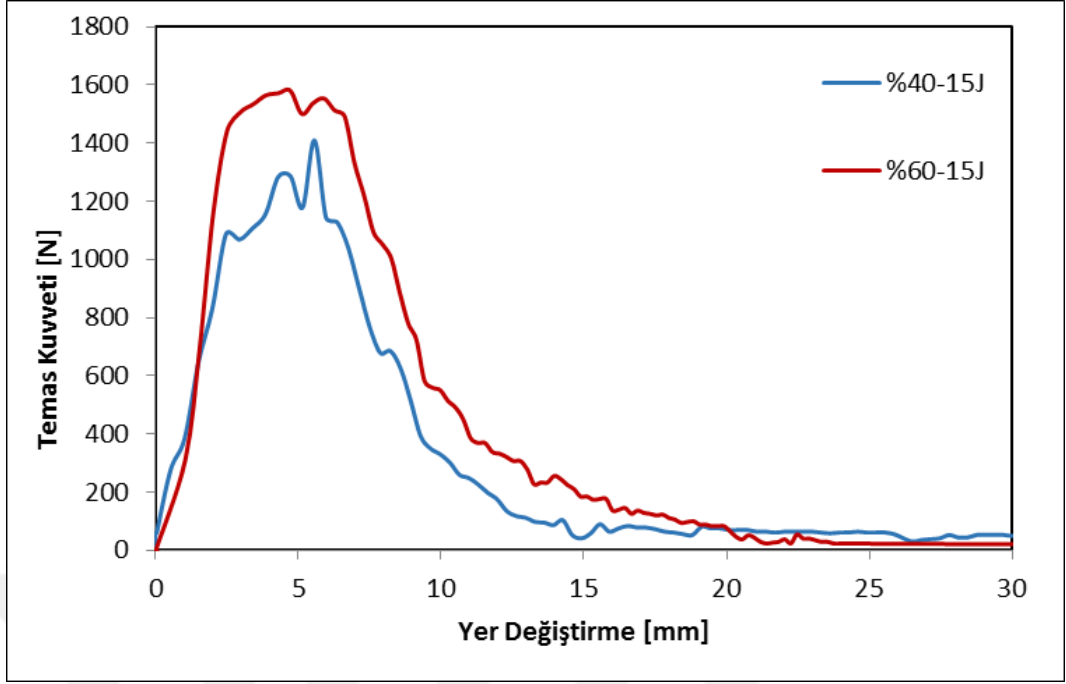
Yapılan çalışmada cam elyaf yoğunluk oranındaki değişimin kompozit malzemelerin düşük hızlı darbe dayanımları üzerindeki etkisi de araştırılmıştır. Şekil 5.4-6 grafiklerinde sırasıyla 10, 15, 40J darbe enerjisi seviyelerinde %40 ve %60 cam elyaf yoğunluk oranına sahip numunelerin temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri bir arada verilmiştir.

Şekil 5.4 incelendiğinde her iki numunenin de 10J darbe enerjisi altında kapalı tip eğri çizdiği görülmektedir. Başka bir deyişle geri sekme durumu gerçekleşmiştir. Eğriler, maksimum temas kuvveti açısından incelendiğinde %60 cam elyaf yoğunluklu numunenin %10 daha fazla temas kuvveti gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, cam elyaf takviyesi oranındaki artış ile numunelerin darbe dayanımının artmasından kaynaklanmaktadır.



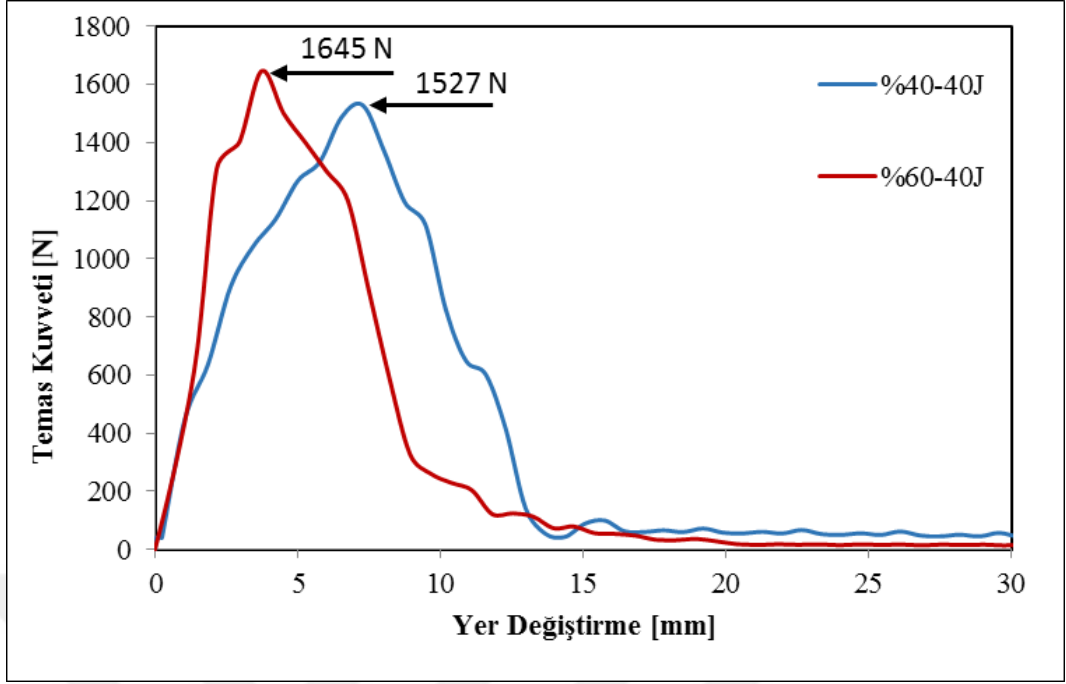
Şekil 5.4 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 10 J darbe enerjisi altındaki temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

15J'lük darbe enerjisi değeri her iki cam elyaf yoğunluğundaki numune için delinme eşiği seviyesidir. Şekil 5.5'de görüleceği üzere, bu darbe enerjisi altında her iki numune de kapalı tip eğriden açık tip eğriye geçmiştir ve delinme gerçekleşmiştir. Maksimum temas kuvveti değeri açısından incelendiğinde %60 cam elyaf takviyeli numunelerin %12 oranında daha yüksek temas kuvveti değeri gösterdiği görülmektedir. Bu durum, cam elyaf takviye miktarındaki artış ile numunelerin darbe dayanımlarının artmasından kaynaklanmaktadır. Yer değiştirme miktarlarının ise sıfırlanmadığı, eksene paralel olarak devam ettiği görülmektedir. Bu durum, vurucu uç ile numune arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.5 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 15 J darbe enerjisi altındaki temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

Şekil 5.6'da ise 40J darbe enerjisi altında, her iki numune için de delinme eşiği geçildiğinden açık tip eğriler meydana gelmiştir. Temas kuvveti değerleri her iki numune için de maksimum durumdadır ve %60 cam elyaf yoğunluklu numune için bu değer %40 cam elyaf yoğunluklu numuneden yaklaşık olarak %7 daha yüksektir. Bu durum Şekil 5.4 ve 5.5'de de ifade edildiği gibi cam elyaf takviye miktarı artışına bağlı olarak numunelerin darbe dayanımlarındaki artıştan kaynaklanmaktadır.



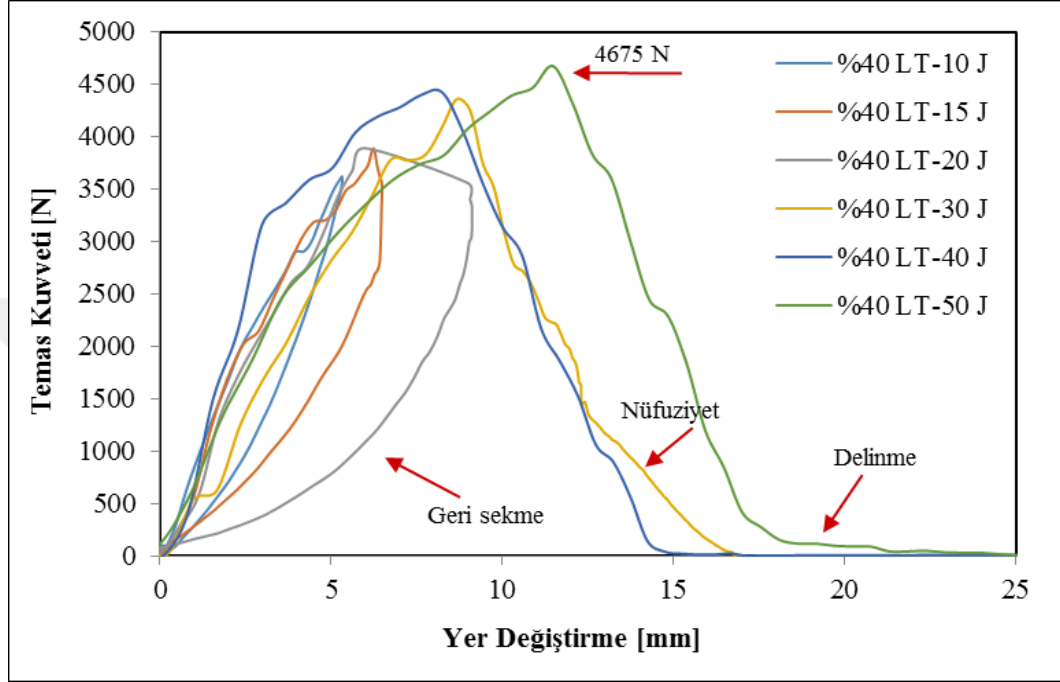
Şekil 5.6 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 40 J darbe enerjisi altındaki temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

Şekil 5.4-6 birlikte değerlendirildiğinde, her üç darbe enerjisi değerinde de maksimum temas kuvveti değerlerinin %60 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerde %40 cam elyaf yoğunluklu numunelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte numunelerin eğilme rijitliği değerleri %57 oranında artarak 209 N/mm'den 330 N/mm'ye yükselmiştir. Bu iyileşmeler, cam elyaf yoğunluk oranının artışıyla birlikte numunelerin darbe dayanımlarının artması ve daha rijit bir yapı kazanmasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerden elde edilen değerler ilerleyen bölümlerde karşılaştırmalı olarak paylaşılmıştır.

5.1.3 Lamineli Tamiratlı %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrileri

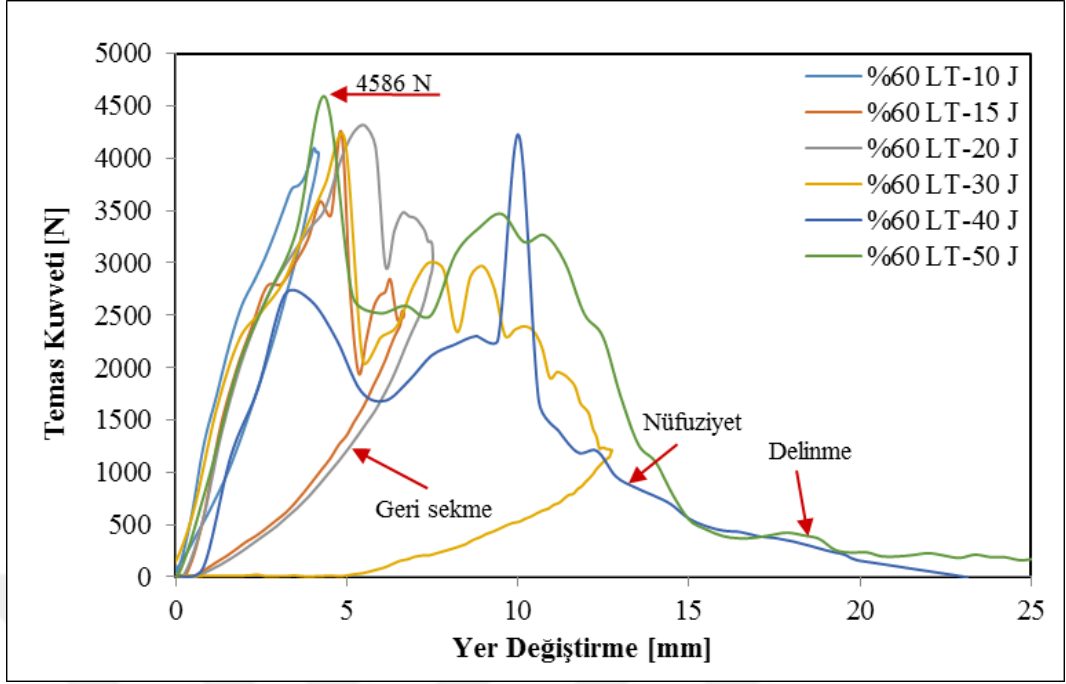
Şekil 5.7'de laminelerle tamirat işlemi uygulanmış %40 yoğunluğa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.7'deki eğriler incelendiğinde 20J enerji seviyesine kadar eğrilerin kapalı tip olduğu görülmektedir. Enerji seviyesinin artırılmasıyla birlikte grafikteki kapalı tip eğriler açık tip eğrilere dönüşmüştür. Kısaca

özetlemek gerekirse, 20J'lük enerji seviyesine kadar lamineli tamiratlı numunelerde geri sekme, 30J ve üzeri enerji seviyelerinde ise nüfuziyet ve delinme gözlemlenmiştir. Maksimum temas kuvveti değeri ise 4675 N ile 50J'lük enerji seviyesinde elde edilmiştir. Eğilme rijitliği değeri ise 603 N/mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.7 Lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

Şekil 5.8'de ise lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.8'deki eğriler incelendiğinde 20J enerji seviyesine kadar eğrilerin kapalı tip olduğu yani vurucu ucun numunelere çarparak geri sektği görülmektedir. Darbe enerjisinin 20J enerji seviyesinden 30J'a çıkarılmasıyla darbe karakteristiği kapalı tipten açık tip eğriye geçiş noktasında bulunmaktadır. Enerji seviyesinin artırılmasıyla kapalı tip eğri açık tip eğriye dönüşmüştür. Maksimum temas kuvveti değeri ise 4586 N ile 50J'lük enerji seviyesinde oluşmuştur. Eğilme rijitliği değeri ise 878 N/mm olarak hesaplanmıştır.

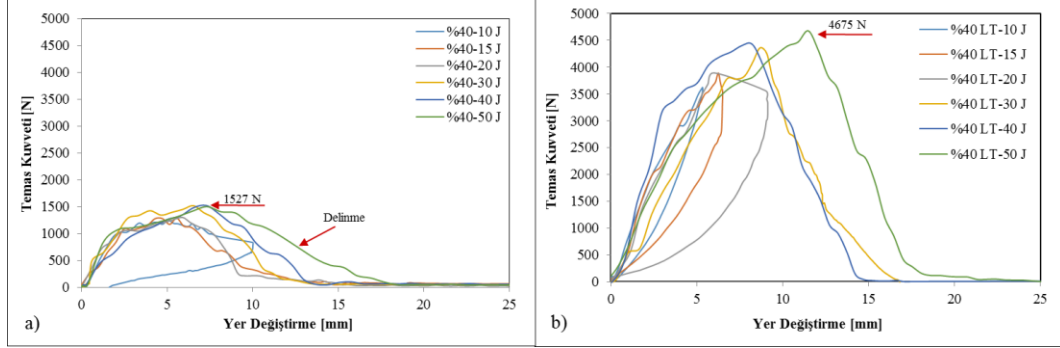


Şekil 5.8 Lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

5.1.4 Kritik Enerji Değerlerinde Kompozitlerin Temas Kuvveti-Yer Değiştirme Eğrilerinin Tamirat İşlemi Açısından İncelenmesi

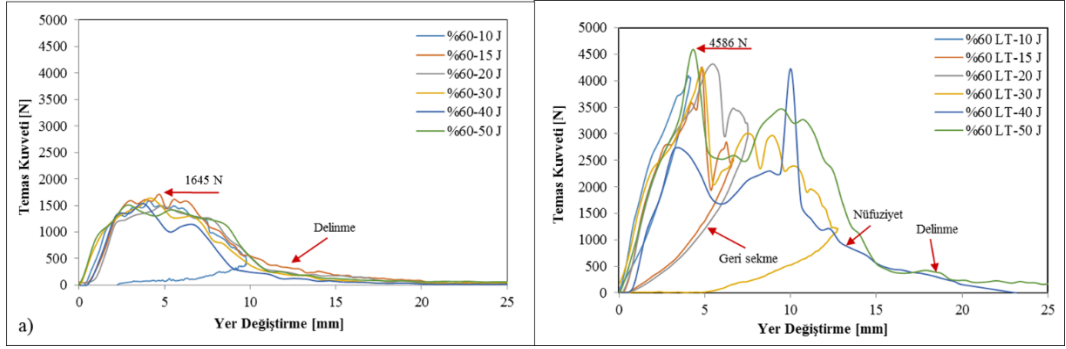
Sadece granülden üretilmiş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 10J, 15J, 20J, 30J, 40J ve 50J'lük enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 5.9 a-b'de verilmiştir. Şekil 5.9 incelendiğinde lamineli tamiratlı kompozitlerin darbe dayanımlarının, maksimum temas kuvveti düşünüldüğünde sadece granülden oluşmuş kompozitlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Eğilme rijitliği değerleri ise yaklaşık %288 artışla 209 N/mm'den 603 N/mm değerine yükselmiştir. Ayrıca, hasar tipleri açısından incelendiğinde; 10J hariç tüm enerji seviyelerinde sadece granülden oluşmuş numunelerde delinme meydana gelmişken lamineli tamiratlı numunelerde 20J'lük enerji seviyesine kadar vurucu uç numuneden geri sekmiş, 30J enerji seviyesinde ise vurucu uç numuneye saplanmış ve nüfuziyet durumu görülmüştür. 40J enerji seviyesinde nüfuziyet durumundan delinme durumuna geçiş olmuş, 50J enerji değerinde delinme gerçekleşmiş ve maksimum temas kuvveti değeri elde edilmiştir. Numunelerin darbe karakteristiklerinde görülen bu iyileşmeler tamirat işlemi ile

birlikte numunelerin darbe dayanımlarının ve rijitliklerinin artırılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.9 %40 cam elyaf takviyeli a) sadece granülden oluşmuş ve b) lamineli tamiratlı polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

Sadece granülden üretilmiş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin 10J, 15J, 20J, 30J, 40J ve 50J'lük enerji seviyesinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 5.10 a-b'de verilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde lamineli tamiratlı kompozitlerin darbe dayanımlarının, maksimum temas kuvveti düşünüldüğünde granülden oluşmuş kompozitlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Eğilme rijitliği değerleri ise yaklaşık %266 artış ile 330 N/mm'den 878 N/mm'ye yükselmiştir. Bununla birlikte, 10J hariç tüm enerji seviyelerinde sadece granülden oluşmuş numunelerde delinme meydana gelmişken lamineli tamiratlı numunelerde 30J'lük enerji seviyesine kadar vurucu uç numuneden geri sekmiştir. 30J'lük enerji seviyesinde eğri kapalı tipten açık tip eğriye geçiş noktasında bulunmaktadır. 40J darbe enerjisinde nüfuziyet, 50J darbe enerjisi değerinde ise delinme gerçekleşmiştir. Numunelerin darbe karakteristiklerinde görülen bu iyileşmeler tamirat işlemi ile birlikte artan darbe dayanımı ve rijitlikten kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.10 %60 cam elyaf takviyeli a) sadece granülden oluşmuş ve b) lamineli tamiratlı polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri

Bu çalışmalar ışığında, maksimum temas kuvveti ve eğilme rijitliği değerleri açısından tamirat işlemi ile birlikte numunelerin darbe dayanımında önemli artışlar görülmüştür. Bununla birlikte numunelerin darbe karakteristiklerinde de değişimler olmuştur. Sadece granül ile üretilen kompozit numunelerde delinme eşiği 10J seviyesinde iken tamirat işlemi ile birlikte delinme eşiği %40 cam elyaf yoğunluklu numunelerde 40J, %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerde 50J seviyelerine ulaşmıştır. Numunelerin darbe dayanımlarında görülen bu iyileşmeler, cam elyaf takviyeli polipropilen lamine malzemesinin darbe dayanımının cam elyaf takviyeli polipropilen granül malzemesine oranla daha yüksek olması ile açıklanmaktadır. Ayrıca bu sonuçlar, tamirat işlemi için belirlenen sıcaklık, yük ve soğutma süresi parametrelerinin lamine ile granül yapı arasında uygun yapışmayı sağladığını göstermektedir. Tamirat işlemi ile birlikte darbe dayanımı daha yüksek ve daha rijit numuneler elde edilmiştir.

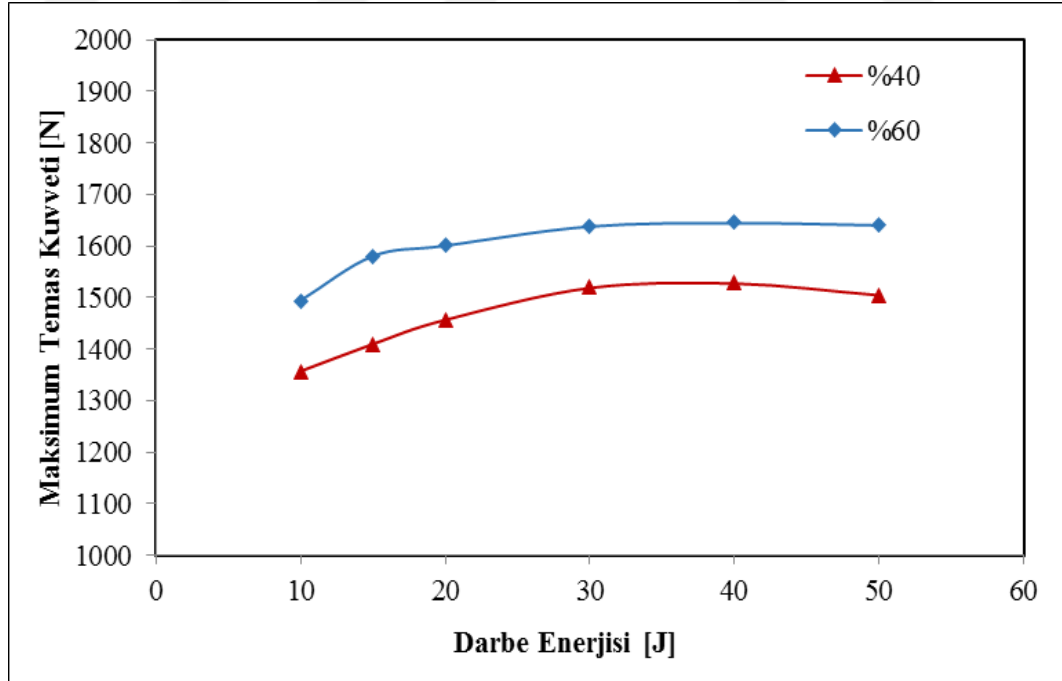
5.2 Ortalama Değerler Kullanılarak Numunelerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi

Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin darbe davranışlarını yorumlayabilmek amacıyla temas kuvveti-yer değiştirme eğrisinin yanı sıra çeşitli darbe enerjisi seviyelerinde maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi, maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi ve temas süresi-darbe enerjisi eğrileri devam eden bölümlerde detaylı bir şekilde verilmiştir.

5.2.1 Maksimum Temas Kuvveti – Darbe Enerjisi Eğrilerinin İncelenmesi

Şekil 5.11’de sadece granülden üretilmiş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum temas kuvveti değerlerinin darbe enerjisi ile değişim grafikleri gösterilmiştir. Şekil 5.11’de görüldüğü üzere, darbe enerjisinin artırılmasıyla %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerde 30J enerji seviyesine kadar maksimum temas kuvveti değerlerinde artış olmuş daha sonrasında darbe enerjisinin artırılmasına bağlı olarak maksimum temas kuvveti değerlerinde büyük değişimler görülmemiştir. Bununla birlikte her iki numune için de maksimum temas kuvveti değerleri 40J darbe enerji seviyesinde görülmüştür.

Şekil 5.11 yoğunluk artışına bağlı olarak değerlendirildiğinde, tüm enerji seviyelerinde %60 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerin maksimum temas kuvveti değerleri %40 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu doğrultuda %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerin darbe dayanımının temas kuvveti açısından daha yüksek olduğu söylenebilir.



Şekil 5.11 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi eğrileri

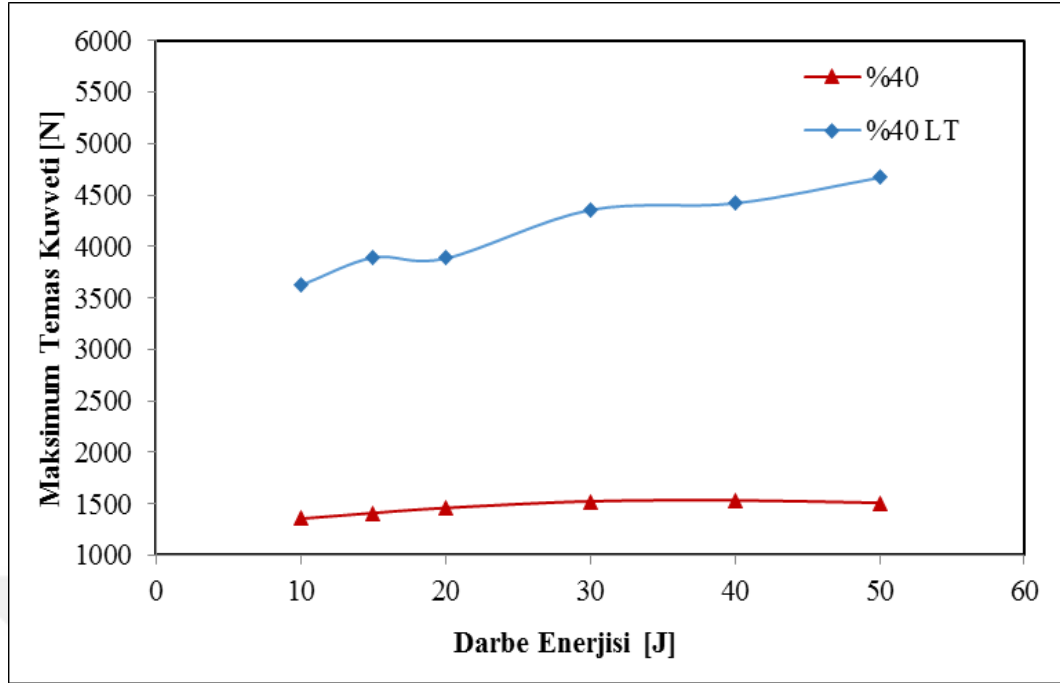
Yapılan darbe testleri sonucunda elde edilen veriler, Tablo 5.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 5.1’den de görülebileceği üzere numunelerin temas kuvvetleri arasındaki en büyük fark %12 ile 15J darbe enerjisi değerinde gerçekleşmiştir.

Tablo 5.1 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri maksimum temas kuvveti değerleri

Darbe Enerjisi	Maksimum Temas Kuvveti [N]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu
10J	1355,16	1493,07
15J	1410,30	1580,29
20J	1457,60	1600,85
30J	1519,36	1638,42
40J	1527,87	1645,21
50J	1505,15	1640,52

Şekil 5.12’de sadece granül ile üretilmiş %40 cam elyaf yoğunluklu kompozitler ile %40 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı kompozitlerin uygulanan darbe enerjisi artışına bağlı olarak maksimum temas kuvveti değerlerindeki değişim incelenmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, lamineli tamiratlı numunelerin darbe enerjisi artışına bağlı olarak maksimum temas kuvveti değerleri artmıştır.

Bu çalışma tamirat işlemi açısından değerlendirildiğinde ise Şekil 5.12’de açıkça görüldüğü üzere, lamineli tamiratlı numunelerden elde edilen maksimum temas kuvveti değerleri granül ile üretilmiş kompozit numunelere oranla daha yüksektir. Yapılan tamirat işlemi ile birlikte numunelerin darbe dayanımları ve rijitlikleri artmış, bu sayede eşit darbe enerjileri altında vermiş oldukları tepki kuvveti değerleri de yükselmiştir.



Şekil 5.12 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi eğrileri

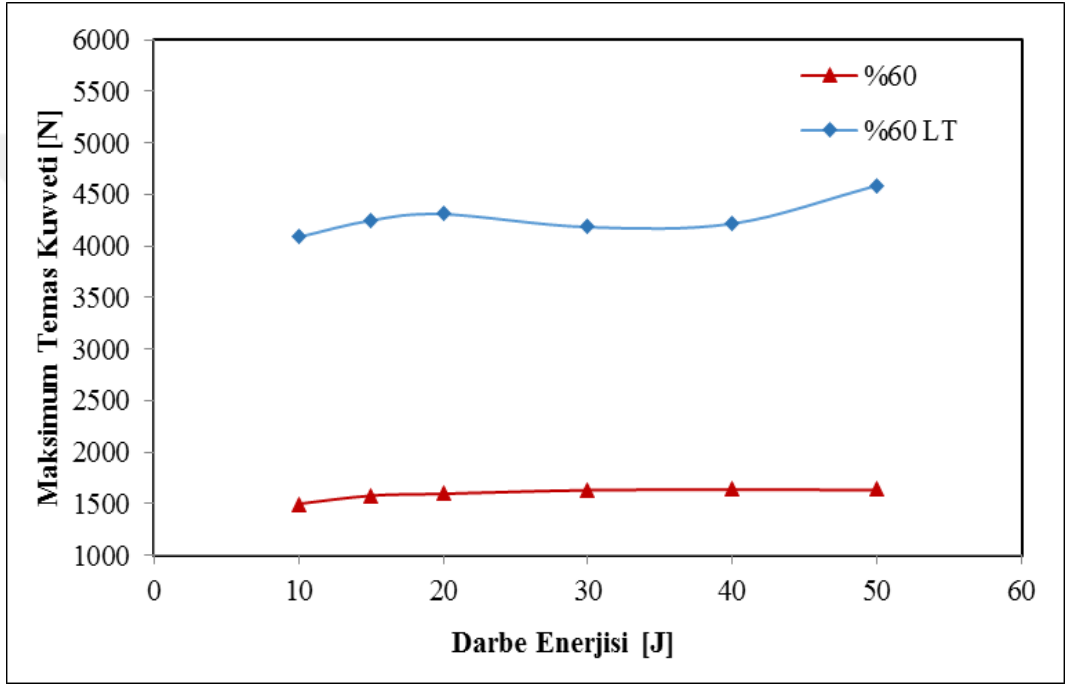
Yapılan darbe testleri sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 5.2 incelendiğinde, maksimum temas kuvvetleri arasındaki en büyük artış %310 ile 50J darbe enerjisi seviyesinde görülmüştür.

Tablo 5.2 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri maksimum temas kuvveti değerleri

Darbe Enerjisi	Maksimum Temas Kuvveti [N]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamirat
10J	1355,16	3622,66
15J	1410,30	3894,79
20J	1457,60	3886,29
30J	1519,36	4359,67
40J	1527,87	4424,88
50J	1505,15	4675,27

Şekil 5.13’de %60 cam elyaf yoğunluklu sadece granül ile üretilmiş kompozitler ile %60 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı numuneler için maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi değerleri verilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere darbe enerjisinin artışına bağlı olarak, lamineli tamiratlı kompozitlerde maksimum temas kuvveti değeri artış göstermiştir.

Bu çalışma tamirat işlemi açısından değerlendirildiğinde, lamineli tamiratlı numunelerden elde edilen maksimum temas kuvveti değerlerinin granül ile üretilmiş numunelere oranla daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. %40 cam elyaf yoğunluklu numunelerin tamirat işleminde olduğu gibi %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerin tamirat işlemi ile de maksimum temas kuvveti değerleri artmıştır. Bu durum, tamirat işlemi ile birlikte numunelerin darbe dayanımlarının ve rijitlik değerlerinin artırılmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.13 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi eğrileri

Elde edilen veriler Tablo 5.3'te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 5.3 incelendiğinde, numunelerin maksimum temas kuvvetleri arasındaki en büyük artış miktarı %279 ile 50J darbe enerjisi seviyesinde görülmüştür.

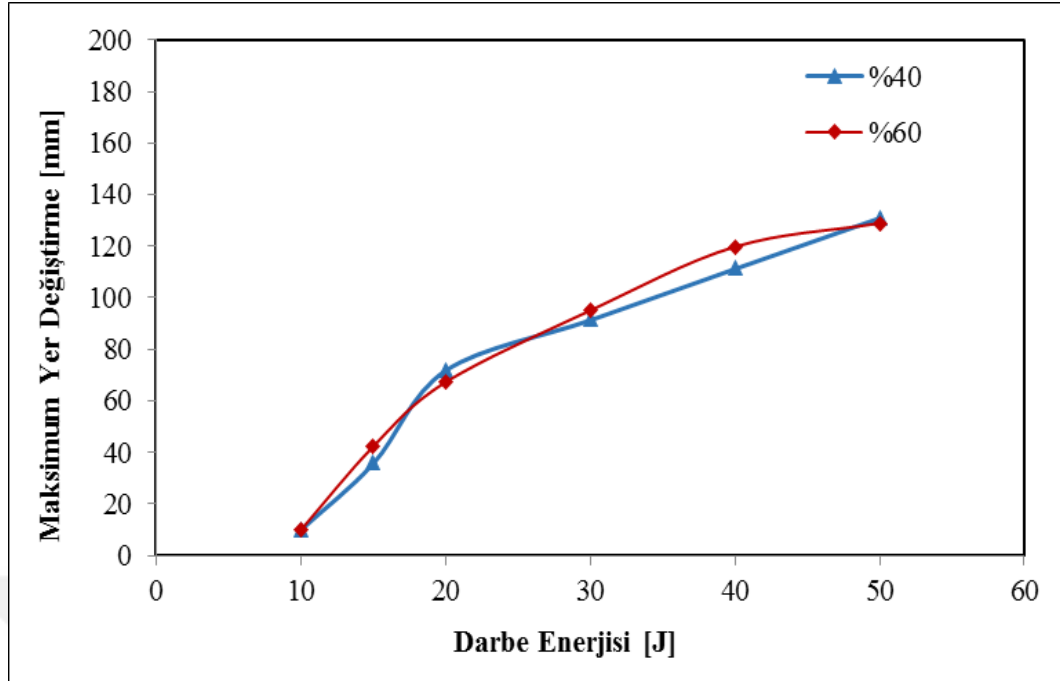
Tablo 5.3 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri maksimum temas kuvveti değerleri

Darbe Enerjisi	Maksimum Temas Kuvveti [N]	
	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamirat
10J	1493,07	4090,38
15J	1580,29	4250,27
20J	1600,85	4310,26
30J	1638,42	4186,76
40J	1645,21	4220,26
50J	1640,52	4586,44

5.2.2 Maksimum Yer Değiştirme – Darbe Enerjisi Eğrilerinin İncelenmesi

Şekil 5.14’de granül ile üretilmiş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerin darbe enerjisinin artışına bağlı olarak yer değiştirme miktarlarındaki değişim gösterilmiştir. Grafikten görüldüğü üzere, her iki yoğunluktaki numune için de darbe enerjisine bağlı olarak yer değiştirme miktarlarında artış görülmektedir. Darbe enerjisi seviyesi arttıkça, vurucu ucun numune içindeki yer değiştirme miktarı da artmıştır.

Bu çalışma cam elyaf yoğunluk oranı artışına göre değerlendirildiğinde, numunelerin yer değiştirme miktarları arasında büyük farklılıklar görülmemiştir. Bu durumun temel nedeni, numunelerin eşit darbe enerjisi seviyeleri altında benzer darbe karakteristikleri göstermesidir. 10J darbe enerjisi seviyesi iki numune için de geri sekme karakteristiğini, sonraki tüm darbe enerjisi seviyeleri ise delinme karakteristiğini ifade etmektedir.



Şekil 5.14 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri

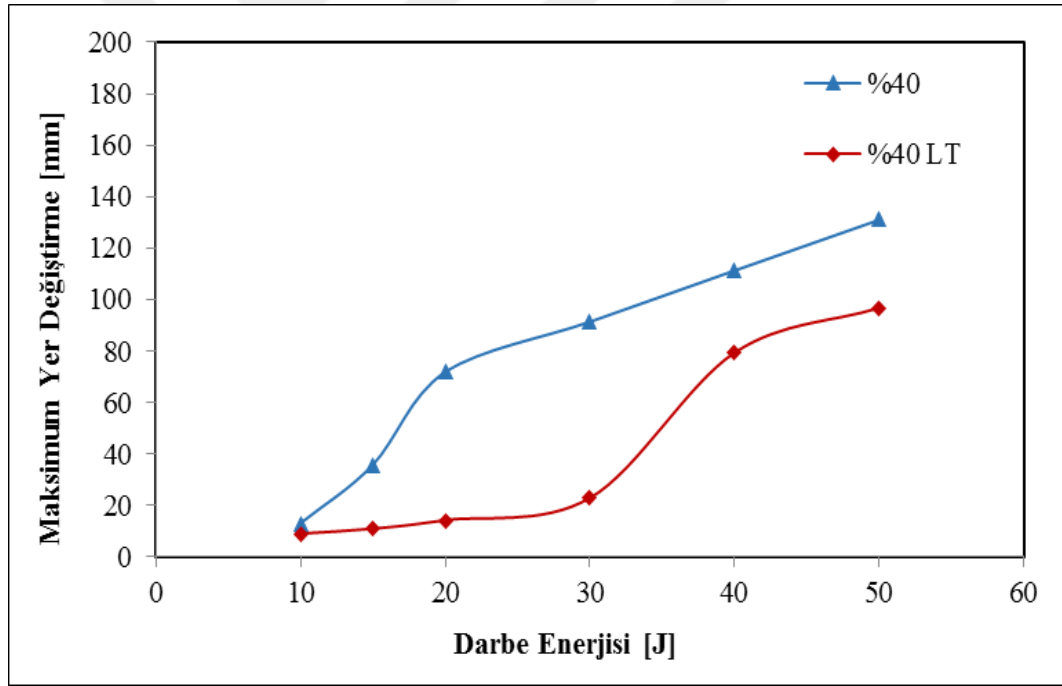
Şekil 5.14'deki veriler Tablo 5.4'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 5.4'den de görüleceği üzere %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerin eşit darbe enerjileri altında gösterdikleri yer değiştirme miktarları birbirine yakın değerler göstermiştir. Bununla birlikte numuneler arasındaki en yüksek yer değiştirme miktarı farkı, her iki numune için de delinme eşiği olan 15J darbe enerjisi altında 7 mm olarak tespit edilmiştir.

Tablo 5.4 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri yer değiştirme miktarları

Darbe Enerjisi	Maksimum Yer Değiştirme Miktarı [mm]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu
10J	10,02	9,78
15J	35,83	42,16
20J	71,94	67,17
30J	91,51	95,00
40J	111,48	119,73
50J	131,22	128,89

Şekil 5.15’de granül ile üretilmiş %40 cam elyaf yoğunluklu kompozit numuneler ile %40 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı kompozit numunelerin yer değiştirme-darbe enerjisi eğrisi bir arada verilmiştir. Şekil 5.15 incelendiğinde, her iki numune için de darbe enerjisinin artışına bağlı olarak yer değiştirme miktarlarında artış görülmektedir. Darbe enerjisi artışına bağlı olarak numunelerin delinme eşiği seviyeleri geçilmiş ve vurucu ucun numuneler içinde oluşturduğu deformasyon miktarı da artış göstermiştir.

Tamirat durumu açısından, lamineli tamiratlı numunelerde sadece granül ile üretilmiş numunelere oranla yer değiştirme miktarlarının daha düşük değerler gösterdiği görülmüştür. Bu durum, lamineli tamirat işlemi ile numunelerin darbe dayanımının arttırılarak daha rijit bir yapı haline getirilmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.15 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri

Şekil 5.15’deki veriler Tablo 5.5’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 5.5 incelendiğinde numunelerin yer değiştirme miktarları arasındaki en büyük farkın 74,7 mm ile 30J darbe enerjisi seviyesinde gerçekleştiği görülmüştür. 30J darbe enerjisi

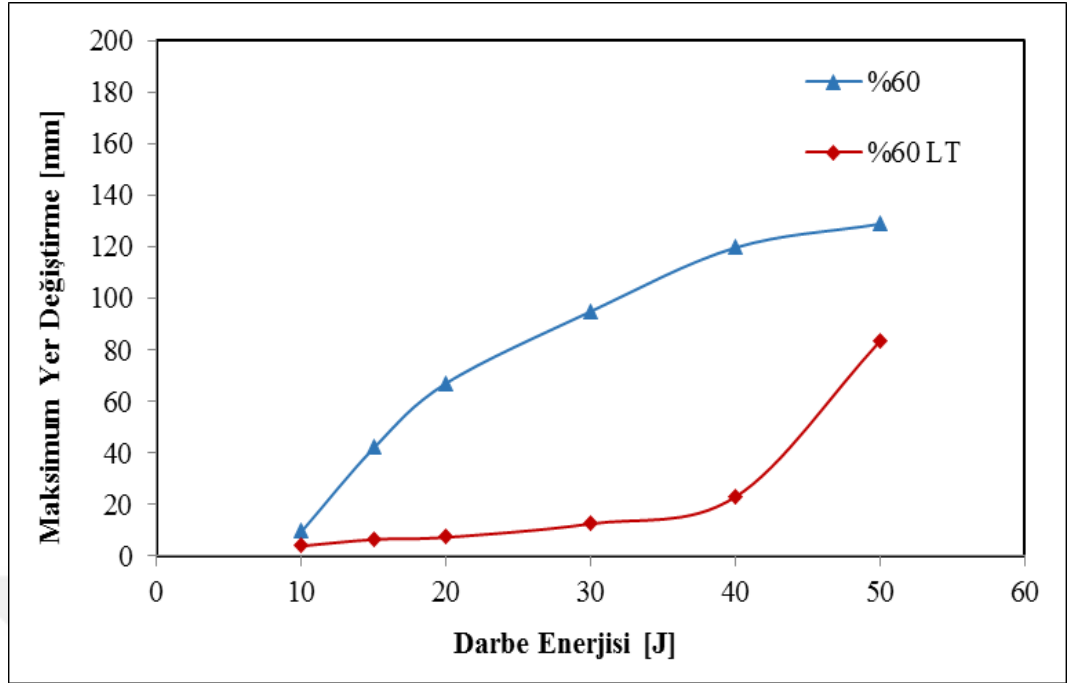
altında, sadece granül ile üretilmiş numunelerde delinme gerçekleşirken, lamineli tamiratlı numunelerde nüfuziyet durumu görülmektedir.

Tablo 5.5 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri yer değiştirme miktarları

Darbe Enerjisi	Maksimum Yer Değiştirme Miktarı [mm]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamiratlı
10J	10,02	5,98
15J	35,83	7,08
20J	71,94	9,52
30J	91,51	16,81
40J	111,48	79,20
50J	131,22	96,57

Şekil 5.16’da granül ile üretilmiş %60 cam elyaf yoğunluklu kompozitler ile %60 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı numunelerin yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri bir arada verilmiştir. Şekil 5.16 incelendiğinde, darbe enerjisi artışına bağlı olarak her iki numunenin de yer değiştirme miktarlarının arttığı görülmektedir. Bu durum Şekil 5.14 ve 5.15’de de açıklandığı üzere vurucu ucun çarpma enerjisi miktarının artışına bağlı olarak numuneler içinde oluşturduğu deformasyon miktarının artmasıyla açıklanmaktadır.

Tamirat durumu açısından değerlendirildiğinde ise, tamirat işlemi ile numunelerin darbe dayanımları ve rijitliği arttığı için yer değiştirme miktarlarının granül ile üretilmiş numunelere oranla daha düşük olduğu görülmüştür.



Şekil 5.16 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri

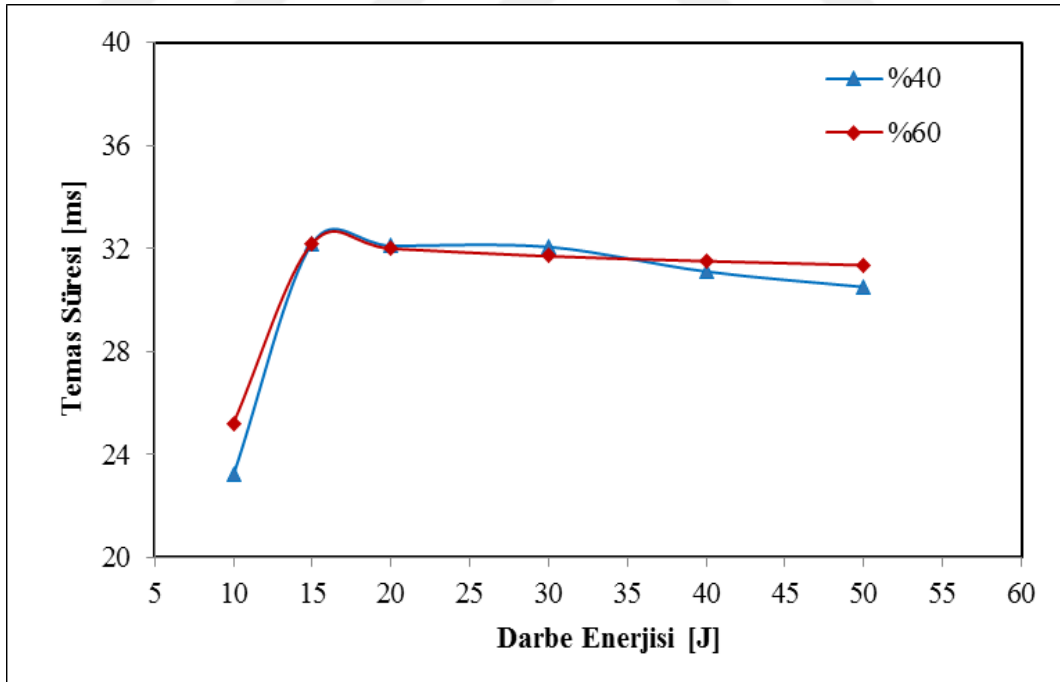
Şekil 5.16'daki veriler Tablo 5.6'da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tablo 5.6 incelendiğinde, numunelerin yer değiştirme miktarları arasındaki en büyük farkın 82,26 mm ile 30J darbe enerjisi seviyesinde gerçekleştiği görülmüştür. 30J darbe enerjisi, sadece granül ile üretilmiş numuneler için delinme durumunu ifade ederken, lamineli tamiratlı numunelerde bu enerji seviyesi altında nüfuziyet durumu gerçekleşmektedir.

Tablo 5.6 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri yer değiştirme miktarları

Darbe Enerjisi	Maksimum Yer Değiştirme Miktarı [mm]	
	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamiratlı
10J	9,78	4,16
15J	42,16	6,68
20J	67,17	7,52
30J	95,00	12,74
40J	119,73	23,11
50J	128,89	83,33

5.2.3 Temas Süresi – Darbe Enerjisi Eğrilerinin İncelenmesi

Şekil 5.17’de granül ile üretilmiş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerin darbe testlerinden elde edilen temas süresi değerlerinin darbe enerjisine bağlı değişimi gösterilmektedir. Her iki numune için de 10J enerji değerinin geri sekme durumunu, 15J enerji değerinin ise delinme durumunu gösterdiği bir önceki bölümde açıklanmıştır. Bu bilgiler ışığında, 10J darbe enerjisi seviyesinde vurucu uç, numunelere çarparak geri sekmiştir ve daha düşük bir temas süresi değeri elde edilmiştir. 15J darbe enerjisi seviyesinde ise vurucu uç numunelere çarpmış ve delip geçmiştir. Bu sebeple vurucu uç ile numuneler arasındaki temas süresi değerinde artış görülmüştür. Delinme eşiği geçildiği için 15J’den sonraki darbe enerjisi seviyelerinde temas süresi değerlerinde büyük değişimler görülmemiş ve yataya yakın değişim göstermiştir. Şekil 5.17 cam elyaf yoğunluk artışına bağlı olarak değerlendirildiğinde ise numunelerin eşit darbe enerjisi seviyeleri altında benzer darbe davranışları göstermeleri sebebiyle yakın temas süresi değerleri elde edildiği görülmüştür.



Şekil 5.17 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin temas süresi-darbe enerjisi eğrileri

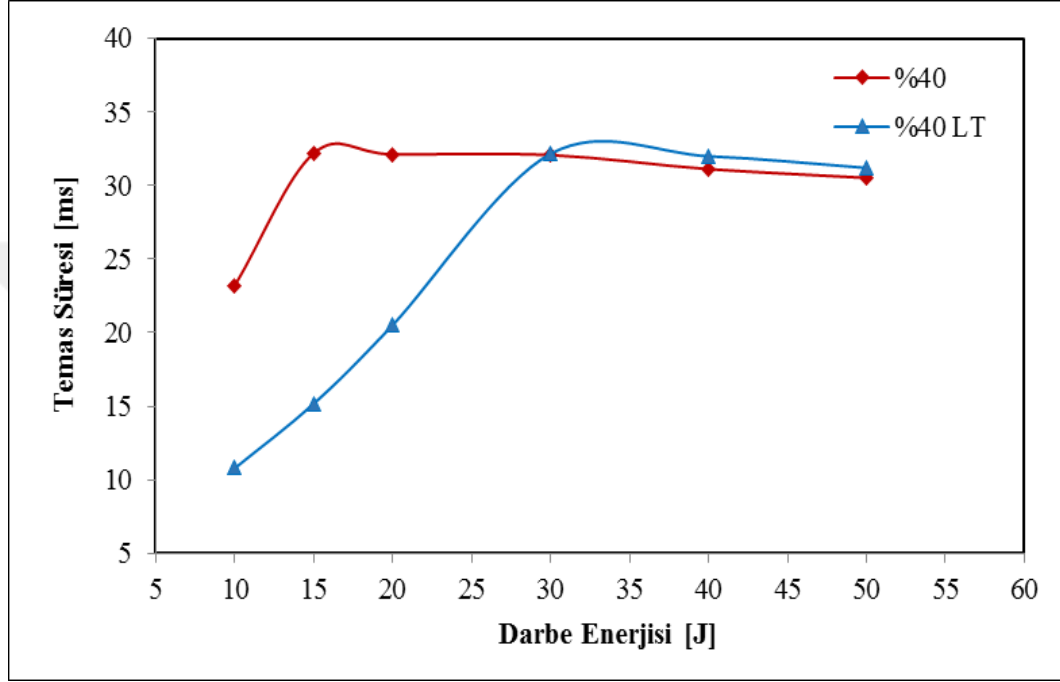
Şekil 5.17’den elde edilen veriler Tablo 5.7’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tablo 5.7’den de görüleceği üzere eşit darbe enerjisi seviyelerinde temas süresi değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Her iki numune için de 10J geri sekme, sonrasındaki darbe enerjisi değerleri delinme durumunu ifade etmektedir.

Tablo 5.7 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri temas süresi değerleri

Darbe Enerjisi	Temas Süresi [ms]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu
10J	23,21	25,20
15J	32,20	32,20
20J	32,11	32,00
30J	32,06	31,70
40J	31,10	31,51
50J	30,50	31,35

Şekil 5.18’de sadece granül ile üretilmiş %40 cam elyaf yoğunluklu kompozitler ile %40 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı numunelerin temas süresi-darbe enerjisi eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, sadece granül ile üretilmiş %40 cam elyaf yoğunluklu numunede delinme eşiği olan 15J enerji seviyesine kadar temas süresi artmış sonrasında yataya yakın devam etmiştir. Lamineli tamiratlı numunede ise 30J nüfuziyet enerji seviyesi değerine kadar temas süresi değeri artmış sonrasında yataya yakın devam etmiştir. Bu bilgiler ışığında, temas süresi değerlerinin numunelerin göstermiş olduğu darbe davranışlarına bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Vurucu uç, geri sekme durumlarında numuneye çarparak geri sekmiştir. Bu sebeple nüfuziyet veya delinme durumlarına kıyasla daha düşük temas süresi değerleri elde edilmiştir. Nüfuziyet veya delinme durumlarında ise vurucu uç numuneye saplanıp kalmış veya delip geçmiştir. Dolayısıyla numune içerisinde geri sekme durumu ile kıyaslandığında daha fazla yer değiştirmiş ve daha büyük temas süresi değerleri elde edilmiştir. Nüfuziyet veya delinme durumlarında vurucu uç ile numuneler arasında maksimum temas süresi değerleri elde edilmiş ve bu eşik enerji değerlerinden itibaren darbe enerjisinin artışına bağlı olarak temas süresi değerlerinde büyük değişimler görülmemiştir. Şekil 5.18 tamirat durumu açısından incelendiğinde temas süresi değerlerinin, %40 cam elyaf yoğunluklu laminalı tamiratlı numune için nüfuziyet eşiği olan 30J darbe enerjisi seviyesine kadar sadece granül ile üretilmiş

numuneye kıyasla daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum tamirat ile birlikte numunelerin darbe dayanımlarının artırılmasından ve geri sekme darbe davranışının 10J değerinden 30J değerine çıkarılmasıyla açıklanmaktadır. 30J ve üzeri darbe enerjisi seviyelerinde ise numuneler benzer darbe davranışları göstermiş ve yakın temas süresi değerleri elde edilmiştir.



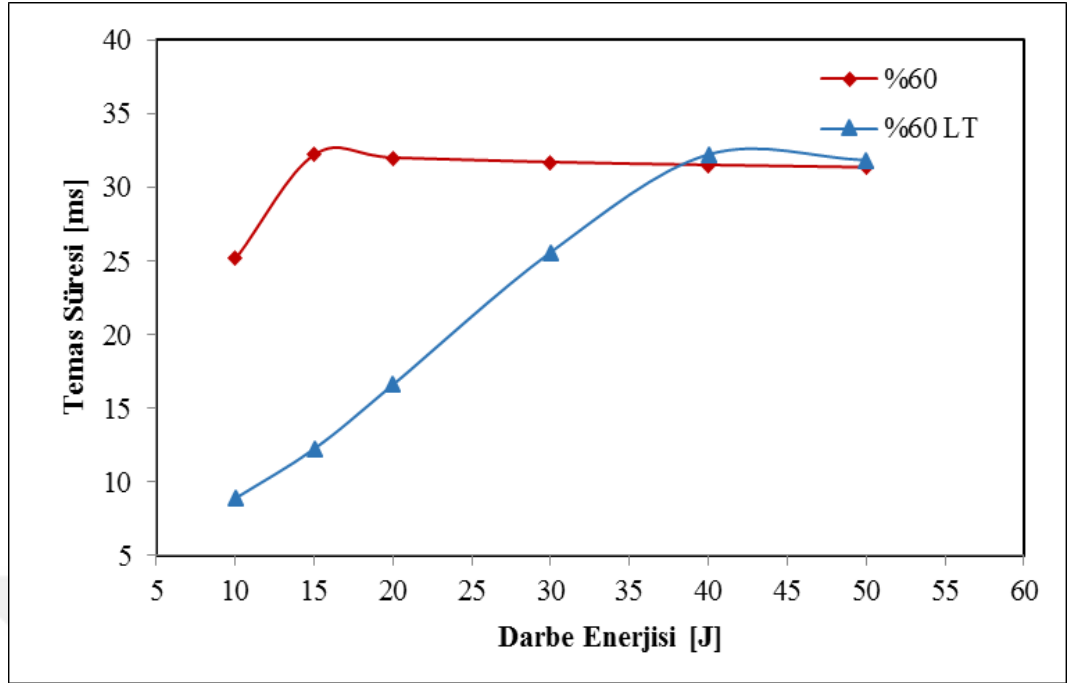
Şekil 5.18 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin temas süresi-darbe enerjisi eğrileri

Şekil 5.18'den elde edilen veriler Tablo 5.8'de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tablo 5.8 incelendiğinde, lamineli tamiratlı numunelerde nüfuziyet durumunu ifade eden 30J darbe enerjisi seviyesine kadar, sadece granülden üretilmiş numunelere kıyasla temas süresi değerleri daha düşük gerçekleşmiştir. 30J ve üzeri darbe enerjisi seviyelerinde ise temas süresi değerlerinin yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 5.8 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri temas süresi değerleri

Darbe Enerjisi	Temas Süresi [ms]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamiratlı
10J	23,21	10,80
15J	32,20	15,20
20J	32,11	20,56
30J	32,06	32,20
40J	31,10	32,01
50J	30,50	31,22

Sadece granül ile üretilmiş %60 cam elyaf yoğunluklu numune ve %60 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı numune için temas süresi-darbe enerjisi değerleri Şekil 5.19’da verilmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere, önceki deneylerde olduğu gibi numunelerin delinme eşiği darbe enerji seviyeleri olan 15J ve 40J değerlerine kadar temas süresi değerleri artmış sonrasındaki enerji seviyelerinde yataya yakın devam etmiştir. Şekil 5.18’de de açıklandığı üzere, temas süresi değerleri numunelerin darbe davranışları ile ilişkili olarak değişmektedir. Her iki numune için de nüfuziyet veya delinme durumlarında vurucu uç numuneler içinde daha fazla yer değiştirmiş ve geri sekme durumlarına kıyasla daha büyük temas süresi değerleri elde edilmiştir. Nüfuziyet veya delinme eşik enerjisi değerleri geçildikten sonra ise temas süresi değerlerinde büyük değişimler olmamıştır. Şekil 5.18 tamirat durumu açısından değerlendirildiğinde temas süresi değerlerinin %60 cam elyaf takviyeli tamiratlı numune için nüfuziyet davranışının görüldüğü 40J darbe enerjisi seviyesine kadar sadece granülden üretilmiş numuneye kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durum, sadece granülden üretilmiş numunenin geri sekme davranışının 10J’dan tamirat işlemi ile birlikte 40J seviyesine çıkarılmasıyla açıklanmaktadır. 40J eşik enerji seviyesinden itibaren ise numuneler benzer darbe davranışı göstererek yakın temas süresi değerleri vermiştir.



Şekil 5.19 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin temas süresi-darbe enerjisi eğrileri

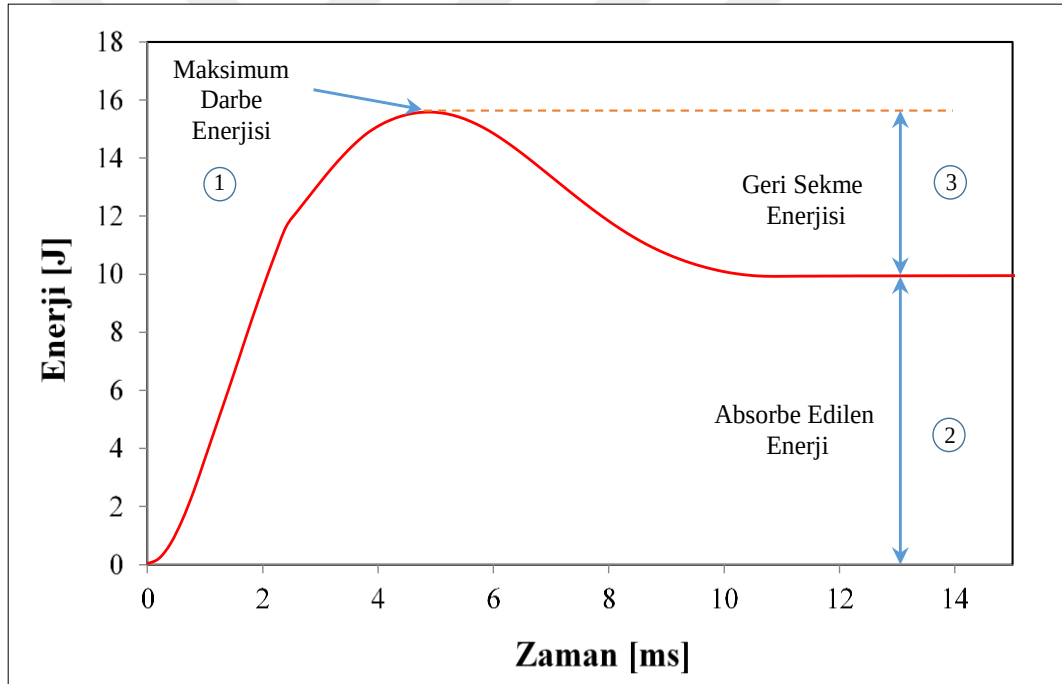
Yapılan bu çalışmadan elde edilen temas süresi değerleri Tablo 5.9'da karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Tablo 5.9 incelendiğinde, lamineli tamiratlı numunelerde nüfuziyet değeri olan 40J enerji seviyesine kadar temas süresi değerlerinin sadece granül ile üretilmiş numunelere kıyasla daha düşük sonuçlar verdiği görülmüştür. 40J ve üzeri darbe enerjisi seviyelerinde numunelerin temas süresi değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmüştür.

Tablo 5.9 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında gösterdikleri temas süresi değerleri

Darbe Enerjisi	Temas Süresi [ms]	
	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamiratlı
10J	25,20	8,89
15J	32,20	12,25
20J	32,00	16,60
30J	31,70	25,57
40J	31,51	32,20
50J	31,35	31,81

5.3 Enerji-Zaman Eğrileri

Enerji-zaman eğrileri darbe sonrası kompozit numuneler ile ilgili önemli bilgiler veren grafik türlerinden bir tanesidir. Enerji-zaman eğrileri, deney sırasında vurucu uçtan numuneye aktarılan enerji miktarı, kompozit numune üzerinde en çok hasar yaratan darbe enerjisi seviyesine kadar artış sergiledikten sonra ulaşabildiği maksimum değerden düşüp yatay şekil alarak sabit bir yol izlemektedir (Şekil 5.20). Grafik üzerinde ulaşılan maksimum nokta darbe enerjisini (1), yatay kısımda ulaştığı sabit değer ise absorbe edilen enerjiyi (2) ifade etmektedir. Yatay kısım ile maksimum nokta arasındaki fark ise geri sekme enerjisine (3) eşittir (Sun, Sun, Wang, Chang ve Li, 2018).

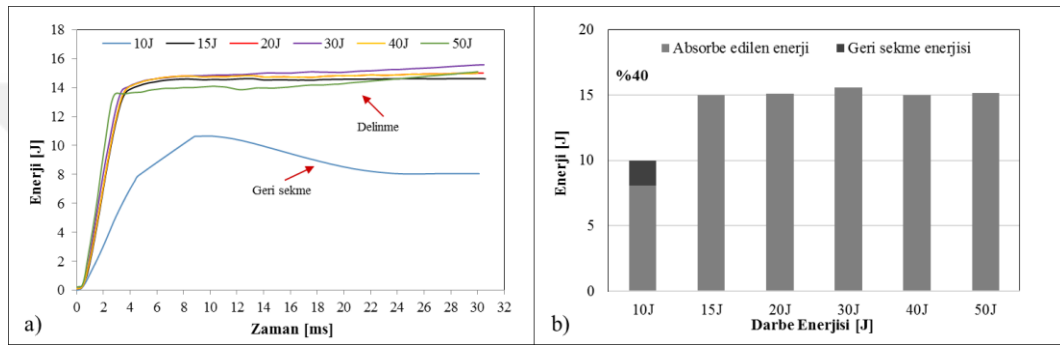


Şekil 5.20 Örnek enerji-zaman grafiği

5.3.1 Sadece Granülden Oluşmuş %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Enerji-Zaman Eğrileri

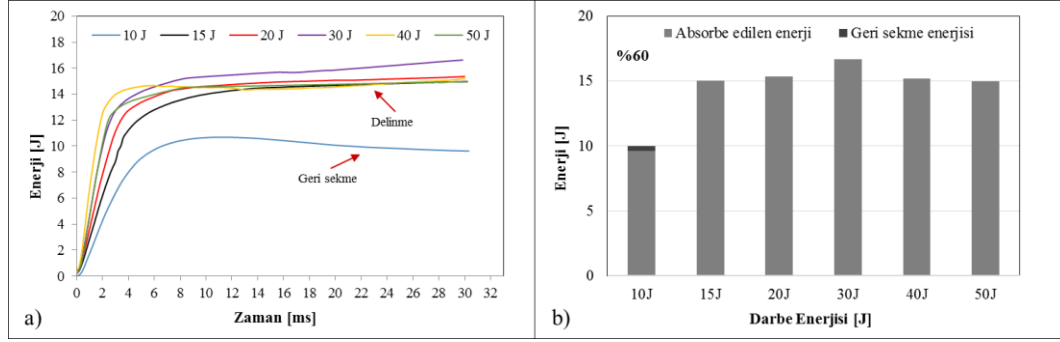
Enerji-zaman grafiklerinde inceleme artan darbe enerjisine göre yapılmıştır. Şekil 5.21-a'da sadece granülden üretilmiş %40 yoğunluğa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde enerji-zaman eğrileri

gösterilmektedir. 5.21-b’de ise farklı enerji seviyelerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve geri sekme enerji dağılımı miktarları verilmiştir. Şekil 5.21 a-b’deki enerji-zaman eğrileri incelendiğinde 10J enerji seviyesinde absorbe edilen enerji değeri 8,08J, geri sekme enerjisi ise 1,92J olmuştur. 15J enerji seviyesinde ise delinme durumu gerçekleşmiş ve bu enerji seviyesinden sonra darbe enerjisinin artışına bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarında büyük değişimler olmamıştır. Maksimum absorbe edilen enerji değerinin 15,6J ile 30J enerji seviyesinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.21 Sadece granülden oluşmuş %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları

Şekil 5.22 a-b’de sırasıyla sadece granülden üretilmiş %60 yoğunluğa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde enerji-zaman eğrileri ve farklı enerji seviyelerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve geri sekme enerji dağılımı miktarları gösterilmiştir. Şekil 5.22 a-b’deki eğriler incelendiğinde 10J enerji seviyesinde absorbe edilen enerji değeri 9,61J, geri sekme enerjisi ise 0,39J olmuştur. %40 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerde olduğu gibi 15J darbe enerjisi değerinde delinme durumu görülmüş, darbe enerjisinin arttırılmasına bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarında büyük değişimler olmamıştır. Bununla birlikte maksimum absorbe edilen enerji değerinin 16,66J ile 30J enerji seviyesinde gerçekleştiği görülmüştür.



Şekil 5.22 Sadece granülden oluşmuş %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları

5.3.2 Kritik Enerji Seviyelerinde Kompozitlerin Enerji – Zaman Eğrilerinin Cam Elyaf Yoğunluk Değişimi Açısından İncelenmesi

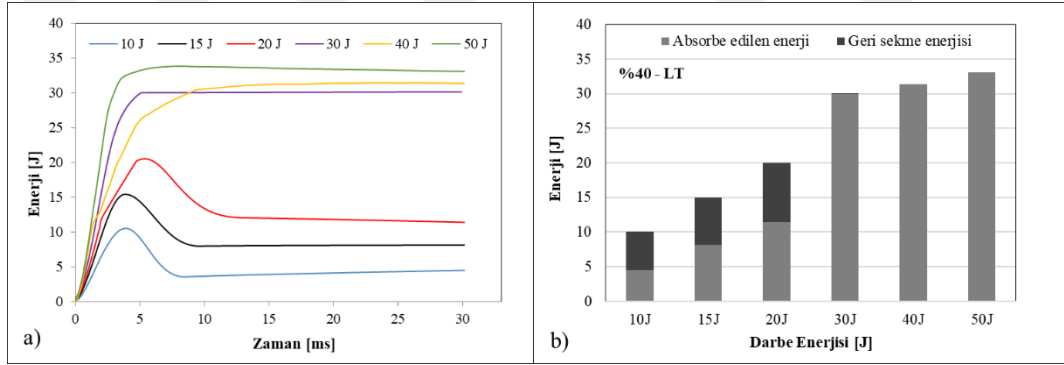
Her bir darbe enerjisi değerinde %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerin absorbe ettiği enerji miktarı Tablo 5.10’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tablo 5.10’dan cam elyaf yoğunluk oranının %40’dan %60’a çıkarılmasıyla, numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarlarında büyük değişimler olmadığı, yaklaşık %7 oranında bir artış olduğu görülmektedir. Bu durumun temel nedeni farklı cam elyaf yoğunluğundaki bu numunelerin darbe karakteristiklerinin benzer olmasından kaynaklanmaktadır. Her iki numune için de 15J darbe enerjisi delinme eşiği seviyesidir. Bu sebeple 15J’den sonra uygulanacak farklı darbe enerjileri seviyelerinde numunelerin absorbe edebilecekleri enerji miktarlarında büyük değişimler olmadığı, birbirine yakın değerler elde edildiği görülmüştür.

Tablo 5.10 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında absorbe ettikleri enerji miktarları

Darbe Enerjisi	Absorbe Edilen Enerji Miktarı [J]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu
10J	8,08	9,61
15J	15,00	15,01
20J	15,10	15,36
30J	15,60	16,66
40J	15,01	15,20
50J	15,16	14,96

5.3.3 Lamineli Tamiratlı %40 ve %60 Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Enerji-Zaman Eğrileri

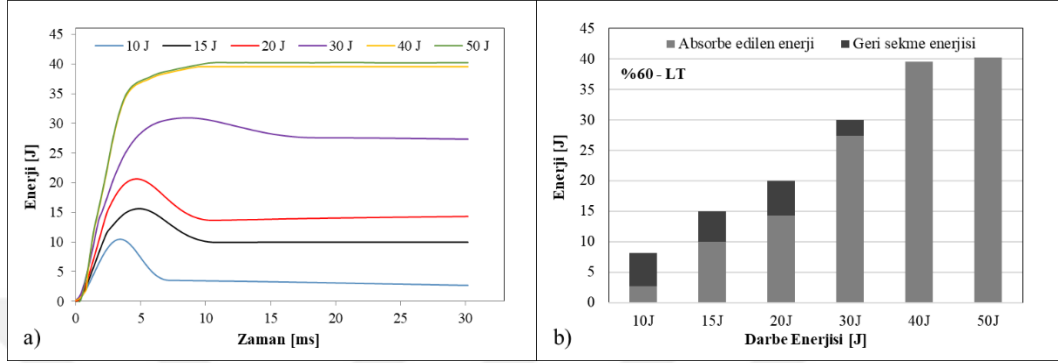
Şekil 5.23 a-b’de sırasıyla lamineli tamiratlı %40 yoğunluğa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde enerji-zaman eğrileri ve farklı enerji seviyelerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve geri sekme enerji dağılımı miktarları gösterilmiştir. Şekil 5.23 a-b’de laminelerle tamirat işlemi uygulanmış numuneler için oluşturulan grafikler incelendiğinde darbe enerjisinin 30J’e arttırılmasıyla birlikte geri sekme enerjisi azalırken absorbe edilen enerji miktarı artmıştır. 10J, 15J ve 20J darbe enerjisi seviyelerinde geri sekme durumu görülmüş ve sırasıyla 4,47J, 8,11J ve 11,45J enerji absorbe edilmiştir. 30J darbe enerjisi değerinde ise nüfuziyet durumu gerçekleşmiş ve numune darbe enerjisinin tamamını absorbe etmiştir. Başka bir deyişle vurucu uç numuneye saplanmış. Bu darbe enerjisi değerinden sonra absorbe edilen enerji miktarında önemli oranda değişimler olmamakla birlikte maksimum absorbe edilen enerji değeri 50J enerji seviyesinde 33,1J olmuştur.



Şekil 5.23 Lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları

Şekil 5.24 a-b’de ise sırasıyla lamineli tamiratlı %60 yoğunluğa sahip cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde enerji-zaman eğrileri ve farklı enerji seviyelerinden elde edilen absorbe edilen enerji ve geri sekme enerji dağılımı miktarları gösterilmiştir. Şekil 5.24 a-b incelendiğinde 40J enerji seviyesine kadar, darbe enerjisinin arttırılmasıyla birlikte geri sekme enerjisi azalırken absorbe edilen enerji miktarı artmaktadır. 10J, 15J, 20J ve 30J darbe enerjisi

değerlerinde geri sekme durumu görülmüş ve sırasıyla 2,62J, 9,94J, 14,29J, 27,37J enerji absorbe edilmiştir. 40J değerinde ise nüfuziyet gerçekleşmiş ve numune darbe enerjisinin tamamını absorbe etmiştir. Maksimum absorbe edilen enerji değeri 50J enerji seviyesinde 40,20J olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.24 Lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin a) enerji-zaman eğrileri ve b) farklı enerji seviyelerinden elde edilen enerji dağılımı miktarları

5.3.4 Kritik Enerji Seviyelerinde Kompozitlerin Enerji-Temas Süresi Eğrilerinin Tamirat İşlemi Açısından İncelenmesi

Tablo 5.11’de sadece granülden oluşmuş %40 cam elyaf yoğunluklu kompozit numuneler ile %40 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı kompozit numunelerin Enerji – Temas süresi eğrilerinden elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Tablo 5.11 incelendiğinde tamirat işlemi ile numunelerin delinme eşiğinin 15J seviyesinden 30J seviyesine yükseldiği ve numunelerin absorbe edebilecekleri enerji seviyesinin 15,6J’den 33,1J seviyesine çıktığı görülmektedir. Numunelerin absorbe ettikleri enerji seviyelerindeki bu artış, tamirat işlemi ile birlikte numunelerin darbe dayanımlarının artırılmasından kaynaklanmaktadır. Bu sayede numunelerin nüfuziyet veya delinme eşikleri yükselmiş ve absorbe edebilecekleri enerji miktarları da artmıştır.

Tablo 5.11 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında absorbe ettikleri enerji miktarları

Darbe Enerjisi	Absorbe Edilen Enerji Miktarı [J]	
	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%40 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamirat
10J	8,08	4,47
15J	15,00	8,11
20J	15,10	11,45
30J	15,60	30,01
40J	15,01	31,37
50J	15,16	33,10

Tablo 5.12’de %60 cam elyaf yoğunluğa sahip kompozit numunelerin enerji – temas süresi eğrileri tamirat durumu açısından değerlendirilmiştir. Tablo 5.12 incelendiğinde sadece granül ile üretilmiş kompozit numunenin delinme eşiğinin 15J seviyesinden 40J seviyesine yükseldiği ve absorbe edilen enerji miktarının 16,66J’dan 40,20J seviyesine çıktığı görülmektedir. Numunelerin absorbe ettikleri enerji seviyesindeki bu artış tamirat işlemi ile birlikte numunelerin darbe dayanımlarının artırılmasından kaynaklanmaktadır. Darbe dayanımları artan numuneleri hasara uğratmak için daha büyük darbe enerjileri gerekmiş ve numunelerin eşit darbe enerjisi seviyeleri altında absorbe edebilecekleri enerji miktarları artmıştır.

Tablo 5.12 Sadece granülden üretilmiş ve lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin çeşitli darbe enerjileri altında absorbe ettikleri enerji miktarları

Darbe Enerjisi	Absorbe Edilen Enerji Miktarı [J]	
	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Granül	%60 Cam Elyaf Yoğunluğu - Tamirat
10J	9,61	2,62
15J	15,01	9,94
20J	15,36	14,29
30J	16,66	27,37
40J	15,20	39,54
50J	14,96	40,20

Bu çalışmalardan hareketle, tamirat işleminin numunelerin darbe karakteristikleri üzerinde önemli etkisinin olduğu görülmektedir. Yapılan tamirat işlemleri ile numunelerin absorbe edebilecekleri enerji miktarlarında, %40 cam elyaf yoğunluklu numunelerde yaklaşık %212, %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerde ise yaklaşık %241 artış sağlanmıştır. Numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarlarındaki bu artış,

tamirat işlemi ile darbe dayanımlarının ve rijitliklerinin artırılmış olması ile açıklanmaktadır.

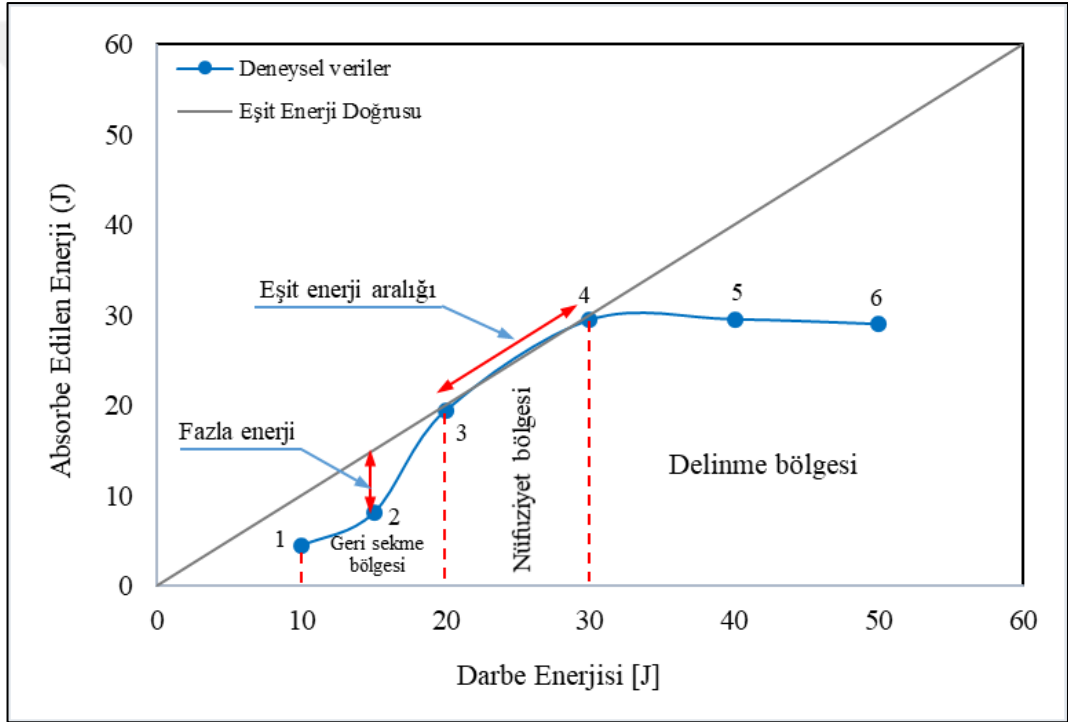
5.4 Enerji Profili Metodu

Enerji profili metodu kompozit malzemelerin darbe yüklemesi altında enerji absorbe edebilme davranışları hakkında fikir bildiren önemli bir diyagramdır. Bunun yanı sıra bu metot, absorbe edilen enerji ile darbe enerjisinin karşılaştırılması, vurucu uç tarafından delinme sınır değerlerinin ve vurucu ucun numunelere saplanma sınır değerlerinin belirlenmesi yönünden de yardımcı bir metottur.

Şekil 5.25’de deney sonrası elde edilen verilere göre çizilmiş örnek bir *enerji profili diyagramı* gösterilmiştir. Absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi arasında daha net değerlendirmeler yapmak ve ilişkiyi anlayabilmek amacıyla bu diyagram üzerinde köşegen bir çizgi çizilmiştir. Bu köşegen çizgi *eşit enerji doğrusu* olarak adlandırılmaktadır. Eşit enerji doğrusunun yanı sıra, deney sonrası elde edilen verilerden (kompozit numunelerin absorbe ettikleri enerji ve darbe enerjisi) yola çıkarak *en küçük kareler metoduna* (least squares method) göre bir eğri çizilerek veri noktaları arasındaki bağlantı sağlanmıştır.

Şekil 5.25’deki diyagram incelendiğinde 1, 2 ve 3 numune verilerine ait değerlerin eşit enerji doğrusunun altında kalması vurucu ucun numuneye çarparak geri sektiğini ve orada fazla enerji olduğunu göstermektedir. Ortaya çıkan fazla enerji absorbe edilen enerji ve darbe enerjisi arasındaki fark olup deney sonrasında vurucu uça kalan enerji olduğu için, vurucu ucun numuneye çarptıktan sonra ortaya çıkan geri sekme için kullanılmaktadır (Liu, 2004). Üçüncü numune incelendiğinde ise bu noktadan itibaren vurucunun numuneye saplanma sınır değerlerine yaklaştığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, 3. numunenin eşit enerji doğrusu üzerinde olması vurucunun numuneye saplanma sınır değeri (penetration threshold) konumunda bulunduğunu ve absorbe edilen enerji ile darbe enerjisinin birbirine eşdeğer olduğu başlangıç noktası açıklamaktadır. Üçüncü ve dördüncü numuneler arasındaki eğri eşit enerji doğrusu üzerinde bulunduğundan bu aralık *eşit enerji aralığı* adlandırılmaktadır. Eşit enerji aralığında kompozit

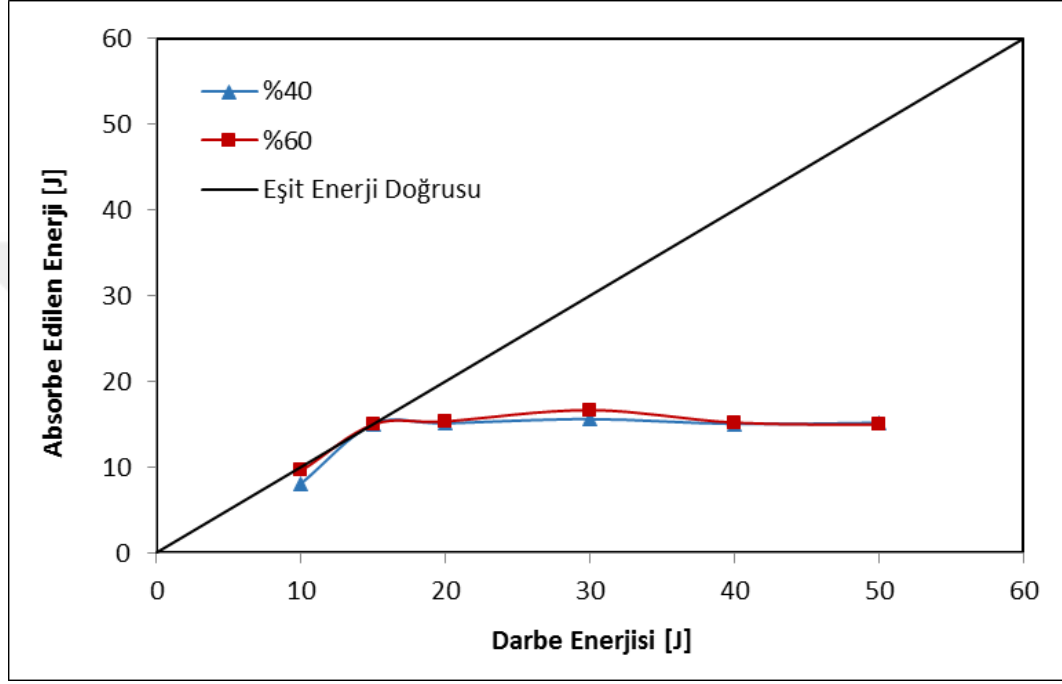
numunenin rijitliği azalarak numunede fiber kırılmaları oluşmaktadır. 4 numaralı kompozit numune *delinme sınırı* (perforation threshold) temsil etmektedir. Bu sınır bölgesinde vurucu uç numuneyi delip geçer ve bu noktadan sonra absorbe edilen enerji yataya yakın bir değerde kalmaktadır. Ancak kompozit numunede değişik hasar modları yaratması sonucunda çok az da olsa enerji artışını görülebilmektedir. Bu darbe enerjisinde kompozit numunenin delinme eşiğine yaklaşıldığı için numune ile vurucu uç arasında yalnız sürtünme vardır ve bu noktadan sonra darbe enerjisi artırılrsa bile daha önce oluşan hasarlardan farklı daha fazla hasar meydana gelmemektedir (5 ve 6 nolu numune).



Şekil 5.25 Örnek enerji profili diyagramı

Absorbe edilen enerji-darbe enerjisi grafiklerinde inceleme artan darbe enerjisine göre yapılmıştır. Şekil 5.26'da sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluğuna sahip polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde absorbe ettikleri enerji-darbe enerjisi eğrileri gösterilmektedir. Şekil 5.26 incelendiğinde 10J enerji değeri %40 cam elyaf yoğunluklu numunelerde geri sekme durumunu, %60 cam elyafı numunelerde ise geri sekme ve nüfuziyet sınır durumunu göstermektedir. %40 ve %60 cam elyaf yoğunluğuna sahip numunelerde 15J delinme

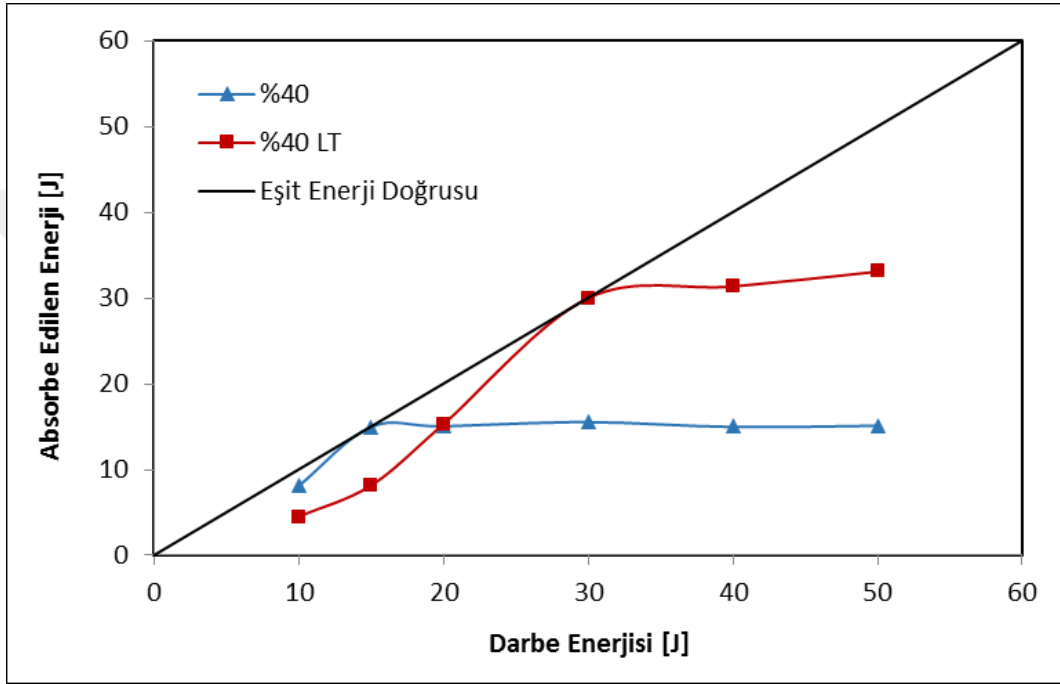
eşliğini ifade etmektedir. Bu darbe enerjisi değerinden sonra enerjinin arttırılmasına bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarında büyük değişimler olmadığı, eğrilerin yataya yakın devam ettiği görülmektedir. Bununla birlikte numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarları incelendiğinde %60 cam elyaf takviyeli numunelerin yaklaşık olarak %7 daha fazla enerji absorbe ettiği tespit edilmiştir.



Şekil 5.26 Sadece granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri

Şekil 5.27’de sadece granülden üretilmiş ve lamineli tamiratlı %40 yoğunluğa sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.27’den görüleceği üzere, lamineli tamiratlı kompozitlerin darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki fark olarak bilinen fazla enerji sadece granülden oluşmuş kompozitlere göre daha yüksektir. Bunun sebebi olarak uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin laminelerle tamiratlardan sonra darbe dayanımı daha yüksek bir yapıya sahip olması olarak gösterilebilir. Bu fazla enerji her deney sonrasında vurucu cihazda kalan enerjidir ve vurucu ucun geri sekmesi için kullanılmaktadır. Lamineli tamiratlı kompozitler için, 20J enerji seviyesine kadar absorbe edilen darbe enerjisi değeri artarken fazla enerji azalmaktadır ve bununla birlikte 30J enerji seviyesinde numunede

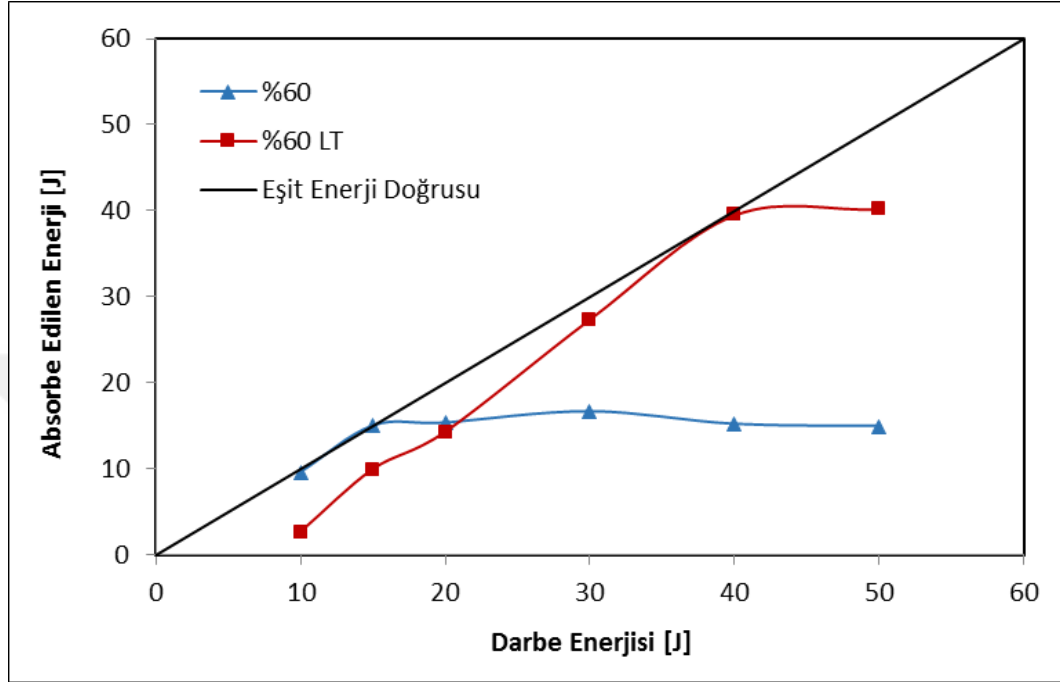
ilk nüfuziyet meydana gelmiştir. 40J ve 50J'lük enerji seviyelerinde ise numunelerde delinme meydana gelmektedir. Her iki numune için de nüfuziyet durumlarından sonra absorbe edilen enerji miktarının darbe enerjisinin artışına bağlı olarak önemli oranda bir değişim göstermediği, yataya yakın bir karakteristik gösterdiği görülmektedir. Bununla birlikte önceki bölümde de açıklandığı üzere tamirat işlemi ile birlikte numunelerin absorbe ettikleri enerji miktarı yaklaşık olarak %212 artış göstermiştir.



Şekil 5.27 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %40 uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri

Şekil 5.28’de sadece granülden üretilmiş ve lamineli tamiratlı %60 yoğunluğa sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı darbe enerjisi seviyelerinde absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri gösterilmiştir. Şekil 5.28 incelendiğinde lamineli tamiratlı kompozitlerin darbe enerjisi ile absorbe edilen enerji arasındaki fark olarak bilinen fazla enerjinin sadece granülden oluşmuş kompozitlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Lamineli tamiratlı kompozitler için, 30J enerji seviyesine kadar darbe enerjisi artarken fazla enerji azalmaktadır ve bununla birlikte 40J enerji seviyesinde numunede ilk nüfuziyet meydana gelmektedir. 50J'lük enerji seviyesinde ise numunede delinme meydana gelmektedir. Her iki numune için de, nüfuziyet durumundan sonra darbe enerjisinin artışına bağlı olarak absorbe edilen

enerji miktarında büyük değişimler olmadığı, eğrilerin yataya yakın devam ettiği görülmektedir. Tamirat işlemi ile birlikte numunelerin absorbe ettikleri enerji seviyesinde yaklaşık %241 oranında artış tespit edilmiştir.



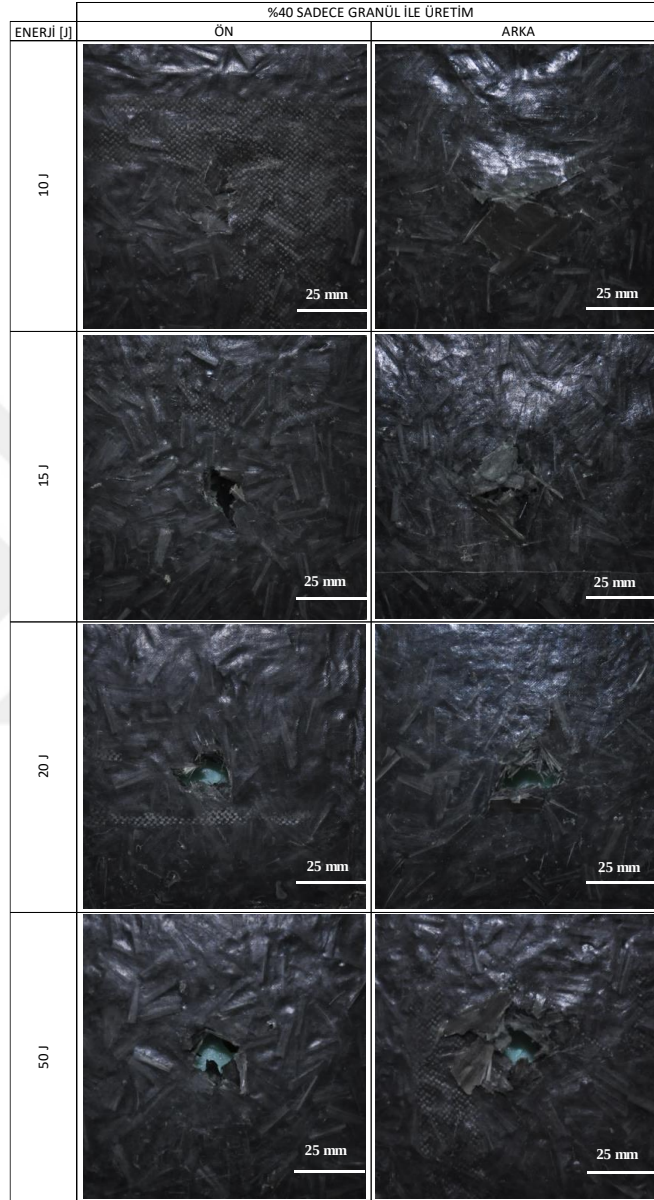
Şekil 5.28 Sadece granülden oluşmuş ve lamineli tamiratlı %60 uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri

Bölüm 5’de sadece granülden üretilmiş ve lamineli tamiratlı %40 ve %60 cam elyaf yoğunluk oranına sahip numuneler için yapılan çalışmalardan elde edilen maksimum temas kuvveti, yer değiştirme, absorbe edilen enerji ve temas süresi verileri Ek bölümünde toplu olarak verilmiştir.

5.5 Kompozitlerde Darbe Testleri Sonrasında Oluşan Hasar Bölgelerinin İncelenmesi

Şekil 5.29’da darbe testleri sonrasında sadece granül ile üretilmiş %40 cam elyaf yoğunluklu kompozitlerde oluşan hasar bölgelerinin gösterimi dört farklı darbe enerjisi için verilmektedir. Şekil 5.29’dan görüldüğü üzere, 10J enerji seviyesinde numunenin ön ve arka yüzeyinde bir delinme olmamış, geri sekme durumu gerçekleşmiştir. Bununla birlikte her iki yüzeyde de fiber hasarları görülmektedir. 15J

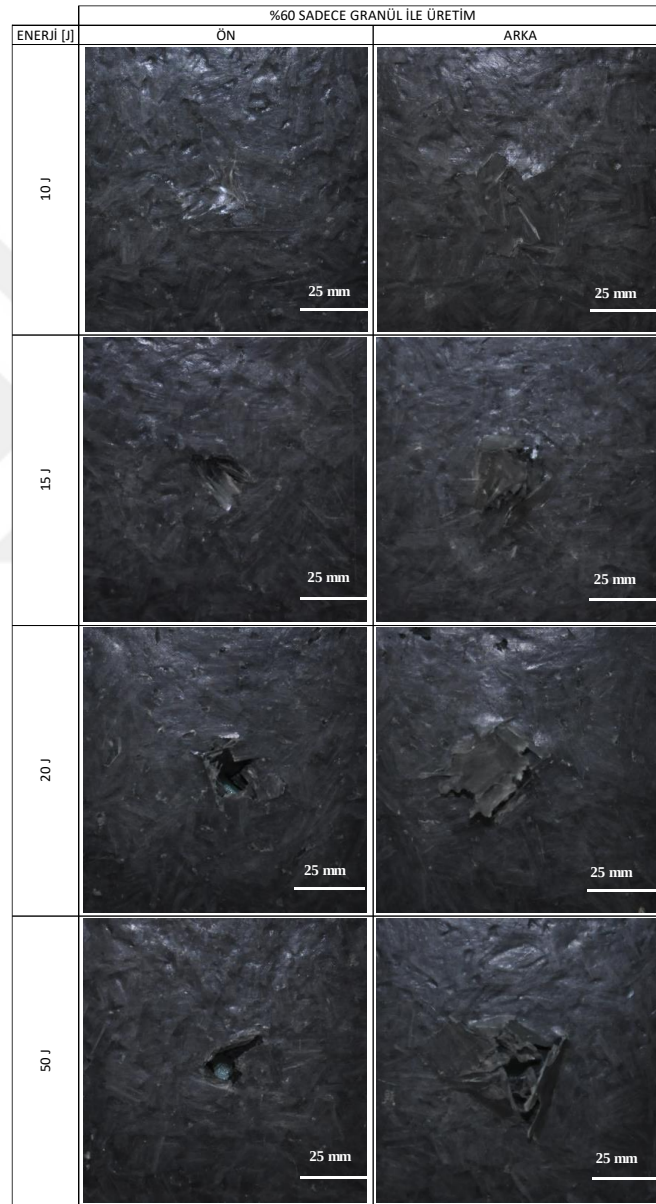
enerji seviyesinde ise vurucu ucun numuneyi deldiği fakat nşfuziyet sınırlarında bir delinme geręekleřtiđi gşrşlmektedir. 20J ve 50J enerji seviyelerinde ise numunelerin řn ve arka yşzeylerinde delinme meydana gelmiştir.



şekil 5.29 Sadece granşlden oluşmuş %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin şeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası gşrşntşsş

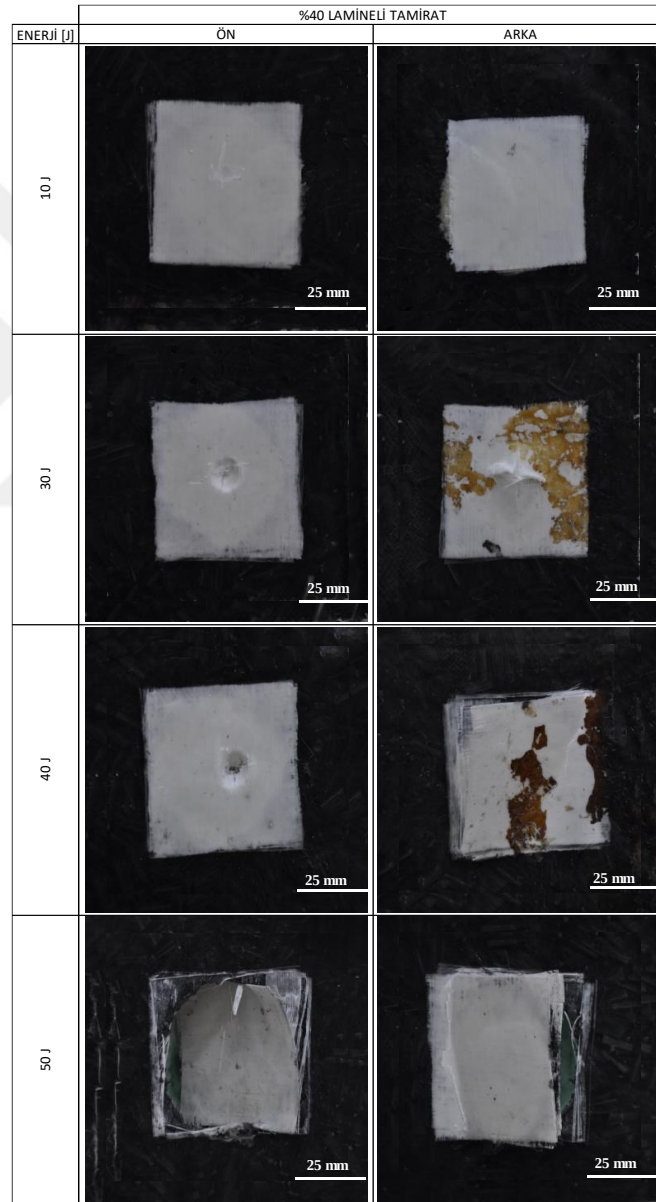
şekil 5.30'da darbe testleri sonrasında sadece granşl ile şretilmiş %60 cam elyaf yoğunluklu kompozitlerde oluşan hasar bşlgelerinin gşsterimi dşrt farklı darbe enerjisi için verilmektedir. %40 cam elyaf yoğunluklu kompozitlerde gřrřldřđř zşzere,

10J enerji seviyesinde numunenin ön ve arka yüzeyinde bir delinme olmamış, geri sekme durumu gerçekleşmiştir. Bununla birlikte her iki yüzeyde de fiber hasarı görülmektedir. 15J enerji seviyesinde ise vurucu ucun numuneyi deldiği fakat nüfuziyet sınırında bir delinme gerçekleştiği görülmektedir. 20J ve 50J enerji seviyelerinde ise numunelerin ön ve arka yüzeylerinde delinme gerçekleşmiş, delip geçme durumu görülmüştür.



Şekil 5.30 Sadece granülden oluşmuş %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin çeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası görüntüsü

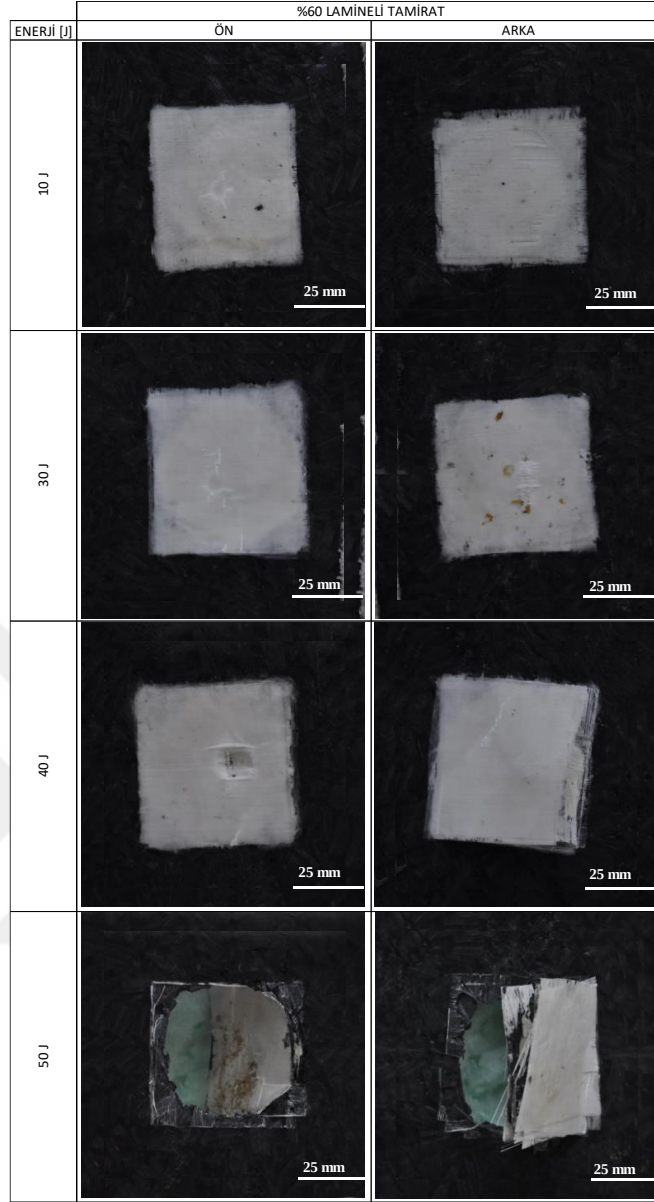
Şekil 5.31’de %40 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı numuneler için darbe hasar bölgeleri dört farklı enerji için gösterilmiştir. 10J enerji seviyesinde numunenin ön ve arka yüzeyinde herhangi bir delinme olmamış, vurucu uç numuneye çarparak geri sekmiştir. Bununla birlikte vurucu ucun temas bölgesinde (ön) fiber hasarı meydana gelmiştir. 30J enerji seviyesinde ise vurucu uç numuneye saplanmıştır, nüfuziyet durumunu gerçekleştirmiştir. 40J ve 50J enerji seviyelerinde ise delinme durumu gerçekleşmiş, vurucu uç tamirat bölgesini delip geçmiştir.



Şekil 5.31 Lamineli tamiratlı %40 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin çeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası görüntüsü

Şekil 5.32’de %60 cam elyaf yoğunluklu lamineli tamiratlı numuneler için darbe hasar bölgeleri dört farklı enerji için gösterilmiştir. Şekil 5.32 incelendiğinde 10J enerji seviyesinde numunenin ön ve arka yüzeyinde herhangi bir delinme olmamış, vurucu uç numuneye çarparak geri sekmiştir. Bununla birlikte vurucu ucun temas bölgesinde (ön) fiber hasarı meydana gelmiştir. 30J enerji seviyesinde ise vurucu ucun 10J enerji seviyesinde olduğu gibi numuneye çarparak geri sektiği görülmektedir. Bununla birlikte numunenin ön ve arka yüzeylerinde fiber hasarları görülmektedir. 40J enerji seviyesinde vurucu uç numuneye saplanmış ve nüfuziyet durumu gerçekleşmiştir. 50J enerji seviyesinde ise numunenin delinme eşiği aşılmış, vurucu uç tamirat bölgesini delip geçmiştir.





Şekil 5.32 Lamineli tamiratlı %60 cam elyaf yoğunluklu polipropilen kompozitlerin çeşitli enerjilerdeki darbe testleri sonrası görüntüsü

BÖLÜM ALTI

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan yoğunlukça farklı cam elyaf takviye miktarına sahip numunelerin (%40 ve %60) düşük hızlı darbe davranışları tek kalınlıkta (4 mm) 10J, 15J, 20J, 30J, 40J ve 50J enerjisi seviyelerinde belirlenmiştir. Darbe sonrası lamineli numunelere tamirat işlemleri uygulanmış ve aynı şartlarda darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneyler sonrasında elde edilen veriler karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak elde edilen yargılar aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- Temas kuvveti-yer değiştirme eğrileri incelendiğinde, sadece granülden üretilmiş kompozit numunelerde cam elyaf yoğunluğu artışına bağlı olarak numunelerin eğilme rijitliklerinde yaklaşık olarak %57 artış görülmüştür.

Bu eğriler, tamirat işlemi açısından değerlendirildiğinde ise, tamirat işlemi ile eğilme rijitliği değerlerinde %40 cam elyaf yoğunluklu numuneler için yaklaşık %288, %60 cam elyaf yoğunluklu numuneler için ise yaklaşık %266 oranında artış görülmüştür.

- Maksimum temas kuvveti-darbe enerjisi eğrileri incelendiğinde, sadece granülden üretilmiş kompozit numunelerde her iki oran için de darbe enerjisinin artışına bağlı olarak maksimum kuvvet değerinin 30J enerji seviyesine kadar bir miktar arttığı daha sonra stabil kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte %60 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerde maksimum kuvvet değerinin, %40 cam elyaf yoğunluklu numunelere oranla yaklaşık %8 oranında daha fazla olduğu görülmektedir.

Bu eğriler tamirat işlemi açısından değerlendirildiğinde, tamirat işlemi sonrası numunelerin maksimum kuvvet değerlerinde, enerji artışına bağlı olarak bir artış gözlemlenmektedir. Maksimum kuvvet değerlerinde ise sadece granül ile yapılmış üretime kıyasla önemli oranda bir artış görülmüştür. Bu oran, %40 cam elyaf takviyeli numunelerde yaklaşık %200, %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerde ise yaklaşık olarak %178'dir.

- Maksimum yer değiştirme-darbe enerjisi eğrileri incelendiğinde, sadece granül ile üretilmiş ve tamiratlı numunelerin her iki cam elyaf yoğunluk oranı için de darbe enerjisinin arttırılmasına bağlı olarak yer değiştirme miktarlarının arttığı görölmüştür.

Bu çalışma cam elyaf yoğunluk oranı artışına göre değerlendirildiğinde %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerin yer değiştirme miktarları arasında büyük farklılıklar görölmemiştir.

Tamirat işlemi ile birlikte darbe dayanımının ve rijitlikliğin büyük oranda arttırılması ile birlikte maksimum yer değiştirme değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.

- Temas süresi–darbe enerjisi eğrileri incelendiğinde, tüm numune çeşitlerinde, nüfuziyet durumu gerçekteşene kadar temas süresinin arttığı, bu sınır değerden sonra ise yataya yakın değerlerde devam ettiği görölmüştür.

Bu eğriler cam elyaf yoğunluk artışına bağlı olarak değerlendirildiğinde, %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerin darbe davranışlarının benzer olması sebebiyle temas süresi değerlerinin aynı darbe enerjisi seviyeleri altında yakın değerler verdiği görölmüştür.

Tamirat işlemi ile birlikte, tamiratlı numunelerde nüfuziyet enerji değerlerine kadar, sadece granül ile üretilmiş numunelere oranla temas süresi değerlerinin daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

- Absorbe edilen enerji-darbe enerjisi eğrileri incelendiğinde, sadece granülden üretilmiş kompozit numunelerde yoğunluk artışına bağlı olarak absorbe edilen enerji miktarının yaklaşık %7 oranında arttığı görölmüştür.

Bu eğriler tamirat işlemi açısından değerlendirildiğinde ise, numunelerin tamirat işleminden sonra absorbe ettiği enerji miktarlarında %40 cam elyaf yoğunluklu numunelerde %112, %60 cam elyaf yoğunluklu numunelerde ise %141 oranında artış görölmüştür.

Bu yargılar ışığında, cam elyaf takviyeli polipropilen termoplastik kompozitlerde yoğunluk artışına bağlı olarak darbe dayanımında bir artış gözlemlenmiştir. Tamirat işlemi ile birlikte ise her iki yoğunluktaki numune için darbe dayanımı ve rijitlik değerlerinde önemli oranda iyileştirmeler gözlemlenmiştir.

Bu alışma, cam elyaf takviyeli termoplastik kompozitlerin kullanıldığı yapılar da her uç hasar modunun da tamirat işlemi ile iyileştirilebileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca sürekli genişleyen endüstriyel alanlar ve artış gösteren talepler için yeniden kullanılabilirliği ve tamirat ile hasar modlarının iyileştirilmesi özellikleri ile termoplastik kompozitlerin iyi bir alternatif malzeme grubu olabileceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

- Abramovich, H. (2017). *Stability and vibrations of thin-walled composite structures*. United Kingdom: Woodhead Publishing.
- Abrate, S. (2011). *Impact engineering of composite structures*. Austria: Springer Verlag
- Akgün, Y. (2010) *Onarılmış kompozit plakaların darbe davranışları*. 17 Ekim 2018, <https://www.ulusaltezmerkezi.net/onarilmis-kompozit-plaklarin-darbe-davranislari/>
- Akovali, G. (2001). *Handbook of composite fabrication*. Shawbury: iSmithers Rapra Publishing.
- Alcock, B., Cabrera, N. O., Barkoula, N. M., Loos, J., ve Peijs, T. (2007). Interfacial properties of highly oriented coextruded polypropylene tapes for the creation of recyclable all-polypropylene composites. *Journal of Applied Polymer Science*, 104(1), 118-129.
- Badrossamay, (2015). *Production techniques*. 8 Ekim 2018, <https://badrossamay.iut.ac.ir/production-techniques>
- Balasubramanian, M. (2013). *Composite materials and processing*. London: CRC Press.
- Belingardi, G., ve Vadori, R. (2002). Low velocity impact tests of laminate glass-fiber-epoxy matrix composite material plates. *International Journal of Impact Engineering*, 27(2), 213-229.
- Biron, M. (2007). *Thermoplastics and thermoplastic composites: technical information for plastics users*. New York: Elsevier.

- Boria, S., Scattina, A., ve Belingardi, G. (2017). Impact behavior of a fully thermoplastic composite. *Composite Structures*, 167, 63-75.
- Boumbimba, R. M., Coulibaly, M., Khabouchi, A., Kinvi-Dossou, A., Bonfoh, N., ve Gerard, P. (2017). Glass fibres reinforced acrylic thermoplastic resin-based tri-block copolymers composites: Low velocity impact response at various temperatures. *Composite Structures*, 160, 939-951.
- Campbell Jr, F. C. (2003). *Manufacturing processes for advanced composites*. Great Britain: Elsevier.
- Chanda, M. (2018). *Plastics technology handbook* (5. Baskı). London: CRC Press.
- Chawla, K. K. (2012). *Composite materials: science and engineering* (3. Baskı). Birmingham: Springer Science & Business Media.
- Chung, D. D., ve Chung, D. (2012). *Carbon fiber composites*. United States of America: Butterworth-Heinemann.
- Coperion, (2018). *Long fiber reinforced thermoplastics*. 23 Ekim 2018, <https://www.coperion.com/en/industries/plastics/lft-long-fiber-reinforced-thermoplastics/>
- Crema, L., Sorgato, M., Zanini, F., Carmignato, S., ve Lucchetta, G. (2018). Experimental analysis of mechanical properties and microstructure of long glass fiber reinforced polypropylene processed by rapid heat cycle injection molding. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 107, 366-373.
- Çakır, M., ve Berberoğlu, B. (2018). E-cam elyaf takviyeli epoksi matrisli kompozit malzemelerin elyaf oranındaki artış ile mekanik özelliklerindeki değişimlerin incelenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 5(3), 734-740.

- Dagdelen, O. (2010) *Hasarlı kompozit plaklarda onarım optimizasyonu*. 16 Ekim 2018, <http://acikerisim.deu.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/20.500.12397/8138/283637.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Daniel, I. M., Ishai, O., Daniel, I. M., ve Daniel, I. (1994). *Engineering mechanics of composite materials*. New York: Oxford University Press.
- Davies, P., Cantwell, W.J., Jar, P., Bourban, P., Zysman, V., ve Kausch, H. (1991). Joining and repair of a carbon fibre reinforced thermoplastic. *Composites*, 425-431.
- Dogan, A., ve Arikan, V. (2017). Low-velocity impact response of E-glass reinforced thermoset and thermoplastic based sandwich composites. *Composites Part B: Engineering*, 127, 63-69.
- Dupont, (2017). *Thermoplastic composites for body-in-white application development*. 12 Ekim 2018, <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/thermoplastics/brands/vizilon-thermoplastic-composite/articles/thermoplastic-composite-materials.html>
- El-Sonbati, A. Z. (2012). *Thermoplastic: composite materials*. Croatia: InTech.
- Evci, C., & Gülgeç, M. (2012). An experimental investigation on the impact response of composite materials. *International Journal of Impact Engineering*, 43, 40-51.
- Ge, (2015). *GE develops jet engines made from ceramic matrix composite*. 6 Ekim 2018, <https://www.ge.com/reports/post/112705004705/ge-develops-jet-engines-made-from-ceramic-matrix/>
- Hu, N. (2012). *Composites and their properties*. Croatia: InTech.
- İtü, (2007). *Malzeme bilimi ve mühendisliği*. 10 Ekim 2018, http://web.itu.edu.tr/ozgulkeles/dersler/MalzemeBilimi_01_2010.pdf

- Jacoby, P. (2013). *Beta nucleation of polypropylene: properties, technology, and applications*. USA: Elsevier.
- Jefferson, A., Arumugam V., & Dhakal H. (2018). *Repair of Polymer Composites*. Woodhead Publishing
- Jones, R. M. (2014). *Mechanics of composite materials* (2. Baskı). Philadelphia: CRC press.
- Kara, M. (2012) *Düşük hızlı darbe sonrası yama ile tamir edilmiş filaman sarım ctp boruların iç basınç altındaki hasar davranışı*. 15 Ekim 2018 <http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/1433>
- Liu, D. (2004) Characterization of impact properties and damage process of glass-epoxy composite laminates. *Journal of Composite Materials*, 38 (16): 1425-1442.
- Maier, C., ve Calafut, T. (1998). *Polypropylene: the definitive user's guide and databook*. Norwich: William Andrew.
- Mazumdar, S. (2001). *Composites manufacturing: materials, product, and process engineering*. Boca Raton: CRC press.
- Mechscience, (2016). *Composite materials-an overview*. 3 Ekim 2018, <http://www.mechscience.com/composite-materials-an-overview/>
- Nuhkompozit, (2015). *Uzun cam elyaf takviyeli termoplastik*. 23 Ekim 2018, <http://www.nuhkompozit.com.tr/>
- Özdemir, O., ve Kandaş, H. (2018). Thickness and temperature effects on the impact behavior of glass fiber reinforced polypropylene composites. *Tekstil ve Mühendis*, 25(110), 103-112.

- Park, H., Kong, C., (2011). A study on low velocity impact damage evaluation and repair technique of small aircraft composite structure. *Composites: Part A* 42, 1179-1188
- Reyes, G.. ve Sharma U. (2010) Modeling and damage repair of woven thermoplastic composites subjected to low velocity impact. *Composite Structures* 92, 523–531
- Safri, S.N.A.. Sultan, M.T.H.. Yidris, N., ve Mustapha, F. (2014) Low velocity and high velocity impact test on composite materials – A review. *The International Journal Of Engineering And Science* 3, 50-60.
- Stokke, D. D., Wu, Q., ve Han, G. (2013). *Introduction to wood and natural fiber composites*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Strong, A. B. (2008). *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications* (2. Baskı). Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- Sun, M., Sun X., Wang Z., Chang M., ve Li H. (2018). The influence of shape memory alloy volume fraction on the impact behavior of polymer composites. *Polymers*, 2018, 10, 1280.
- Suresh, S., ve Kumar, V. S. (2014). Experimental determination of the mechanical behavior of glass fiber reinforced polypropylene composites. *Procedia Engineering*, 97, 632-641.
- Tolinski, M. (2015). *Additives for polyolefins: getting the most out of polypropylene, polyethylene and TPO*. William Andrew.
- Trekearth, (2005). *Prussian wall*. 3 Ekim 2018, <https://www.trekearth.com/gallery/Europe/Poland/West/Wielkopolskie/Olszyna/photo150344.htm>

- Tripathi, D. (2002). *Practical guide to polypropylene*. UK: iSmithers Rapra Publishing.
- Vasiliev, V. V., ve Morozov, E. V. (2013). *Advanced mechanics of composite materials and structural elements* (2. Baskı). Great Britain: Elsevier.
- Vetrotextiles, (2017). *Fiberglass manufacturing*. 7 Ekim 2018, <https://www.vetrotextiles.com/technologies/fiberglass-manufacturing>
- Vodicka, R. (1996), *Thermoplastic for airframe applications - A review of the properties and repair methods for thermoplastic composites*. Australia: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory.
- Vinson, J. R., ve Sierakowski, R. L. (2006). *The behavior of structures composed of composite materials* (2. Baskı). Netherlands: Springer Science and Business Media.
- Wang, R. M., Zheng, S. R., ve Zheng, Y. G. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Philadelphia: Woodhead Publishing.
- Whelan, T., ve Goff, J. (1990). *Injection molding of thermoplastics materials*. Boston: Springer.

EKLER

Tablo A1-4’de sırasıyla granülden oluşmuş %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu ve lamineli tamiratl %40 ve %60 cam elyaf yoğunluklu kompozit numunelerin darbe testlerinden elde edilmiş kritik parametrelerin gösterimi karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Tablo A.1 Sadece granülden oluşmuş %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin darbe testlerinden elde edilen kritik parametreler

%40 Granül ile Üretim	Darbe Enerjisi [J]					
	10J	15J	20J	30J	40J	50J
Maksimum Temas Kuvveti [N]	1355,16	1410,30	1457,60	1519,36	1527,87	1505,15
Temas süresi [ms]	23,21	32,20	32,11	32,06	31,10	30,50
Maksimum Yer değiştirme [mm]	10,02	35,83	71,94	91,51	111,48	131,22
Absorbe Edilen Enerji [J]	8,08	15,00	15,10	15,60	15,01	15,16

Tablo A.2 Sadece granülden oluşmuş %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin darbe testlerinden elde edilen kritik parametreler

%60 Granül ile Üretim	Darbe Enerjisi [J]					
	10J	15J	20J	30J	40J	50J
Maksimum Temas Kuvveti [N]	1493,07	1580,29	1600,85	1638,42	1645,21	1640,52
Temas süresi [ms]	25,20	32,20	32,00	31,70	31,51	31,35
Maksimum Yer değiştirme [mm]	9,78	42,16	67,17	95,00	119,73	128,89
Absorbe Edilen Enerji [J]	9,61	15,01	15,36	16,66	15,20	14,96

Tablo A.3 Lamineli tamiratl %40 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin darbe testlerinden elde edilen kritik parametreler

%40 Lamineli Tamirat	Darbe Enerjisi [J]					
	10J	15J	20J	30J	40J	50J
Maksimum Temas Kuvveti [N]	3622,66	3894,79	3886,29	4359,67	4424,88	4675,27
Temas süresi [ms]	10,80	15,20	20,56	32,20	32,01	31,22
Maksimum Yer değiştirme [mm]	5,98	7,08	9,52	16,81	79,20	96,57
Absorbe Edilen Enerji [J]	4,47	8,11	11,45	30,01	31,37	33,10

Tablo A.4 Lamineli tamiratlı %60 cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin darbe testlerinden elde edilen kritik parametreler

%60 Lamineli Tamirat	Darbe Enerjisi [J]					
	10J	15J	20J	30J	40J	50J
Maksimum Temas Kuvveti [N]	4090,37	4250,26	4310,25	4186,75	4220,25	4586,44
Temas süresi [ms]	8,89	12,25	16,60	25,57	32,20	31,81
Maksimum Yer değıştirme [mm]	4,16	6,68	7,52	12,74	23,11	83,33
Absorbe Edilen Enerji [J]	2,62	9,94	14,29	27,37	39,54	40,20