

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ÖN GERİLME YÜKLERİNDE CAM
ELYAF TAKVİYELİ POLİPROPİLEN
KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞI

Halis KANDAŞ

Temmuz, 2018
İZMİR

**FARKLI ÖN GERİLME YÜKLERİNDE CAM
ELYAF TAKVİYELİ POLİPROPİLEN
KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE
DAVRANIŞI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekanik Programı**

Halis KANDAŞ

Temmuz, 2018

İZMİR

YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

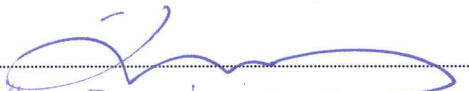
HALİS KANDAŞ, tarafından DR. ÖĞR. ÜYESİ OKAN ÖZDEMİR yönetiminde hazırlanan “FARKLI ÖN GERİLME YÜKLERİNDE CAM ELYAF TAKVIYELİ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Dr. Öğr. Üyesi Okan ÖZDEMİR

Yönetici


Doç. Dr. Yusuf ARMAN

Jüri Üyesi


Dr. Öğr. Üyesi İbrahim Fadıl SOYKÖK

Jüri Üyesi


Prof. Dr. Latif SALUM

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, iki yıl boyunca değerli bilgilerini bizlerle paylaşan, çalışmalarım sırasında bana yol gösteren saygıdeğer danışman hocam, Dr. Öğr. Üyesi Okan Özdemir’e sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Akar DOĞAN’a ve Erdem ZORER’e teşekkür ederim.

Son olarak çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim bana güvenen aileme çok teşekkür ederim.

Halis KANDAŞ

FARKLI ÖN GERİLME YÜKLERİNDE CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİPROPİLEN KOMPOZİTLERİN DÜŞÜK HIZLI DARBE DAVRANIŞI

ÖZ

Kompozit malzemelerin uygulamalarındaki en önemli sorunlardan bir tanesi geri dönüşüm konusudur. Termoset matrisli kompozitler üretim sürecine tekrar sokulamadığı için bu kompozitlerin kullanımı çevre kirliliği oluşturmaktadır. Bu sebeple termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Bu kapsamda, tez çalışmasında cam elyaf takviyeli polipropilen termoplastik kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak araştırılmıştır.

Farklı kalınlık ve dizilimlerde üretilmiş cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin ön yüklemesiz ve farklı ön yükleme durumlarındaki davranışları incelenmiştir. Çalışmada ön yükleme durumları olarak çeki, bası ve kayma (çeki ve bası) durumları tasarlanan aparat yardımıyla belirlenmiştir. Ön yüklemede çeki ve kayma yüklemesi durumlarında 250 mikron ve 500 mikron büyüklüğünde yüklemeler uygulanırken bası durumunda ise 250 mikron büyüklüğünde ön yükleme değeri uygulanmıştır. 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin ön yüklemesiz ve ön yükleme altındaki düşük hızlı darbe davranışları ve ayrıca tekrarlı darbe davranışları çeşitli eğriler yardımıyla değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Cam elyaf takviyeli polipropilen, düşük hızlı darbe davranışı, ön yükleme etkisi, sıcaklık etkisi, kalınlık etkisi

LOW VELOCITY IMPACT BEHAVIOR OF GLASS FIBER REINFORCED POLYPROPYLENE COMPOSITES WITH DIFFERENT PRELOADS

ABSTRACT

One of the most important problems in the application of composite materials is recycling subject. Since the thermoset matrix composites does not let into the production process again, usage of these composites causes the environmental pollution. For this reason, the usage of thermoplastic matrix composites is becoming widespread, increasingly. In this context, the low velocity impact behaviors of glass fiber reinforced polypropylene thermoplastic composites are investigated experimentally in the thesis study.

The behaviors of glass fiber reinforced polypropylene composites produced in different thicknesses and configuration without preloads and different preloads conditions are investigated. Tensile, compressive and shear (tensile and compressive) are determined by means of the designed apparatus as the preload conditions in operation. 250 microns were applied as the compressive preloads while 250 microns and 500 microns were applied as the tensile and shear preloads, respectively. Low velocity impact behaviors and also repeated impact behaviors of the specimens with thicknesses of 2 and 3 mm were evaluated through various curves.

Keywords: Glass fiber reinforced polypropylene, low velocity impact behavior, preload effect, temperature effect, thickness effect

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZ	iv
ABSTRACT	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	x
BÖLÜM BİR – GİRİŞ	1
BÖLÜM İKİ – KOMPOZİT MALZEMELER	7
2.1 Kompozit Malzeme Bileşenleri	7
2.1.1 Matris Malzemeleri	8
2.1.1.1 Metal Matris	9
2.1.1.2 Seramik Matris	10
2.1.1.3 Polimer Matris	11
2.1.1.3.1 Termosetler	12
2.1.1.3.2 Termoplastikler	12
2.1.2 Takviye Malzemeleri	14
2.1.2.1 Tanecikler	14
2.1.2.2 Elyaf lar/Fiberler	14
2.1.2.2.1 Sürekli Elyaf lar	15
2.1.2.2.2 Süreksiz Elyaf lar	16
2.2 Kompozit Malzemelerin Üretim Yöntemleri	17
2.2.1 Termal Şekillendirme	17
2.2.2 Bant Sarma	18
2.2.3 Presli Kalıplama	19
2.2.4 Basınçlı Kalıplama	20
2.2.5 Enjeksiyon Kalıplama	21

BÖLÜM ÜÇ – KULLANILAN MALZEMELER22

3.1 Polipropilen	22
3.1.1 Tek Eksenli Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Prepreg	27
3.2 Cam Elyaf	28
3.2.1 Uzun Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Granül	29

BÖLÜM DÖRT – YÖNTEM33

4.1 Kullanılan Cihazlar	33
4.1.1 Sıcak Pres	33
4.1.2 Ön Yükleme Aparatı	34
4.1.3 Darbe Cihazı	35
4.2 Kompozit Üretimi	36
4.3 Deney Numunesi Hazırlama	39
4.4 Darbe Deneyi	40

BÖLÜM BEŞ – DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME43

5.1 Birinci Aşama	43
5.1.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme Grafikleri	44
5.1.1.1 Oda Sıcaklığında Gerçekleştirilen Deneyler	44
5.1.1.1.1 Kalınlığı 4 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları	44
5.1.1.1.2 Kalınlığı 6 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları	45
5.1.1.2 50°C’de Gerçekleştirilen Deneyler	46
5.1.1.2.1 Kalınlığı 4 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları	46
5.1.1.2.2 Kalınlığı 6 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları	47
5.1.2 Enerji – Zaman Grafikleri	47
5.1.2.1 30J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler	48
5.1.2.2 50J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler	48
5.1.2.3 70J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler	49
5.1.2.4 90J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler	50

5.1.3 Hasarlı Numune İnceleme	51
5.2 İkinci Aşama	52
5.2.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme	52
5.2.2 Enerji – Zaman	54
5.3 Üçüncü Aşama	55
5.3.1 Çeki Durumu	56
5.3.1.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme	57
5.3.1.2 Enerji – Zaman	58
5.3.2 Bası Durumu	59
5.3.2.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme	59
5.3.2.2 Enerji – Zaman	60
5.3.3 Kayma Durumu	62
5.3.3.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme	62
5.3.3.2 Enerji – Zaman	63
5.3.4 Tekrarlı Darbe Grafikleri	65
BÖLÜM ALTI –YARGILAR VE SONUÇLAR	68
KAYNAKLAR	71

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin bileşenlerinin genel gösterimi	7
Şekil 2.2 Takviye malzemesi, matris malzemesi ve kompozit malzemenin a) Elastik bölgede birim şekil değişim-gerilme ve b) Elastik ve plastik bölgede birim şekil değişimi-gerilme grafikleri	8
Şekil 2.3 Kompozit malzeme bileşenleri grupları	8
Şekil 2.4 Metal matrisli kompozit örneği	10
Şekil 2.5 Örnek molekül dizilimi	11
Şekil 2.6 Termosetlerin moleküler bağlarının şematik görünümü	12
Şekil 2.7 Termoplastiklerin moleküler bağlarının şematik görünümü	13
Şekil 2.8 Sürekli elyaf türlerinin şematik görünümü	16
Şekil 2.9 Süreksiz elyaf türlerinin şematik görünümü	17
Şekil 2.10 Termal şekillendirme yöntemi	18
Şekil 2.11 Bant sarma metodu	19
Şekil 2.12 Presli kalıplama süreci	20
Şekil 2.13 Enjeksiyon kalıplama süreci	21
Şekil 3.1 İzotatik ve ataktik polipropilenin kimyasal yapısı	23
Şekil 3.2 a) Polipropilen malzemelerin akma gerilmeleri (MPa), b) Polipropilen malzemelerin elastisite modülü (GPa) ve c) Polipropilen malzemelerin darbe dayanımları (J/m)	25
Şekil 3.3 Tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen prepreg	27
Şekil 3.4 a) Kaplama metodu ile üretilmiş ve b) pultrüzyon metodu ile üretilmiş, uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller	30
Şekil 3.5 Pultrüzyon metodu ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen üretimi	31
Şekil 3.6 Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerde fiber boyunun kompozitin mekanik özelliklerine etkisi	32
Şekil 4.1 a) Çalışmada kullanılan sıcak pres ve b) Sıcak presin PLC manuel kontrol ekranı	34
Şekil 4.2 Çalışma kapsamında üretilen ve kullanılan ön yükleme aparatı	34
Şekil 4.3 Ön yükleme deney düzeneği	35
Şekil 4.4 a) Çalışmada kullanılan darbe cihazı ve b) ön yükleme aparatı	36

Şekil 4.5 Ön çalışmada kullanılacak ilk kompozit plaka üretiminin işlem sırası	37
Şekil 4.6 Ön çalışmada kullanılacak ikinci kompozit plaka üretiminin işlem sırası..	38
Şekil 4.7 Sıcak presleme işlemi sırasında sıcaklığın zaman ile değişimi	38
Şekil 4.8 Ön yüklemesiz numunelerin hazırlanması	40
Şekil 5.1 Oda sıcaklığında 4 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri	44
Şekil 5.2 Oda sıcaklığında 6 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri	45
Şekil 5.3 50°C sıcaklıkta 4 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri	46
Şekil 5.4 50°C sıcaklıkta 6 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri	47
Şekil 5.5 30J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri	48
Şekil 5.6 50J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri	49
Şekil 5.7 70J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri	50
Şekil 5.8. 90J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri	50
Şekil 5.9 4 mm kalınlığa sahip sandviç kompozitlerin 30J ve 90J’de darbe sonrası hasar şekilleri	51
Şekil 5.10 a) 2 mm kalınlığındaki ve b) 3 mm kalınlığındaki kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri	53
Şekil 5.11 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin b) maksimum yer değiştirmelerinin; darbe enerjisi ile değişim grafikleri	53
Şekil 5.12 a) 2 mm kalınlığındaki ve b) 3 mm kalınlığındaki kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri	54

Şekil 5.13 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri	55
Şekil 5.14 a) +250 μ ve b) +500 μ ön yüklemesi altındaki sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri ...	57
Şekil 5.15 0 μ , +250 μ ve +500 μ ön yüklerine maruz numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin ve b) maksimum yer değiştirmelerinin darbe enerjisi ile değişim grafikleri	57
Şekil 5.16 a) +250 μ ön yüklerine ve b) +500 μ ön yüklerine maruz kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri	58
Şekil 5.17 0 μ , +250 μ ve +500 μ ön yüklerine maruz numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri	58
Şekil 5.18 -250 μ ön yükleme altındaki sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri	59
Şekil 5.19 0 μ ve -250 μ ön yüklerine maruz numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin b) maksimum yer değiştirmelerinin darbe enerjisi ile değişim grafikleri	60
Şekil 5.20 -250 μ ön yüklerine maruz kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri	61
Şekil 5.21 0 μ ve -250 μ ön yüklerine maruz numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri	61
Şekil 5.22 a) $\pm 250 \mu$, b) $\pm 500 \mu$ kayma ön yüklemesi altındaki sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri ...	62
Şekil 5.23 0 μ , $\pm 250 \mu$ ve $\pm 500 \mu$ kayma ön yüklerine maruz numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin b) maksimum yer değiştirmelerinin; darbe enerjisi ile değişim grafikleri	63
Şekil 5.24 a) $\pm 250 \mu$ ön yüklerine ve b) $\pm 500 \mu$ ön yüklerine maruz kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri	64
Şekil 5.25 0 μ , $\pm 250 \mu$ ve $\pm 500 \mu$ kayma ön yüklerine maruz numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri	64
Şekil 5.26 2 mm ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin tekrar sayısı - darbe enerjisi grafikleri	65
Şekil 5.27 0 μ , +250 μ ve +500 μ ön yüklerine maruz numunelerin tekrar sayısı -	

darbe enerjisi grafikleri	66
Şekil 5.28 0 μ ve -250 μ ön yüklerine maruz numunelerin tekrar sayısı - darbe enerjisi grafikleri	66
Şekil 5.29 0 μ , ± 250 μ ve ± 500 μ ön yüklerine maruz numunelerin tekrar sayısı - darbe enerjisi grafikleri	67



TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 3.1 Farklı polipropilen uygulamalarının güvenli sıcaklık sınırları	26
Tablo 3.2 Poliropilenin farklı uygulamalardaki kullanım yüzdeleri	26
Tablo 3.3 Tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen prepreg laminanın mekanik özellikleri	28
Tablo 3.4 Cam elyaf türlerinde kullanılan bileşenlerin kullanım yüzdesi	28
Tablo 3.5 %60 elyaf oranına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin mekanik özellikleri	32

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Kompozitler, birden fazla malzemenin makroskobik seviyede bir araya gelerek oluşturdukları yeni malzemelerin genel adıdır. Meydana gelen yeni malzemeler (kompozitler) kendilerini oluşturan malzemelere göre daha üstün özelliklere sahiptirler. Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde üç bölge etkilidir. Bu bölümler takviye, matris ve ara yüzey bölgesi şeklindedir. Kompozit yapılarda takviye bölgesi yapı üzerine gelen yükleri taşımada, matris bölgesi kompozit yapıyı bir arada tutma ve yükleri homojen dağıtmada ve ara yüzey bölgesi ise matris ve takviye bölgelerini yapıştırma ile görevlidir.

Kompozit yapıların mekanik özellikleri belirleyen etkenler matris malzemesinin türü, takviye malzemesinin türü ve takviye malzemesinin formu olarak sıralanabilir. Bunun yanında yapıda kullanılan matris ve takviye malzemelerinin üretim ve uygulama için birbirleri ile uyumlu olmaları gerekmektedir.

Kompozit yapılar içinde kullanılan pek çok matris malzemesi türü bulunmaktadır. Ancak büyük kullanıma sahip olan malzemeler termosetler ve termoplastiklerdir. Kompozitlerin en yaygın kullanıldığı alanlardan biri olan otomotiv sektörünün termoplastik matrisli kompozitlere karşı olan ilgisi geri dönüştürülebilmeleri ve termoset matrisli kompozitlerle karşılaştırıldıklarında daha kısa işlem süreleri olması sebepleri ile artmaktadır.

Tüm olumlu özelliklerine karşın termoplastik matrisli kompozit malzemelerin kullanımı ile ilgili en büyük öneme sahip durum mekanik özelliklerinin sıcaklık ile değişim göstermesidir. Bu amaçla termoplastik matrisli kompozitlerin kullanım yerlerine göre belirlenen sıcaklıklarda, bu yapılara darbe testleri yapılmıştır. Güncel çalışmalardan birkaçı aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

Garcia-Gonzalez ve diğer. (2015), yaptıkları araştırmada kısa karbon fiber takviyeli PEEK kompozitlerin düşük sıcaklıklardaki (-25°C, -50°C ve -75°C) darbe

tepkilerini incelemişlerdir. Sonrasında bu tepkileri oda sıcaklığındaki darbe tepkileri ile karşılaştırmışlardır. Araştırmalarında matris malzemesi olarak polietilen takviye malzemesi olarak karbon, bazalt, aramid ve vectran Sorrentino ve diğer. (2017) tarafından kullanmıştır. Bu çalışmada takviye malzemesi değiştirilerek üretilen 4 farklı kompozit grubunun mekanik özellikleri 3 farklı (20°C, 60°C ve 100°C) sıcaklıkta incelenmiştir. Sıcaklığın 60°C ve 100°C'ye artışı ile eğilme modülünde düşüş gözlenmiştir.

Russo ve diğer. (2017), çalışmalarında cam elyaf örgü ve poliüretan kullanılarak üretilmiş kompozit yapıların düşük hızlı darbe tepkilerini oda sıcaklığında, -25°C'de ve -50°C'de incelemiştir. Çalışmaları sırasında cam elyaf takviyeli akrilik kompozitlerin düşük hızlı darbe tepkileri 20°C'de ve iki uç sıcaklıkta (-80°C ve 80°C) Boumbimba ve diğer. (2017) tarafından incelenmiştir. Araştırmanın ön çalışması sırasında sıcaklık etkisi incelenmiş ancak etkisinin düşük olması sebebi ile sonrasında araştırılmamıştır.

Termoplastik matrisli kompozitler düşünüldüğü zaman akla en çok gelen durum geri dönüştürülebilirliktir. Bu nedenle termoplastik matrisli kompozitlerde takviye malzemesi olarak doğal fiber (keten, jüt vb.) malzemeler son yıllarda incelenmesine karşın bu kompozitler yapısal olarak hala ciddi engellere sahiptirler. Bu konuda Dhakal ve diğer. (2012), örnek teşkil edebilecek bir araştırma yapmıştır. Bu çalışmada kenevir takviyeli polyester kompozitlerin düşük hızlı darbe tepkileri farklı uç modelleri için incelemiştir.

Bu nedenle termoplastik matrisli kompozitlerde tercih edilen takviye malzemelerinden bazıları karbon ve cam elyafıdır (sentetik takviye malzemeleri). Karbon elyaf gelişmiş kompozit malzemelerde yaygın bir kullanım imkânı bulmasına karşın, üretim maliyetlerinin yüksek olması sebebi ile günümüzde daha yaygın kullanıma sahip takviye malzemesi cam elyafıdır.

Kompozit yapılar kullanımları, montajları, tamirleri vb. sırasında darbe yüklerine maruz kalabilirler. Bu durum pek çok araştırmacıyı kompozit yapıların darbe

yüklerine karşı verdikleri tepkileri incelemeye itmiştir. Doğan ve Arıkan (2017) yaptıkları araştırmada, pek çok uygulamada sıklıkla kullanılan cam elyaf takviyeli polimer kompozitlerin darbe tepkilerini iki polimer türü (termoplastik ve termoset) için araştırmıştır. Araştırma sonucunda termoplastik numunelerin eğilme rijitliklerinin termosetlerden daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Bunun yanı sıra termoplastik numunelerin yük taşıma ve deformasyon kabiliyetlerinin termosetlere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu konuda yapılan bir diğer araştırma Vieille ve diğer. (2013), tarafından yapılmış olan ve karbon fiber takviyeli termoset ve termoplastik kompozitlerin darbe davranışları üzerine olan araştırmadır.

Polimer matrisli kompozitlerin darbe tepkileri üzerine başka pek çok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda termoplastik matrisli kompozitlerin tekrarlı darbe tepkilerinin uygulama açısından termoset matrisli kompozitlerden daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle başta otomotiv sektörü termoplastik matrisli kompozitlere büyük ilgi duymaktadır (Doğan, 2017).

Araştırmacılar değişik amaçlar doğrultusunda farklı yapılarda ve özelliklerde çok sayıda plastik malzeme geliştirmişlerdir. Ancak üretilen bu plastiklerin çoğu pahalı ve/veya işlemleri zor olan plastiklerdir. Günümüzde kullanılan plastiklerin büyük çoğunluğunu polivinilklorür, polietilen ve polipropilen oluşturmaktadır (Biron, 2013).

Sandviç kompozitlerde bulunan lamina yapılar eğilme ile gelen yükleri ve içyapı yüklerini taşımaktadır. Çekirdek malzemesi ise sandviç yapıya enine etkiyen yükleri taşımaktadır. Çekirdek malzemesinin bu yükleri taşıma kabiliyetini arttırmak amacı ile yapılan çalışmalara örnek olarak Bekisli, ve Grenestedt (2004) tarafından çekirdek malzemesi olarak balsa kullanan çalışma gösterilebilir.

Sandviç kompozitlerde yapının mekanik özellikleri çekirdek malzemesinin kalınlığı ve türü ile değişim göstermektedir. Al-Shamary ve diğer. (2016), çalışmasında PVC sandviç kompozitlerin çekirdek kalınlığının değişimi ile düşük hızlı darbe tepkilerinde gözlemlenen değişim incelenmiştir. Özdemir ve diğer.

(2015), yaptıkları çalışmada ise farklı çekirdek malzemeleri (PVC ve PET) için kalınlığın darbe davranışı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmalarda çekirdek malzemesinin daha zayıf olması sebebi ile çekirdek kalınlığındaki artışın yapının rijitliğini olumsuz yönde etkilediği sonucuna varılmıştır.

Kompozit yapılar kullanıldıkları yerlere göre montaj toleransı vb. sebeplerle ön yüklemeye maruz kalmaktadırlar. Kompozit malzemeler kullanımda farklı formlarda üretilebileceği için ön gerilme çalışmalarında incelenen kompozit numunelerin bazıları kavisli formdaki numunelerdir.

Saghafi, Minak ve Zucchelli (2014), çalışmada cam elyaf ve polimer ile üretilmiş olan kavisli kompozitleri farklı ön yükleme kuvvetlerine maruz bırakarak darbe deneylerini gerçekleştirmiştir. Saghafi, Brugo ve diğer. (2014), cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin konveks ve konkav formlarının ön yükleme durumunda gösterdikleri darbe davranışlarını incelenmişlerdir.

Bunun yanında araştırmacıların genel olarak ilgilendiği malzemeler plaka formundadırlar. Ancak araştırmalar içinde düz plakaların ön yükleme sonucu burkulmaları durumunda darbe davranışlarındaki değişimlerin araştırıldığı çalışmalar mevcuttur. Bu tür çalışmalara örnek olarak Herszberg ve Weller (2006), araştırması örnek verilebilir. Araştırma sırasında tek eksenli bası yükleri burkulma durumunu sağlayacak şekilde verilmiştir. Bu alandaki tek eksenli bası yükü üzerine olan diğer bazı araştırmalar yapı burkulmadan ön yüklemeyi vermiştir.

Heimbs ve diğer. (2009), bası yönünde tek eksenli ön yükleme verilmiş numunelerin ve ön yükleme yapılmamış numunelerin darbe davranışlarını karşılaştırmışlardır. Guillaud ve diğer. (2015), ön yüklemesiz numuneler ile tek eksenli çeki ön yüklemesine sahip numuneleri karşılaştırmıştır. Sonuç olarak ön yükleme ile maksimum deformasyonda önemli derecede düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun yanı sıra bası yükü ile absorbe edilen enerji seviyesinin ve maksimum deformasyonun artış gösterdiğini belirlemişlerdir.

Bu araştırmaların yanı sıra tek eksenli ön yüklemede hem bası hem de çeki yüklemesi durumlarının incelendiği çok sayıda çalışma vardır. Heimbs ve diğer. (2014), kompozit plakaların bası ve çeki  n yüklemesi durumlarında darbe davranışlarını incelemiş ve bu sonuçları  n yüklenmeyen numuneler ile karşılaştırmıştır. Schueler ve diğer. (2016), çalışmasında kompozit plakaların tek eksenli çeki ve bası sonucu oluşan burkulma ve yüksüz durumda kompozit numunelerde darbe tepkilerini incelemiştir.

Diğer araştırma grupları iki eksenli darbe üzerine yoğunlaşmıştır. Mitrevski ve diğer. (2006), örgü cam elyaf takviyeli polimer kompozit plakaların iki eksenli çeki  n yüklemesi durumunu araştırmıştır. Sonuç olarak saplanma enerjilerinde saplanmanın derinliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Kurşun ve diğer. (2015), iki eksenli  n yüklenmiş kompozit numunelerin darbe davranışlarını deneysel ve sonlu elemanlar analizi ile incelemiştir. Çalışmanın sonucunda  n yüklemenin artışı ile absorbe edilen enerjinin artığını gözlemlemişlerdir. Bu durum hem deneysel hem de sonlu elemanlar analizinde g r lm ştir.

Garc a-Castillo ve diğer. (2015), deneysel, analitik ve numerik olarak kompozitlerin  n yüklemeli darbe davranışını araştırmıştır. İncelemelerde  n gerilme ile kompozit plakaların balistik limitlerinin yaklaşık olarak %11 yükseldiği g r lm ştir. İki eksenli ve tek eksenli  n yüklemeye maruz ve yüksüz durumdaki kompozit plakaların darbe davranışları Khalili, Mittal ve Panah (2007) tarafından karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak tek eksenli  n yüklemenin etkisinin, iki eksenli  n y klemenininkine benzediğini, fakat darbe kuvveti, temas süresi ve plakanın merkezi sapması üzerindeki elyaf yönüne dik etkisinin, lifler boyunca  n yüklemelerden daha fazla olduğunu saptamışlardır.

Tek eksenli çeki ve iki eksenli çeki durumu haricinde kesme yüklemesi olarak adlandırılan birinci eksenin çeki, ikinci eksenin bası durumunu Whittingham ve diğer. (2004) tarafından araştırılmıştır. Moallemzadeha, Sabeta ve Abedini (2018), araştırmalarında kompozit plakaların tek eksenli çeki, bası, iki eksenli çeki ve kesme

(iki eksenli çeki-bası) yükleri altında darbe davranışları ile ilgilenmiştir. Sonuç olarak en kritik yüklemenin bası sonrasında çeki yüklemesi olduğunu bulmuşlardır.

Kompozitlerin darbe davranışları konusunda ön yükleme durumu dışında tekrarlı darbe davranışları da uygulamada ve literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Arıkan ve Sayman (2015), termoset ve termoplastik matrisli cam elyaf takviyeli kompozitlerin tekrarlı darbe dayanımlarını karşılaştırmışlardır.

Özdemir ve diğer. (2018), yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli polipropilen laminaları yüzey örtüsü olarak kullanan sandviç kompozitlerin, çekirdek malzemelerinin kalınlığının kompozit yapının tekrarlı ve tekil darbe davranışlarına olan etkisini incelemiştir. Sonuç olarak farklı çekirdek kalınlıkları için tekrarlı darbe davranışlarına genelleştirilmiş formüller yazılmıştır.

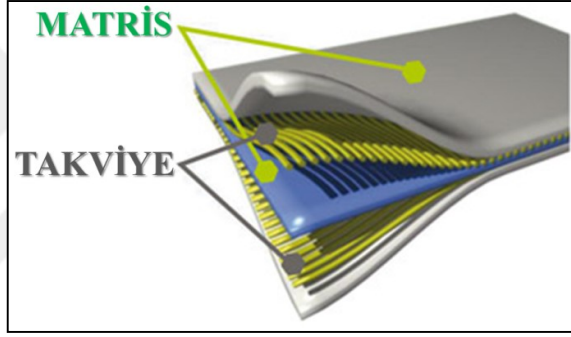
Ön yüklemeye maruz numunelerin darbe davranışları üzerine pek çok araştırma yapılmış olmasına karşın bu numunelerin çoğunluğu termoset kompozitlerdir. Çalışma kapsamında cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin ön gerilme durumlarında birincil ve tekrarlı darbe davranışları araştırılmıştır. Çalışma kapsamında incelenen ön gerilme durumları tek eksenli bası, tek eksenli çeki ve birincil eksen çeki ikinci eksen bası (kayma) şeklindedir.

BÖLÜM İKİ

KOMPOZİT MALZEMELER

2.1 Kompozit Malzeme Bileşenleri

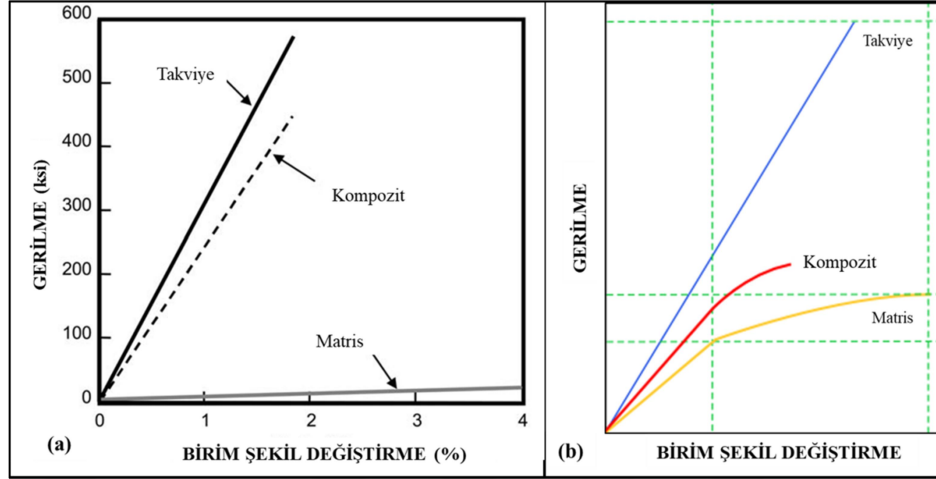
Kompozit malzemelerin bileşenleri genel olarak kompozit içinde kalıp görevi gören matris ve matris içinde çeşitli formlarda bulunabilen takviye malzemeleri olarak iki ana başlık altında incelenir (Campbell, 2010). Bu yapıların kompozit malzeme içindeki görünüşleri Şekil 2.1’de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Kompozit malzemelerin bileşenlerinin genel gösterimi (Idreva, 2016)

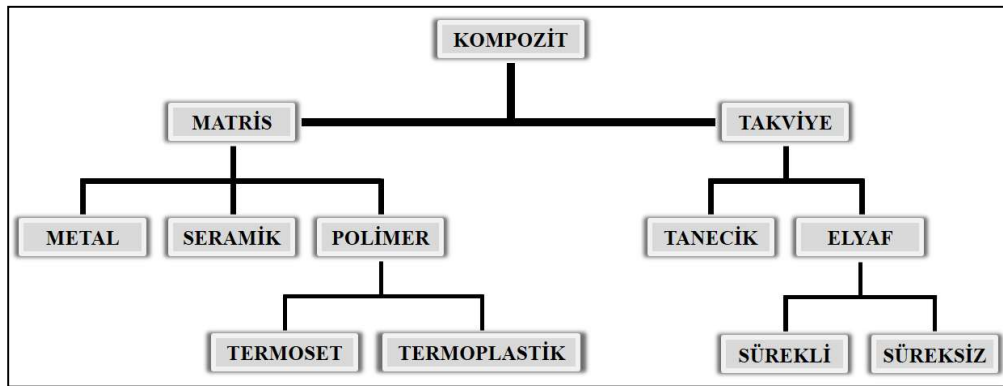
Kompozit malzemelerde, bileşenlerin kompozit içindeki formları düşünüldüğünde bu yapıların kompozitlere etkileyen yükler konusunda farklı işlevlere sahip oldukları görülmektedir. Kompozit yapılarda genel olarak, yapı üzerine gelen yüklerin %70 ile %90’ı takviye malzemeleri tarafından taşınmaktadır. Ancak yapı içinde yükün dağıtılması işini matris malzemeleri yapmaktadır. Bu durum, kompozit malzemelere yapılan tek eksenli çekme deneyinden elde edilen gerilme-birim şekil değişimi grafiğinden kolaylıkla görülebilmektedir. Bu durum Şekil 2.2’de farklı kompozit bileşenleri için örneklenmiştir (Campbell, 2010).

Kompozit malzemelerde aranan özellikler rijitlik, akma/kırılma dayanımı, kırılma tokluğu ve hafiflik olarak sıralanabilir. Kompozit malzemelerin özellikleri temel olarak takviye malzemesinin özelliklerine, matris malzemesinin özelliklerine ve fiber



Şekil 2.2 Takviye malzemesi, matris malzemesi ve kompozit malzemenin **a)** Elastik bölgede birim şekil değişim-gerilme ve **b)** Elastik ve plastik bölgede birim şekil değişimi-gerilme grafikleri (Campbell, 2010)

matris ara yüzeyindeki yapışma kabiliyetine bağlıdır. Bu nedenle kompozit malzemelerde matris ve takviye malzemesi olarak kullanılan malzemeler, üretilecek kompozitin kullanım yerinde malzemeden istenen özelliklere göre, farklı malzeme gruplarından seçilmektedir (Campbell, 2010). Bu malzeme grupları Şekil 2.3'te gruplandırılmıştır.



Şekil 2.3 Kompozit malzeme bileşenleri grupları (Campbell, 2010)

2.1.1 Matris Malzemeleri

Matris tüm kompozit türlerinde yapı içinde sürekliliğe sahip fazdır. Kompozit yapı içindeki en önemli görevleri takviye malzemesinin yönelimi ve takviye

malzemeleri arasındaki boşlukların korunmasıdır. Matris malzemeleri kompozit içindeki takviye malzemelerini sardığı için kompozit yapıya verilmek istenen mekanik olmayan özellikler söz konusu olduğunda bu yapı öneme sahiptir. Matris malzemeleri değiştirilerek kompozit yapıya verilebilecek olan önemli özellikler aşınma direnci, korozyon direnci, hafiflik vb. olarak sıralanabilir (Campbell, 2010).

Matris yapı malzemeleri üretilecek yapının formu, üretim şekli ve kullanım yerine göre ihtiyaç duyulan mekanik özellik çeşitleri gibi sebeplerle matris malzemeleri farklılık gösterebilir. Matris malzemeleri malzemelerin cinsine göre 3 ana malzeme grubu altında toplanabilir. Bunlar metal, seramik ve polimer gruplarıdır (Mallick, 2007).

2.1.1.1 Metal Matris

Metal matrisli kompozitler otuz yıldan uzun süredir geliştirilmeleri üzerinde çalışılan malzemelerdendir. Geçmişte metal malzemeler ulaşım ve taşıma sanayilerinde sıklıkla tercih edilmişlerdir. Metal matrisli kompozit malzemeler, mekanik özelliklerinin metal malzemeler ile benzer seviyelerde olmaları ve öz kütlelerinin daha düşük olması sebebi ile bu alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bunun yanında otomotiv, uzay ve havacılık sanayi gibi alanlarda kullanılan motorlarda metal matrisli kompozitlerin kullanılma sebebi sadece mukavemetin korunması ve yapıyı hafifletmek değildir. Bunun yanında metal matrisli kompozitlerin tribolojik fayda sağlaması da vardır. Metal matrisli kompozitlerin tercih edilmesinde etkili olan diğer özellikleri yüksek termal ve ısı iletkenliğe sahip olmaları, sünek olmaları ve yüksek tokluk göstermeleridir (Brian, 2004).

Bütün bu özelliklerine rağmen metal matris kompozitlerin kullanımlarını kısıtlayan çok sayıda olumsuz özellikler bulunmaktadır. Metal matrisli kompozitler metal malzemelere göre daha düşük öz kütleye sahip olmalarına rağmen diğer kompozit türlerine göre daha yüksek öz kütleye sahiptirler. Bunun yanında metal matrisli kompozitler de matris-fiber ara yüzeyinde korozyona karşı bir eğilim vardır. Bu duruma örnek vermek gerekirse alüminyum, metal matrisli kompozitlerde en çok

tercih edilen malzemelerden bir tanesidir. Bunun sebebi saf alüminyumun yüksek korozyon direncine sahip olmasıdır. Ancak alüminyum matrisli kompozitler bu özelliklerini büyük ölçüde yitirmektedirler. En önemli diye bileceğimiz özellikleri ise yüksek erime noktasına dolayısıyla yüksek işlem sıcaklığına sahip olmalarıdır. Bu durum ise kompozitin üretim maliyetini arttırmaktadır (Brian, 2004). Günümüzde kullanılan metal matrisli kompozit malzeme örneği Şekil 2.4’te verilmiştir.



Şekil 2.4 Metal matrisli kompozit örneği (Brian, 2004)

2.1.1.2 Seramik Matris

Seramik matrisli kompozitler otuz beş yıldır kullanılan kompozitlerdir. Bu kompozitlerin kullanılmaya başlamasından günümüze kadar bu kompozitlerdeki gelişmeler çok hızlı olmuştur. Ancak bu ilerlemelerin ileri mühendislik alanlarındaki (gaz türbinleri vb.) uygulanmaları son derece yavaş gerçekleşmiştir (Cantor ve diğer., 2004).

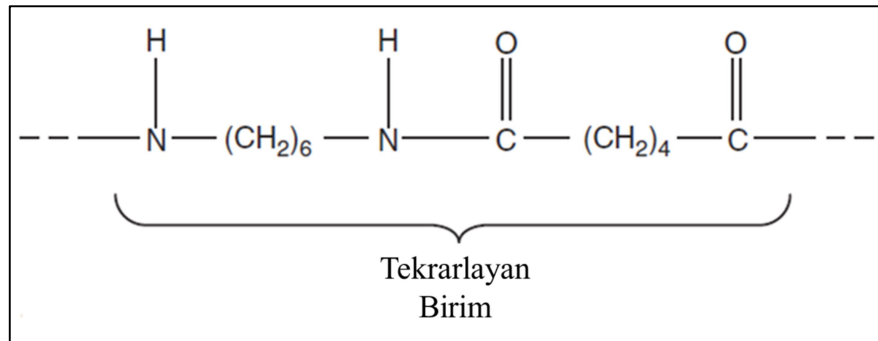
Seramik matrisli kompozitlerin önemli uygulama alanlarından bazılarına örnek olarak içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, elektronik ve cerrahi implantlar verilebilir. Bu alanlar için öne çıkan en önemli seramik matris malzemeleri silisyum karbür (SiC), silikon nitrit (Si₃N₄) ve alüminyum oksit (Al₂O₃) olarak sıralanabilir. Bu malzemelerin en önemli tercih sebebi yüksek elastisite modülüne sahip

olmalarıdır. Ancak bu yapıların gevrek oluşları ve yüksek çentik hassasiyetlerinden kaynaklanan düşük yapısal güvenilirlik, bu malzemelerin yaygın uygulamalarının önünde büyük bir engeldir (Mallick, 2007).

Seramik matrisli kompozitlerin kırılma tokluklarının iyileştirilmesi ve çentik hassasiyetlerinin azaltılması bu kompozitlerin geliştirilmesinin temel nedenidir. Seramik matrisli kompozitler üzerine yapılan ilk çalışmalar, düşük elastisite modüllü olan (cam, cam seramikleri vb.) seramiklerin güçlendirilmesinde karbon fiberlerin kullanılmasıdır. Seramik matrisli kompozitler üzerine yapılan son çalışmalar ise yüksek sıcaklığa dirençli polikristal seramiklerin (SiC, Si₃N₄ vb.) SiC lifleri ile iyileştirilmesine odaklanmıştır. Bu malzemelerin mukavemetleri liflerinkine yakın olduğundan, liflerden çok az takviye etkisi vardır (Mallick, 2007).

2.1.1.3 Polimer Matris

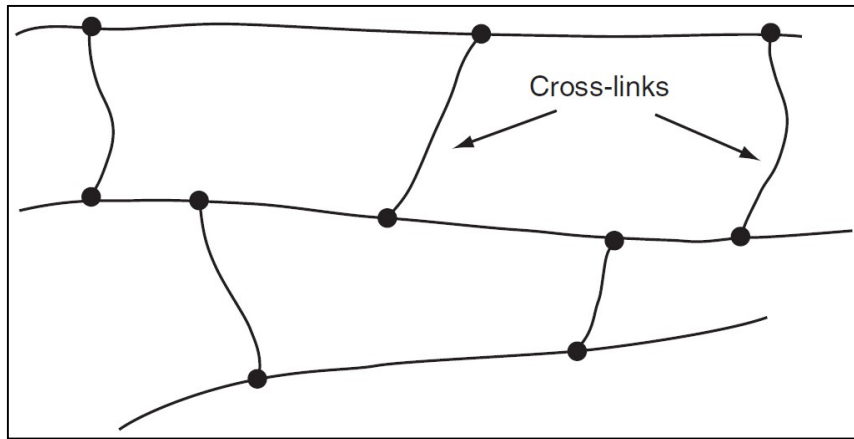
Polimer, kovalent bağlarla bir araya getirilen bir veya daha fazla tekrarlanan atom grubu içeren uzun zincirli bir molekül olarak tanımlanır. Polimerik bir malzeme, benzer kimyasal yapıya sahip ancak eşit uzunlukta olmayan çok sayıda polimer molekülünün bir topluluğudur. Bu moleküler dizilim üzerine örnek Şekil 2.5'te verilmiştir. Katı halde, bu moleküller ya amorf polimerler halinde (rasgele bir şekilde) ya da yarı-kristal polimerler halinde (rastgele ve düzenli şekilde bir karışım) bulunurlar (Mallick, 2007).



Şekil 2.5 Örnek molekül dizilimi (Mallick, 2007)

Polimer matrisli kompozit malzemelerin öne çıkan avantajları, yüksek özgül mukavemetleri ve yüksek elastisite modülleridir. Kompozitler üzerine yapılan araştırmalarda polimer matrisli kompozitlerin spesifik mukavemet (mukavemet ve yoğunluk oranı) ve spesifik modül (modül ve yoğunluk oranı) değerleri diğer malzemeler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak polimer matrisli karbon elyaf takviyeli kompozitlerin spesifik mukavemet ve spesifik modüllerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Cam elyaf takviyeli polimer matrisli kompozitlerin sadece spesifik mukavemetleri metalik malzemelerden daha yüksektir (Wang, 2011). Polimer malzemeler sahip oldukları farklı kimyasal bağlar sebebi ile iki gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar termoset ve termoplastiklerdir.

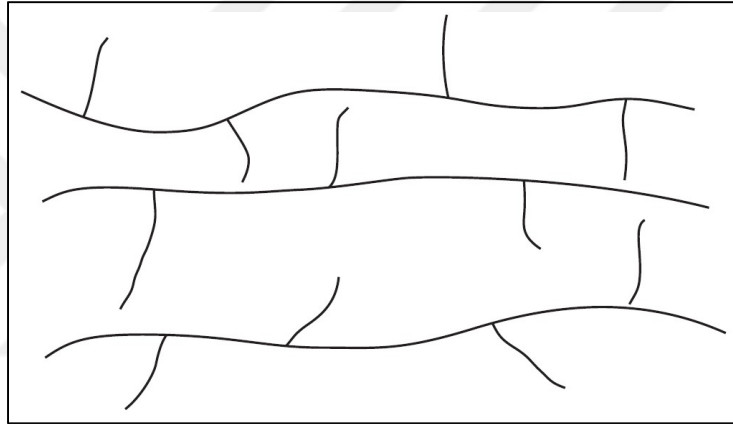
2.1.1.3.1 Termosetler. Termoset polimerler, moleküllerin çapraz bağlarla birleştiği ve üç boyutlu bir ağ yapısı oluşturduğu rijit yapıdır. Bu çapraz bağ yapısı Şekil 2.6'da görülebilir. Bu çapraz bağlar polimerizasyon reaksiyonu sırasında (aynı zamanda kütleme reaksiyonu olarak da adlandırılır) oluşur, sonrasında termoset polimeri ısı ile eritilemez. Kütleme sonrası termoset yüksek sıcaklıklarda kömürleşir ve sonunda yanar. Ancak, çapraz bağlantı sayısı düşükse, onları yüksek sıcaklıklarda yumuşatmak mümkün olabilmektedir (Mallick, 2007).



Şekil 2.6 Termosetlerin moleküler bağlarının şematik görünümü (Mallick, 2007)

2.1.1.3.2 Termoplastikler. Termoplastik polimerde, tekil moleküller kimyasal olarak birleşmezler. Bu polimerler, zayıf ikincil bağlar veya van der Waals bağları ve hidrojen bağları gibi moleküller arası kuvvetler tarafından yerinde tutulur. Bu

durumu gösteren kimyasal yapı Şekil 2.7’de verilmiştir. Isı uygulaması durumunda katı termoplastik polimerdeki ikincil bağlar geçici olarak kırılabilir ve moleküller artık birbirlerine göre hareket ettirilebilir. Bu durumda termoplastik yapı, üzerlerine basınç uygulandığında yeni bir forma dönüşebilir. Eriyik termoplastik yapının bu durumda soğutulması durumunda, moleküller arası ikincil bağlar restore edilerek verilmiş olan yeni katı şekil elde edilebilir. Termoplastiklerin ısıtılarak yumuşatılması, erimesi ve yeniden şekillendirilmesi işlemi istenildiği kadar tekrarlanabilir (Mallick, 2007).



Şekil 2.7 Termoplastiklerin moleküler bağlarının şematik görünümü (Mallick, 2007)

Termoplastiklerin en büyük avantajlarından biri ısı ile yumuşama veya erimenin, kaynak ve ısıl şekillendirme yapılmasına izin vermesidir. İşleme döngüleri, çapraz bağlarda kimyasal reaksiyonunun olmaması nedeniyle çok kısadır. İşlemlerinin izlenmesi daha kolaydır. Çünkü sadece fiziksel bir dönüşüm geçirirler. Termoplastikler, işlemden önce doğru bir şekilde kurutulmuşlarsa, işlem sırasında gaz veya su buharı açığa çıkarmazlar. Termoplastik atıklar, fiziksel yumuşama ya da erimenin tersine çevrilebilirliği nedeniyle neredeyse aynı malzemeler üretmek için yeniden kullanılabilir (Mallick, 2007).

Bu özelliklerine rağmen termoplastiklerde dikkat edilmesi gereken bazı noktalar vardır. Bunlara örnek olarak sıcaklık yükseldiğinde, termoplastik molekülleri arasındaki kimyasal bağlantıların olmaması nedeniyle elastisite modüllerinin düşmesi verilebilir. Aynı nedenden dolayı, termoplastiklerin sürünme davranışları,

termosetlerinki kadar iyi değildir. Bir yangın sırasında, eriyebilme özellikleri sebebi ile polimer yapı fiziksel formunu kaybeder. Bu özelliklerinin yanı sıra sıvı halde çalışılabilecek az sayıda termoplastik malzeme bulunmaktadır (Mallick, 2007).

2.1.2 Takviye Malzemeleri

Kompozitlerde takviye bölgesi, mukavemet ve sertliği sağlayan bölgedir. Pek çok kompozit malzemede, takviye malzemeleri matrinden daha dayanıklı, daha güçlü ve daha serttir. Kullanımı konusunda en büyük sınırlama kullanılan matris malzemesinin çeşididir. Bir diğer sınırlama ise kompozitten beklenen özelliklerden kaynaklanmaktadır. Kompozit numunelerin takviye malzemeleri iki ana başlık altında toplanabilir. Bunlar tanecik takviyeler ve elyaf takviyeleridir (Campbell, 2010).

2.1.2.1 Tanecikler

Tanecik takviyeli kompozitler, eşit boyutlara sahip ve her yönde bu özelliklerini koruyan parçacıklar ile takviye edilmiş kompozitlerdir. Küresel formda, düz formda veya başka düzenli veya düzensiz geometrilerde olabilirler. Tanecik kompozitler, sürekli elyaf kompozitlerden çok daha zayıf ve daha az sert olma eğilimindedirler. Ancak bunlar genellikle daha ucuzlardır. Tanecik takviyeli kompozitler genellikle işleme zorlukları ve kırılganlıkları nedeniyle %40 ila %50 oranına kadar takviye içermektedirler (Campbell, 2010).

2.1.2.2 Elyaf/Fiberler

Fiberler çap boy oranları ciddi farklılıklara sahip olan yapılardır. Lifler, küçük çapları nedeniyle yüksek mukavemetli yapılar oluşturabilirler. Ekstrüzyon yöntemi ile üretilen malzemelere kıyasla daha az kusur içerirler. Fiber yapılar ile ilgili genelleşmiş olan bir kural ise lifin çapı ne kadar küçük olursa mukavemeti o kadar yüksek olacağı şeklindedir. Fakat fiberlerde, elyafın çapı küçüldükçe üretim maliyeti artmaktadır. Ek olarak, daha küçük çaplı yüksek mukavemetli lifler daha fazla

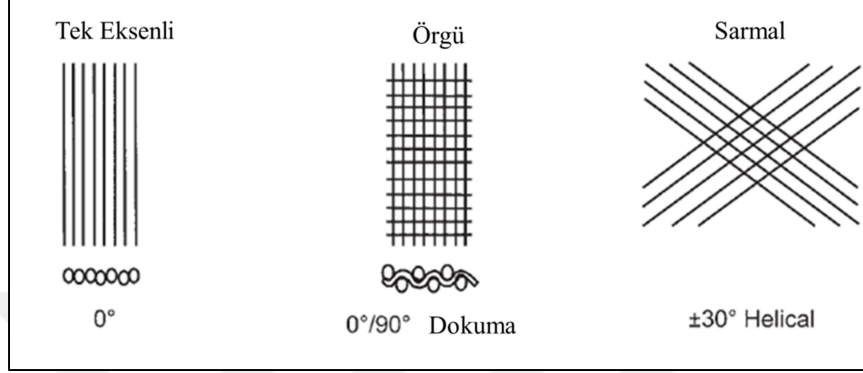
esnekliğe sahiptir ve dokuma gibi imalat işlemlerine daha uygundurlar (Campbell, 2010).

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, bir matrise gömülü veya yapıştırılmış yüksek mukavemetli ve elastisite modüllü fiberlerden oluşmuş kompozit yapılardır. Bu formdaki yapılarda, hem lifler hem de matris, fiziksel ve kimyasal kimliklerini korur. Ancak tek başlarına olan bileşenlerden herhangi biri ile elde edilemeyen özelliklerin bir kombinasyonunu üretirler. Genel olarak, lifler ana yük taşıyıcı elemanlardır. Lifleri çevreleyen matris onları istenen yerde ve yönelimde tutar. Aralarında yük aktarım ortamı olarak hareket eder ve yüksek sıcaklık ve nem nedeniyle gelecek çevresel hasarlardan korur. Böylece, fiberler matris için takviye sağlarlar da, ayrıca elyaf takviyeli bir kompozit malzemede bazı faydalı fonksiyonlara da hizmet eder (Mallick, 2007). En bilinen elyaflarından bazıları olan cam, aramid ve karbon elyafları sürekli veya süreksiz formda olabilir (Campbell, 2010).

2.1.2.2.1 Sürekli Elyaflar. Fiber takviyeli kompozitlerin yapısal uygulamalarda kullanıldığı en yaygın biçimi sürekli elyaf takviyeli kompozitlerdir. Sürekli elyaf takviyeli kompozitlerde lamina, uzun boy oranlarına sahip bir dizi ince lif ve matris tabakasının istiflenmesi ve bunların istenen kalınlıkta birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Kompozit bir yapıda lamina tabakaların dizilme sırasının yanı sıra her tabakanın lif oryantasyonu, kompozit laminaların çeşitli fiziksel ve mekanik özelliklerini kontrol edilmesinde önemlidir (Mallick, 2007).

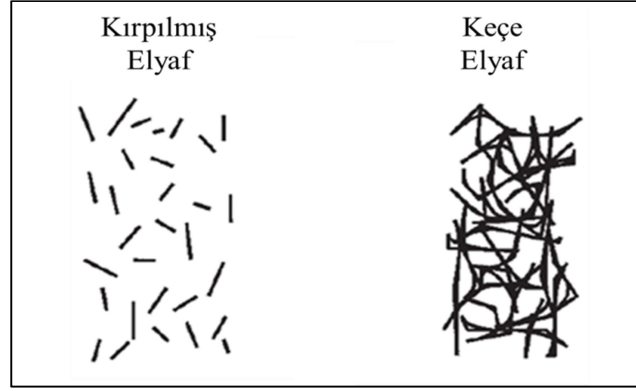
Sürekli lifli kompozitlerde istenen mukavemet ve sertlik özelliklerini elde etmek için yapı içinde %60 ila %70 gibi yüksek hacimlerde elyaf olmasına izin verilir. Bu yüksek elyaf oranının şartı kompozit içinde farklı yönlerde elyaf yönelimi olan laminalar ile üretilmeleridir. Daha yüksek oranlarda, elyaf takviyesindeki lifleri etkili bir şekilde desteklemek için çok az matris vardır. Bu nedenle sürekli elyaf takviyeli yapılarda %70 elyaf oranı bir sınırdır. Sürekli takviye örnekleri, uygulamalara göre değişiklik gösterse de sürekli elyaf takviyeleri üç temel gruba ayrılır. Bunlar tek

yönlü, dokunma ve sarmal sargılı takviyedir ve şematik gösterimleri Şekil 2.8’de verilmiştir (Campbell, 2010).



Şekil 2.8 Sürekli elyaf türlerinin şematik görünümü (Campbell, 2010)

2.1.2.2.2 Süreksiz Elyaf lar. Sürekli lifler uzun boy oranlarına sahipken, süreksiz lifler kısa boy oranlarına sahiptir. Sürekli lifli kompozitler normal olarak tercih edilen bir yönelime sahipken, kesintili elyaf lar genellikle rastgele bir yönelime sahiptir. Süreksiz lifli kompozitlerin mukavemet seviyeleri, en-boy oranları yeterince büyük ve hizalanmış ise sürekli lifli kompozitlerinkilere yaklaşabilir. Ancak pratikte süreksiz liflerle iyi hizalamayı sürdürmek zordur. Süreksiz lif kompozitleri normal olarak hizalanmada biraz rastlantısaldır ve bu durumda güçlerini ve elastisite modüllerini önemli ölçüde azaltır. Bununla birlikte, süreksiz lifli kompozitlerin, sürekli fiber kompozitlerden çok daha düşük maliyetleri vardır. Bu nedenle, daha yüksek mukavemet ve sertliğin gerekli olduğu yerlerde sürekli elyaf takviyeli kompozitler kullanılır. Ancak maliyetin daha önemli olduğu ve mukavemet ve sertliğin ikinci planda kaldığı yerlerde süreksiz elyaf takviyeli kompozitler kullanılır. Şekil 2.9’da süreksiz elyaf takviyeli uygulamalarda kırılmış veya keçe formunun gösterimi bulunmaktadır (Campbell, 2010).



Şekil 2.9 Süreksiz elyaf türlerinin şematik görünümü (Campbell, 2010)

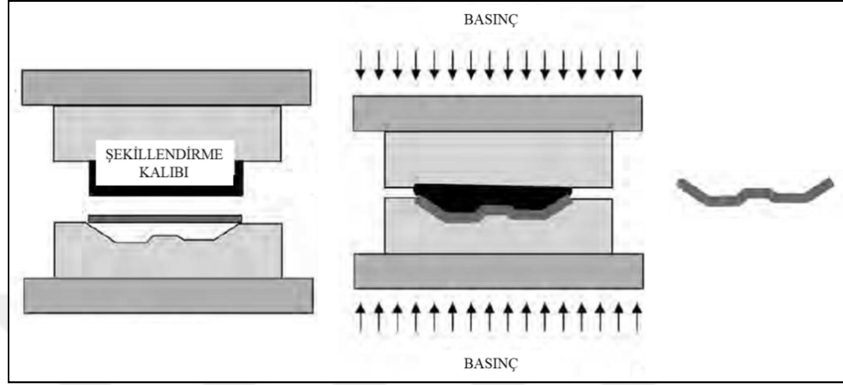
2.2 Kompozit Malzemeleri Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemelerin üretiminde hem takviye tipi hem de matris malzemesi üretim işlemini etkilemektedir. Bu bölümde incelenen üretim yöntemleri polimer matrisli kompozitlerin ana işleme yöntemleridir (Campbell, 2010). Kompozit malzemeler için önemli olan üretim yöntemlerinden bazıları sonraki başlıklarda incelenmiştir.

2.2.1 Termal Şekillendirme

Termal şekillendirme terimi, üretim yöntemlerinin geniş bir yelpazesini kapsamaktadır. Bununla birlikte, termoform esasen düz bir levha veya katlı bir yapıya şekil vermek için ısı ve basınç kullanan bir işlemdir. Tipik bir termal şekillendirme tertibatı Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Termoformun ilk adımı kat dizilimini hazırlamaktır. Hazırlanan dizilimi daha sonra düz bir yapı halinde önceden birleştirilebilir veya ısıyla şekillendirme işlemi birleştirilmemiş lamina paketi kullanılarak da gerçekleştirilebilir. Isıl biçimlendirme için önceden birleştirilmemiş veya gevşek birleştirilmiş kat paketleri kullanılmasının daha iyi olup olmadığı konusunda bazı anlaşmazlıklar bulunmaktadır. Önceden birleştirilmiş yapılardaki boşluklar veya gözenekler işlem sonrası iyi birleşme avantajı sağlar. Ancak şekillendirme işlemi sırasında gevşek birleştirilmiş yapılarda katlarda kaymalar gözlenmez. Yapı kalıp içine yerleştirildikten sonra sıcaklık arttırılır. Biçimlendirme

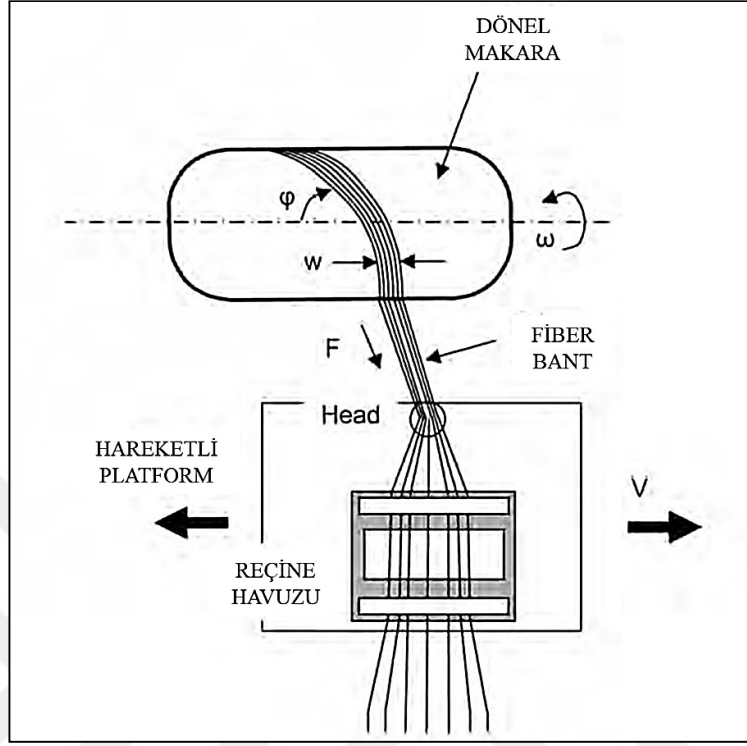
sıcaklığına ulaştıktan sonra, basınç hızla artırılır ve kompozite şekil verilir (Campbell, 2010).



Şekil 2.10 Termal şekillendirme yöntemi (Campbell, 2010)

2.2.2 Bant Sarma

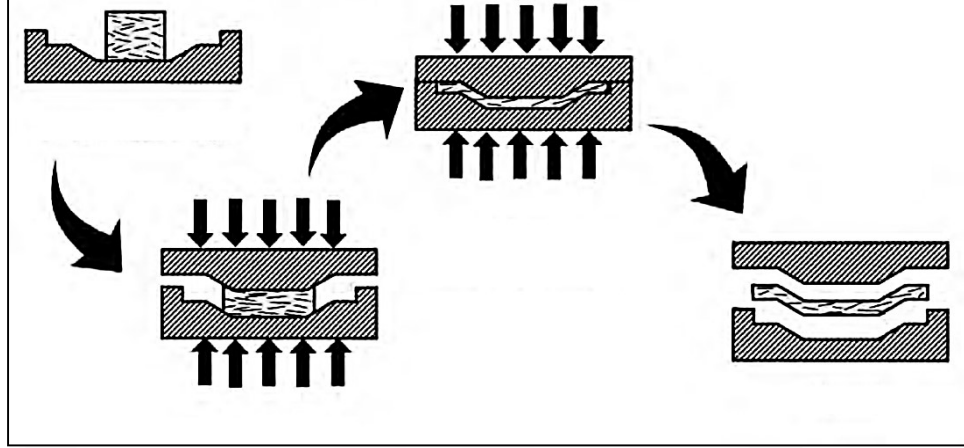
Bant sarımı, sürekli bir lif bandının dönen bir silindir üzerine yerleştirildiği yüksek hızlı bir işlemdir. Bu işlem metodunda 45-180 kg/h kadar yüksek döşeme hızları görülebilir. Filaman sarımı, aynı zamanda, büyük ve kalın cidarlı yapıları üretebilen tekrarlanabilir bir işlemdir. 1940'ların ortalarında olgunlaşmış ve bu zamanlardan beri sürekli kullanımda olan bir yöntemdir. Silindirler, şaftlar, küreler ve koniler gibi şekillerin neredeyse tümünün üretiminde kullanılmaktadır. Bu üretim metodu Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Bant sarımı ile çok çeşitli boyutlarda parça üretebilmektedir. Geometri üzerindeki başlıca kısıtlama, içbükey yapıların sarılmamasıdır. Çünkü üretimde lifler gergin durumdadır ve iç bükey yapı bu durum için uygun değildir. Bant sarma için tipik uygulamalar silindirler, basınçlı kaplar, roket motor kılıfları ve motorlu kaportalardır. Son bağlantı parçaları genellikle yapıya sarılır, güçlü ve etkili eklemler oluşturur (Campbell, 2010).



Şekil 2.11 Bant sarma metodu (Campbell, 2010)

2.2.3 Presli Kalıplama

Üretim yelpazesinin diğer ucunda, sıkıştırma kalıplama, termoset veya termoplastik reçineler kullanılarak karmaşık, yüksek mukavemetli, cam elyaf takviyeli parçaların kalıplanması için uygun yüksek hacimli ve yüksek basınçlı bir işlemdir. Pres kalıplama, günümüzde otomotiv kompozit uygulamaları için kullanılan birincil üretim yöntemidir. Sıkıştırılmış ve kalıplanmış üç ana malzeme grubu; termosetler, cam elyaf takviyeli termoplastikler ve uzun elyaf takviyeli termoplastikler için tabaka kalıplama bileşikleridir. Pres kalıplaması mükemmel yüzey kalitesi, iyi boyutsal kontrol ve yüksek derecede karmaşıklık ile oldukça büyük parçalar üretebilen bir kalıplama işlemidir. Yöntem (Şekil 2.12) kullanılarak 0,09 ila 3,7 m² arasında değişen yüzey alanlarına sahip parçalar üretebilmektedir. Buna rağmen genel tercih 0,9 m²'den daha düşük alana sahip parçalar yönündedir. Bu yöntemde parçaların kalınlıkları 1,3 mm'ye kadar ince olabilir (Campbell, 2010).



Şekil 2.12 Presli kalıplama süreci (Campbell, 2010)

2.2.4 Basınçlı Kalıplama

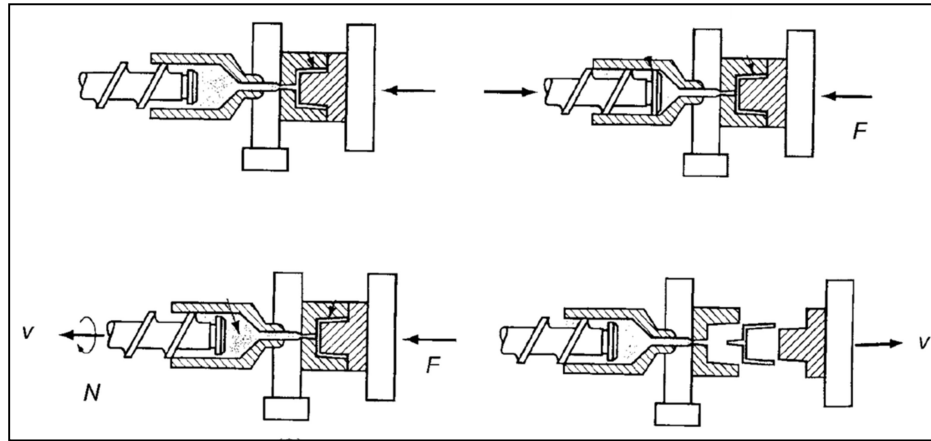
Sıkıştırma kalıplaması, otomotiv endüstrisinde yüksek hacimli yapılar konusundaki yetenekleri nedeniyle çok popülerdir. Bu yöntem büyük otomotiv panelleri kalıplamak için kullanılır. Levha kalıplama bileşikler (SMC'ler) ve yığın kalıplama bileşikler (BMC'ler), sıkıştırma kalıplama için daha yaygın olan ham maddelerdir. Sıkıştırma kalıplama ayrıca prepreg ve temel malzemeleri kullanarak yapısal paneller yapmak için kullanılır. Ancak levha kalıplama bileşiklerinin sıkıştırma kalıplamasının popülerliğinden dolayı, levha kalıplama bileşiklerinin kalıplanması burada tartışılmaktadır (Mazumdar, 2002).

Basınçlı kalıplama endüstrisi otomobil endüstrisi için oldukça olgun bir süreç haline gelmiştir. Levha kalıplama bileşiklerinin sıkıştırma kalıplamasında, nihai bileşen bir kalıplama işleminde çelik levhadan üretilirken çelik sac son şekli elde etmek için bir dizi damgalama işleminden geçer. Bu nedenle, sıkıştırma kalıplama, damgalama işlemine göre çeşitli avantajlar sağlar ve kalıplar ve ekipman açısından önemli maliyet tasarrufu sağlamaktadır. Kalıplama işlemi sırasında delikler, flanşlar, omuzlar ve üniform olmayan kalınlıklar oluşturulabilir. Böylece kaynak, delme ve işleme gibi ikincil işlemlerden kaçınılabilir (Mazumdar, 2002).

2.2.5 Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon kalıplı cam elyaf takviyeli termoplastikler otomotiv ve cihaz endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tasarım esnekliği, cam elyaf takviyeli termoplastiklerin karmaşık şekiller oluşturmaları, çok yüksek üretim oranları ve parça başına düşük maliyetli olması geniş uygulama alanına sahip termoplastik enjeksiyon kalıplama için önemlidir (Campbell, 2010).

Enjeksiyonla kalıplamada, pelet formundaki kalıplama bileşiği, istenen bileşik konsantrasyonunda ve kuru halde, kalıplama makinesinin enjeksiyon haznesinde ısıtılır. Malzeme vidadan aşağıya doğru ilerledikçe, namludan gelen ısı ile vidanın kesme hareketinin birleşmesiyle erimekte. Malzeme, varil içinde birikir ve daha sonrasında, daha soğuk olan bir kapalı kalıba sıcak bir akışkan olarak yüksek basınç altında enjekte edilir. İstenilen eriyik yeterince biriktikten sonra, vida dönmeyi durdurur ve kontrollü bir hızda ileriye doğru hareket eder. Bir ram veya piston gibi davranır ve vidanın önündeki plastik eriyiği kalıp içine zorlar. Erimiş malzeme, nozul boyunca sistemden akar ve son olarak kalıp boşluğunun içine dolar. Kalıp tamamen dolduğunda, termoplastik yapıyı kalıp içinde tutmak ve soğutmak için vida sabit kalır. Bu soğuma süresi boyunca büzülme telafi etmek için kalıba ek eriyik enjekte edilir. Soğuma süreci sonrası çıkış milleri kalıpları ve parçayı birbirinden uzaklaştırır ve parça kalıptan çıkartılır. Bu süreç Şekil 2.13’de gösterilmiştir (Campbell, 2010).



Şekil 2.13 Enjeksiyon kalıplama süreci (Campbell, 2010)

BÖLÜM ÜÇ

KULLANILAN MALZEMELER

Bu çalışma kapsamında üretilen kompozit malzemelerin tümünde matris malzemesi olarak polipropilen ve takviye malzemesi olarak cam elyaf kullanılmıştır. Çalışma kapsamında üretilen kompozitlerin büyük çoğunluğu sandviç yapıdadır. Sandviç kompozitlerin sorunlarından biri çekirdek malzemesi ile yüzey katmanlarının birleştirilmesi için yapıştırıcı malzeme kullanılması ve kullanılan bu yapıştırıcı malzemenin özelliklerinin sandviç kompozitin özelliklerine etki etmesidir. Araştırma kapsamında üretilen tüm sandviç kompozitlerin çekirdek ve yüzey katmanlarında kullanılan matris ve takviye malzemeleri aynıdır. Sadece takviye malzemesinin formu değiştirilmiştir.

Çalışma kapsamında iki farklı formda malzeme kullanılmıştır. Bunlar, uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granül ve tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilendir. Üretilen tüm kompozitlerde uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller kullanılmıştır. Çalışmada üretilen sandviç yapıli kompozitlerin çekirdek malzemesi uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granül ve yüzey katmanlarının malzemesi tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilendir.

3.1 Polipropilen

Polipropilen düşük maliyetli, düşük yoğunluklu ve çok yönlü bir plastiktir. Polipropilenin homopolimerlerinin yanı sıra farklı kalitelerde kopolimerleri de mevcuttur. Polipropilen tüm termoplastik malzemelerin içinde en düşük yoğunluğa (0.9 gr/cm^3) sahip olan bir polimerdir. Kullanım esnasında yüksek mukavemet, sertlik, kimyasal direnç ve yorulma direnci sağlaması sebebi ile makine parçaları, araba bileşenleri (fanlar, fasya panelleri, vb.) ve bazı ev eşyalarında kullanılmaktadır (Mazumdar, 2002).

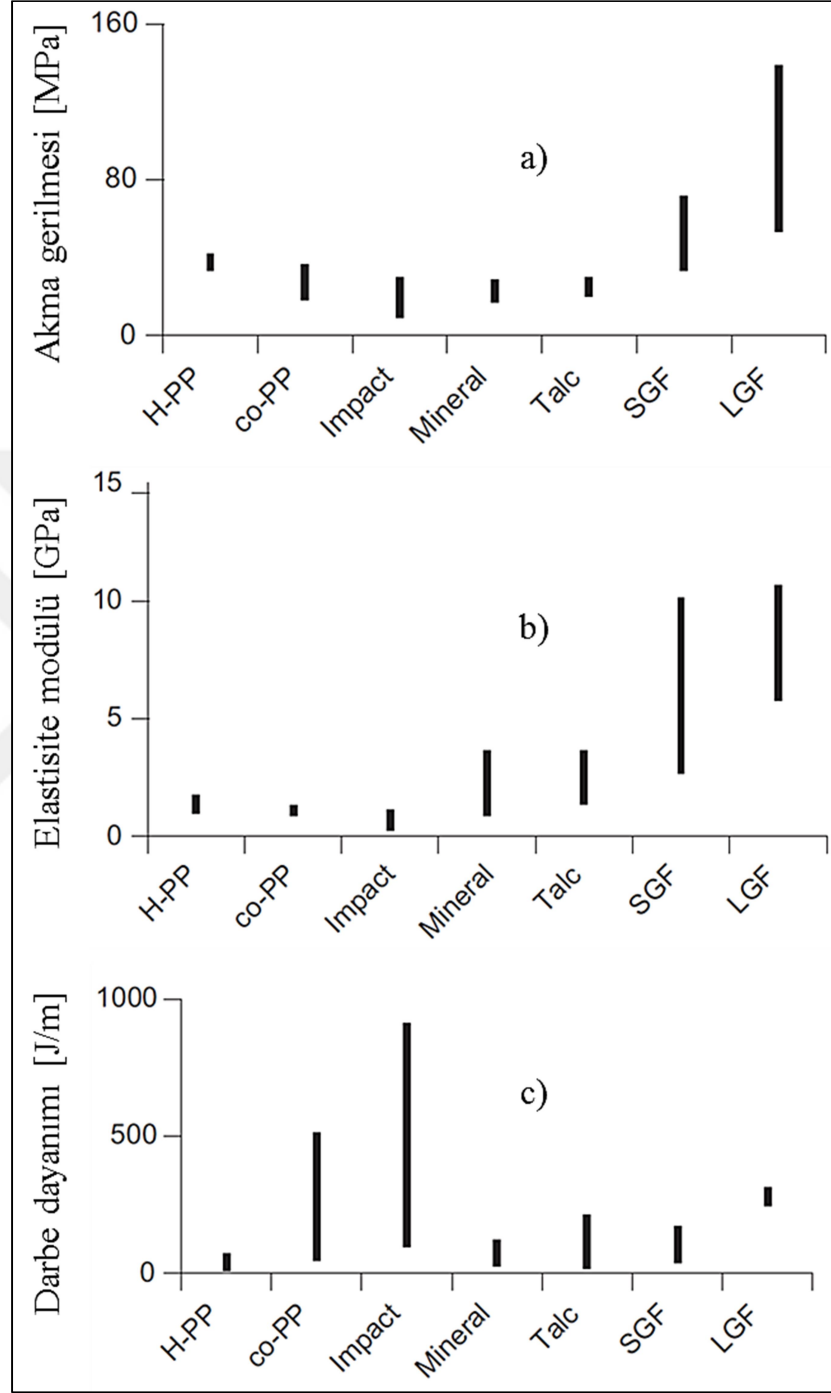
Polipropilen polimeri temel olarak iki farklı formda bulunur. Bunlar:

Polipropilenin kullanımda en göze çarpan dezavantajları ısıya, düşük sıcaklığa, UV ışığa, sünmeye ve yüksek enerjili radyasyonlara olan doğal hassasiyettir. Polipropilen bakır, manganez ve kobalt gibi pro-oksidan metallere karşı duyarlıdır. Polipropilenin saydam formunun sağlanabilmesi ise zordur. Yüzey gerilmeleri nedeniyle polipropilen yüzey işlemi yapılmadan yapıştırma, boyama ve baskı işlemlerinin yapılması zordur. Sadece karbon ve hidrojen atomlarından oluşan polipropilen doğal olarak yanıcı bir malzemedir. Bu nedenle yanma direncini artırıcı malzemeler (halojen vb.) ile takviye edilirler. Ancak bu malzemeleri içermeyen ürünler dahi hala pazarlanmaktadır (Biron, 2013).

Polipropilen ortam sıcaklığında iyi mekanik özellikler gösteren, düşük fiyat/malzeme özelliği oranına, kolay işlenebilme özelliğine, kimyasal dayanıma, düşük su emme kapasitesine, ıslak ortamlarda bile iyi elektriksel yalıtımına sahip bir polimerdir. Polipropilen kaynak işlemi yapılabilen, çok yönlü işleme yöntemleri olan, geniş erime akış hızı aralığı bulunan bir malzemedir (Biron, 2013).

Bir genelleme yapmak gerekir ise polipropilenin özellikleri açısından en yakın olduğu termoplastik reçine polietilendir. Mineral, talk ve cam elyaf gibi malzemeler ile takviye edildiğinde daha rijit, özellikleri daha gelişmiş ve mekanik özellikleri sıcaklık ile daha az değişim gösteren malzemeler üretilebilmektedir (Biron, 2013).

Polipropilen malzemelerin mekanik özellikleri polipropilenin türüne ve takviye edilmiş hali ise takviye malzemesine göre değişim göstermektedir. Şekil 3.2’de incelenen polipropilen grupları sırasıyla; homopolipropilen (H-PP), kopolipropilen (co-PP), darbe sınıfı polipropilen (impact), mineral takviyeli polipropilen (mineral), talk takviyeli polipropilen (talc), kısa cam elyaf takviyeli polipropilen (SGF) ve uzun cam elyaf takviyeli polipropilen (LGF) şeklindedir (Biron, 2013).



Şekil 3.2 a) Polipropilen malzemelerin akma gerilmeleri (MPa), b) Polipropilen malzemelerin elastisite modülü (GPa) ve c) Polipropilen malzemelerin darbe dayanımları (J/m)

Polipropilenin mekanik özellikleri diğer termoplastikler gibi sıcaklık ile azalma eğilimindedir. Bu sebeple kullanımı için mekanik özelliklerin belli bir yüzdenin üzerinde olduğu güvenli sıcaklık sınırı belirlenmiştir. Ancak polipropilenin türüne ve takviye edilmiş hali ise takviye malzemesine göre değişim göstermektedir. Bu değişim aşağıdaki Tablo 3.1’de verilmiştir (Biron, 2013).

Tablo 3.1 Farklı polipropilen uygulamalarının güvenli sıcaklık sınırları (Biron, 2013)

<i>Polipropilen Türü</i>	<i>Güvenli Sıcaklık Sınırı</i>
Darbe sınıfı	45-60°C
Komonomer	50-60°C
Homopolimer	50-65°C
Mineral takviyeli	50-70°C
Talk takviyeli	55-75°C
Düşük kısa cam elyaf takviyeli	90-130°C
Yüksek kısa cam elyaf takviyeli	125-140°C
Uzun cam elyaf takviyeli	150-160°C

Polipropilen pek çok uygulama alanına sahip bir termoplastik polimerdir. Uygulama alanlarından en önemlileri ve en büyük kullanım yüzdesine sahip olanları Tablo 3.2’de verilmiştir (Biron, 2013).

Tablo 3.2 Polipropilenin farklı uygulamalardaki kullanım yüzdeleri (Biron, 2013)

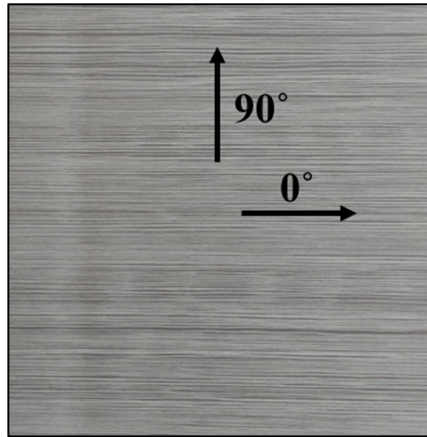
<i>Polipropilen Kullanım Yerleri</i>	<i>Polipropilen Kullanım Yüzdesi</i>
Fiberler	%27
Tüketici ürünleri	%14
Sert ambalaj	%11
Filmler	%9
Taşımacılık	%4
Levhalar	%3
Aletler	%2
Şişirme kalıplama	%1

3.1.1 Tek Eksenli Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Prepreg

Termoplastik prepregler, oda sıcaklığında uzun raf ömrüne sahiptirler. İşlem süreleri azdır, kolaylıkla yeniden şekil verilebilirler ve tamir edilebilme kapasiteleri termoset prepregler ile karşılaştırıldığında daha yüksektir. Bu nedenlerle sıklıkla tercih edilirler (Mazumdar, 2002).

Termoplastik prepregler, termoset prepreg üretimine benzer reçine emdirme ve sıcak eriyik kaplama teknikleri ile üretilmektedir. Ancak termoplastiklerin kimyasal direnci daha fazla olduğu için reçine emdirme tekniğinin uygulanması daha zordur. Sıcak eriyik kaplama tekniği ekstrüzyon işlemine benzer bir yöntemdir. Bu yöntemde lifler ve reçineler, levha formunda eş zamanlı olarak ekstrüde edilirler. Termoplastik prepreg üretimi için film istifleme ve kuru toz biriktirme yöntemleri gibi başka yöntemlerde vardır. Film istifleme işleminde, termoplastik reçine filmi takviyeler ile birlikte istiflenmektedir. Elyafı tamamen emprenye etmek için ısı ve basınç altında birleştirilirler (Mazumdar, 2002).

Prepreg numunelerin takviye malzemeleri farklı formlarda bulunabilirler. Çalışmada kullanılan takviye malzemeleri tek eksenli formda üretilmiştir. Çalışmada kullanılan tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen prepreg formu ve takviye yönüne göre verilen açılar Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Rulo olarak sarılmış tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen laminanın takviye malzemesi E-camdır.



Şekil 3.3 Tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen prepreg (Kişisel arşiv, 2018)

Çalışma sırasında kullanılan tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen prepreg laminanın mekanik özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen prepreg laminanın mekanik özellikleri

X_t (MPa)	Y_t (MPa)	E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	ν_{12}
264 ± 12	$23 \pm 1,9$	13,7	1,5	0,232

3.2 Cam Elyaf

Cam elyaf, polimer matrisli kompozitlerde en büyük kullanım yüzdesine sahip takviye malzemesidir. Cam elyafın kullanımının başlıca sebepleri düşük maliyetli olmasıdır. Ayrıca yüksek mukavemete, yüksek kimyasal dirence ve yüksek yalıtım özelliklerine sahiptir. Kullanımı sırasında dikkat edilmesi gereken özellikleri vardır. Bu özelliklerin en önemlileri düşük gerilme modülü, düşük yorulma direnci ve yüksek yoğunluklu kullanım sırasında aşınmaya karşı hassaslıktır (Mallick, 2007).

Polimer matrisli kompozitlerde kullanılan iki önemli cam elyaf türü vardır. Bunlar E-cam (E-glass) ve S-camdır (S-glass). E-camın, polimer matrisli malzemelerde yaygın kullanımının nedeni, E-camın piyasada bulunan tüm takviye elyafları arasında en düşük maliyetine sahip olmasıdır. S-camın kullandığı sebep ise polimer matrisli yapılarda kullanılan diğer tüm liflerden daha yüksek gerilme mukavemetine sahip olmasıdır. Ancak S-camın üretiminde kullanılan malzemelerin farklılığı sebebi ile üretim maliyeti E-camdan daha yüksektir. E-cam ve S-camın üretiminde kullanılan malzemeler aşağıdaki Tablo 3.4'te verilmiştir (Mallick, 2007).

Tablo 3.4 Cam elyaf türlerinde kullanılan bileşenlerin kullanım yüzdesi

<i>Cam Elyaf Türü</i>	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	CaO (%)	MgO (%)	B_2O_3 (%)	Na_2O (%)
E-cam	54,5	14,5	17	4,5	8,5	0,5
S-cam	64	26	-	10	-	-

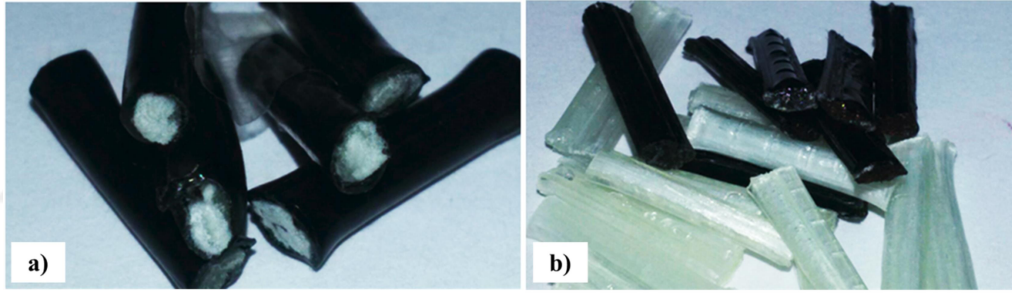
E-cam elyafı üretiminde kullanılan hammaddeler silis kumu, kireçtaşı, fluorspar, borik asit ve kildir. Silis miktarı toplam içeriğin %50'sinden fazlasını oluşturur. Hammadde miktarını ve işlem parametrelerini değiştirerek diğer cam türleri üretilir. Hammaddeler iyice karıştırılır ve bir eritici fırında 1350 ile 1650°C arası sıcaklıklarda eritilir. Eriyik yüzlerce küçük menfez içeren bir veya birden fazla burç içerisine akar. Erimiş cam bu deliklerden geçerken cam filament formunu alır. Bu form içinde iken su veya hava yardımı ile filamentler hızla soğutulur. Filamentler daha sonra yaklaşık 80 km/h hızla bir silindirin üzerine çekilir. Bu aşamadan sonra cam flametler kullanılacağı yere ve amaca göre boyutlandırılır. Bu işlem elyafın ıslanmasını (kompozit üretiminde reçine ile) ve işlenmesini kolaylaştırır. Boyutlandırılan filamentler tek bir iplik haline getirildikten sonra bir silindir üzerine sarılır (Mazumdar, 2002).

3.2.1 Uzun Cam Elyaf Takviyeli Polipropilen Granül

Uzun elyaf takviyeli termoplastik kompozitler birçok özelliğe sahiptirler. Bu özellikler kullanım yerlerine göre avantajlara dönüşebilir. Tek başlarına veya farklı malzemeler ile birlikte kullanılmaları halinde, sahip oldukları özellikler kullanım yelpazelerinin genişletilmesini sağlamaktadır. Enjeksiyon kalıplama ile üretilen termoplastik malzemelerde yapısal performansın zirvesi uzun elyaf takviyeli kompozitlerdir. Bu durumun sebebi, bu malzemelerin rijitlik, mukavemet ve tokluk (darbe dayanımı) seviyelerini tek bir malzemede bir araya getirmesidir. Termoplastiklerin takviyesine yönelik başka hiçbir yöntem, bu üç özelliğin kritik performansı ile yeterince yarışmamaktadır (Plasticomp, 2015).

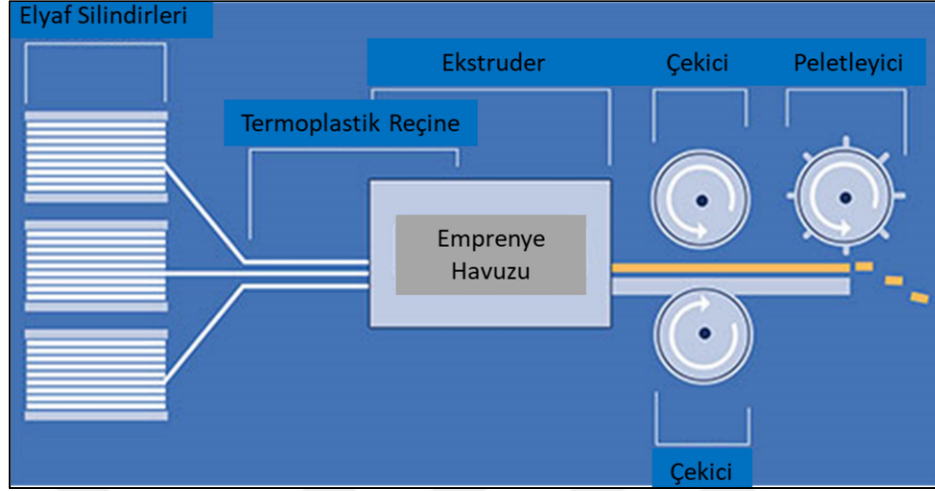
Uzun lifli kompozitler çok sayıda, yüksek kaliteli bileşenler üretmek için verimli bir yöntem olan enjeksiyon metodu ile işlenebilir. Plastik tabanlı malzemelerden oluşmaları sebebi ile diğer malzemelere göre daha az son işleme ihtiyaç duyarlar. Tasarım açısından daha serbest malzemeler olmaları sebebi ile bileşen sayımını azaltarak montaj aşamalarının sayısı azaltılabilir. Bir yapının üretilmesi ile ilgili tüm maliyetler hesaba katıldığında, kullanılan malzeme daha pahalı olsa bile, diğer maliyetlerin düşüşü genel maliyetlerin azalmasını sağlamaktadır (Plasticomp, 2015).

Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller düşünülüğünde iki üretim yöntemi ön plana çıkmaktadır. Bu yöntemler kaplama ve pultrüzyon yöntemidir. Kaplama yöntemi ile üretilen malzemeler, bu malzeme grubu için en çok tercih edilen numune üretim yöntemi olan enjeksiyon kalıplamasında elyafın düzensiz dağılması ve elyafın ıslanmamasına neden olduğu için tercih edilmeyen bir yöntem dönüşmüştür. Pultrüzyon yöntemi ise sonraki dönemlerde geliştirilmiş ve hala iyileştirilen bir yöntemdir. Bu yöntemin en büyük avantajı malzemelerin granül formuna gelirken ıslanması ve kaplama metodunda görülen sorunların görülmemesidir. Bu iki yöntem kullanılarak üretilmiş olan granüller Şekil 3.4'te verilmiştir (Nuh kompozit, 2015).



Şekil 3.4 a) Kaplama metodu ile üretilmiş ve b) pultrüzyon metodu ile üretilmiş, uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller (Nuh kompozit, 2015)

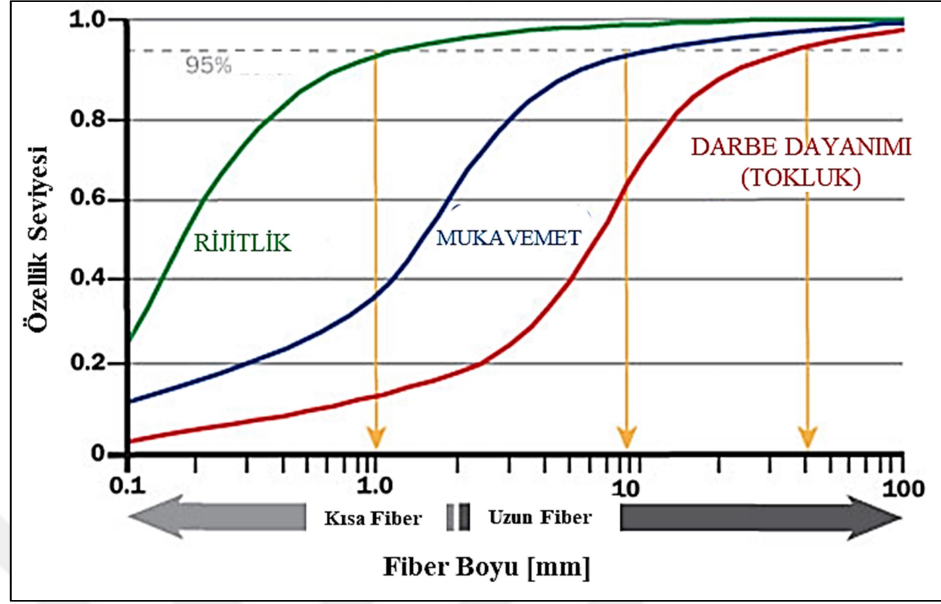
Uzun cam elyaf kompozitleri, sürekli cam elyaf iplikleri olarak işleme başlarlar (<http://www.nuhkompozit.com.tr/teknoloji.html>). Sürekli elyaf iplikleri tek tek lif şeritleri haline getirilir ve termoplastik reçine ile ıslanması için emprenye havuzundan geçirilir. Sonrasında elyaf polimer oranı ayarlanır ve son olarak peletleyiciye gider. Burada istenilen uzunlukta kesilirler (<http://www.plasticomp.com/long-fiber-design-principles-white-paper/>). Dünyada uzun cam elyaf takviyeli polipropilen üretimi yapan firmaların kendi tasarımları olan emprenye havuzları vardır. Dolayısıyla kompozit yapıda karşılaşılabilecek tüm belirsizlikler ve zorluklar emprenye havuz tasarımından kaynaklanmaktadır. Pultrüzyon yöntemi ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerin üretiminin şematik gösterimi Şekil 3.5'te verilmiştir (Nuh kompozit, 2015).



Şekil 3.5 Pultrüzyon metodu ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen üretimi (Plasticomp, 2015)

Çalışmada ve uygulamalarda kullanılan uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin ham maddesi olarak kullanılan granüller 12 mm boyutlarında üretilmiştir. Bu durumun sebebi uzun cam elyaf takviyeli polipropilen malzemeler üzerine yapılan araştırmalarda rijitlik, mukavemet ve tokluğun fiber boyu ile değişiminden kaynaklanmaktadır (Şekil 3.6). Bu sebeple 12 mm granül uzun cam elyaf takviyeli polipropilen boyu bir endüstriyel standarda dönüşmüştür. Yapılan diğer araştırmalarda uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitin kullanım yerleri sebebi ile 12 mm granül boyunun kalıplama için uygun bir boy olduğu belirlenmiştir (Youtube, 2016).

Uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller Nuh Kompozit San. Ve Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir. Üretici firma olan şirket farklı elyaf oranlarına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller üretilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan granüllerin elyaf oranı %60'tır. Elyaf oranı %60 olan uzun cam elyaf takviyeli polipropilen için verilen mekanik özellikler Tablo 3.5'te listelenmiştir.



Şekil 3.6 Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerde fiber boyunun kompozitin mekanik özelliklerine etkisi (Youtube, 2016)

Tablo 3.5 %60 elyaf oranına sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilenin mekanik özellikleri (Nuh kompozit, 2015)

Mekanik Özellik	Değer	Birim	Test Metodu
Yoğunluk	1,43	g/cm ³	ISO 1183
Çekme Dayanımı	125	MPa	ISO 527
Çekme Dayanımı Modülü	13800	MPa	ISO 527
Eğilme Dayanımı	215	MPa	ISO 178
Eğilme Dayanımı Modülü	11250	MPa	ISO 178
IZOD Darbe Dayanımı, Çentiksiz (11j)	50,5	kJ/m ²	ISO 180
IZOD Darbe Dayanımı, Çentikli (11j)	22,5	kJ/m ²	ISO 180
HDT (0,45 MPa)	158	°C	ISO 75B

BÖLÜM DÖRT

YÖNTEM

Kompozit üretim yöntemleri malzemelerin kullanılacakları yerlere ve iyileştirilmek istenen özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Bunun yanı sıra bu yöntemler kompozit malzemelerde kullanılan matris ve takviye malzemesinin cinsine ve takviye malzemesinin formuna göre sınırlanmaktadır. Kompozit malzemelerin üretiminde sıkça kullanılan yöntemlerden bazıları şu şekilde sıralanabilir: El yatırma yöntemi, püskürtme yöntemi, profil çekme, basınçla kalıplama, elyaf sarma, vakum infüzyon yöntemi vb. Bu çalışmada üretim yöntemi olarak sıcak presleme tercih edilmiştir. Üretilmiş numunelere ön gerilmeli ve ön gerilmesiz düşük hızlı darbe deneyleri uygulanmıştır.

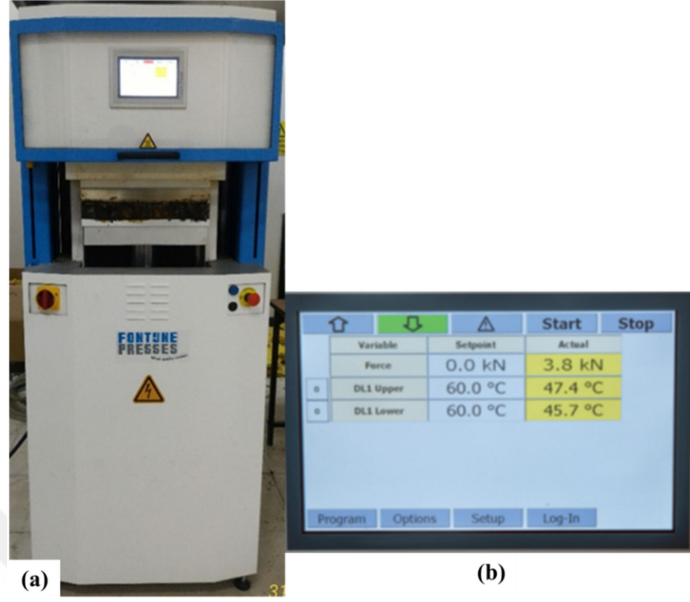
4.1 Kullanılan Cihazlar

Bu çalışmada kompozit numunelerin üretimi ve deney aşamalarında kullanılan cihazlar şu şekilde sıralanabilir:

- Sıcak pres
- Ön gerilme aparatı
- Darbe cihazı

4.1.1 Sıcak Pres

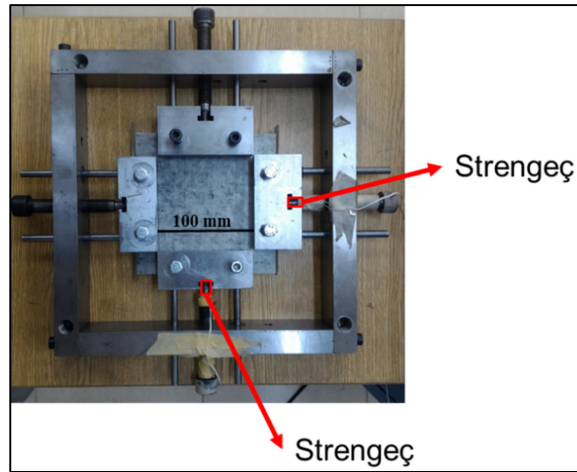
Çalışma kapsamındaki kompozit üretiminde sıcak pres ile üretim yöntemi tercih edilmiştir. Bu kapsamda kullanılan sıcak pres Fontijne markasının LabEcon 600 serisine ait bir prestir. Presin çeneleri 400x400 mm boyutlarındadır ve çenelerin arasındaki açıklık 200 mm mesafeye kadar artabilmektedir. Presin ulaşabileceği maksimum sıcaklık değeri 300°C'dir. Çenelerin uygulayabileceği en yüksek kuvvet değeri ise 600 kN'dur. Sıcak pres, numunenin üretildiği sıcaklığa (250°C) 12 dakikada gelmektedir. Bunların yanı sıra kullanılan sıcak pres PLC manuel kontrol sistemi ile kontrol edilmektedir. Üretim işleminde kullanılan sıcak pres ve manuel kontrol ekranı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 a) Çalışmada kullanılan sıcak pres ve b) Sıcak presin PLC manuel kontrol ekranı (Kişisel arşiv, 2018)

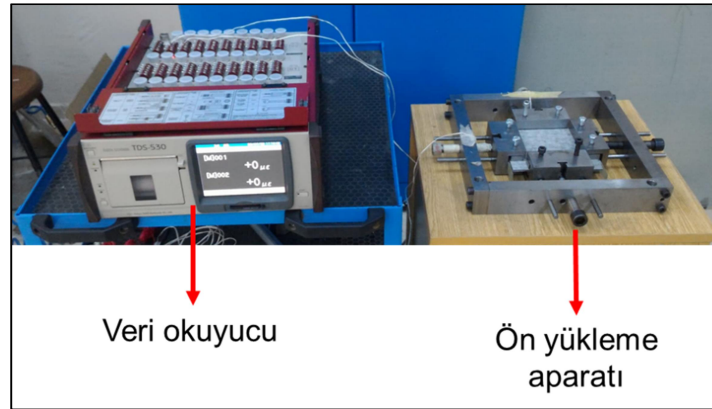
4.1.2 Ön Yükleme Aparatı

Çalışmada ilgilenilen asıl konu kompozit numunelerin düşük hızlı darbe davranışlarının ön yükleme ile değişimini incelemektir. Bu amaçla deneylerde kullanılacak darbe cihazına ve deney standartlarına uygun olacak şekilde bir ön yükleme aparatı tasarlanmış ve üretilmiştir. Üretilen bu aparat Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Çalışma kapsamında üretilen ve kullanılan ön yükleme aparatı (Kişisel arşiv, 2018)

Tasarlanan ön yükleme aparatı iki ekseninde kuvvet uygulanacak şekildedir. Aparatın numuneleri tutabilmesi ve kaydırmaması için çenelerin iç yüzeyleri enine ve boyuna izler olacak şekilde CNC’de işlenmiştir. Numunelere verilen ön yüklemelerin değeri aparatın mili üzerine takılan strengerler yardımı ile ölçülmektedir. Strengerlerin takıldığı veri okuyucu cihaz kullanılarak ön yüklemenin büyüklüğü belirlenmiştir. Deneylerde kullanılan veri okuyucu cihaz ve ön yükleme aparatı düzeneği Şekil 4.3’te verilmiştir. Strengerlerin yapıştırılmış oldukları milin çapı ve malzemesi (Elastisite modülü) bilindiği için uygulanan ön yükleme değeri kuvvet olarak belirtilebilir. Milin üzerindeki gerilme değeri, milin Elastisite modülü ve strengerler yardımı ile ölçülen birim şekil değiştirme değerlerinin çarpılması ile hesaplanmaktadır. Sonrasında gerilme değeri milin dairesel alanı ile çarpılarak ön yüklemenin kuvvet karşılığı hesaplanmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan ön yükleme aparatının milinin çapı ve Elastisite modülü sırasıyla 9,8 mm ve 200 GPa’dır. Buna göre, 250 μ ve 500 μ ’luk birim şekil değiştirmelerinin kuvvet olarak karşılıkları sırasıyla 98,2 kN ve 196,4 kN’dur.



Şekil 4.3 Ön yükleme deney düzeneği (Kişisel arşiv, 2018)

4.1.3 Darbe Cihazı

Araştırma kapsamında numunelere düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Bu amaçla Dokuz Eylül Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü’nde bulunan CEAST Fractovis Plus darbe cihazı kullanılmıştır. Cihaz ağırlık düşürme prensibi ile çalışmaktadır. Darbe deneyleri 1800 Joule enerji değerine kadar

gerçekleştirebilmektedir. Darbe deneyi sırasında sekme durumunun gözlenmesi halinde tekrarlı darbenin oluşmasını önleyen bir anti-rebound (geri sekme önleyici) sistemi bulunmaktadır. Darbe cihazı kapalı bir iklimlendirme kabinine sahiptir. Bu sayede darbe deneyleri sabit sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmektedir. İklimlendirme kabininin sıcaklığı -100°C ile 150°C arasında ayarlanabilmektedir.

Araştırmada kullanılan darbe ucu yarım küre şeklindedir. Vurucu uç 626 gr ağırlığa ve 12,7 mm çapına sahiptir. Vurucu uca bağlı kuvvet dönüştürücünün yük kapasitesi 22,4 kN'dur. Vurucu ucun bağlandığı veri okuyucu üzerinden temas kuvveti, yer değiştirme, enerji ve zaman değerleri istenilen sıklıkta alınabilmektedir. Çalışma kapsamında kullanılan düşük hızlı darbe cihazının resmi Şekil 4.4'te verilmiştir.

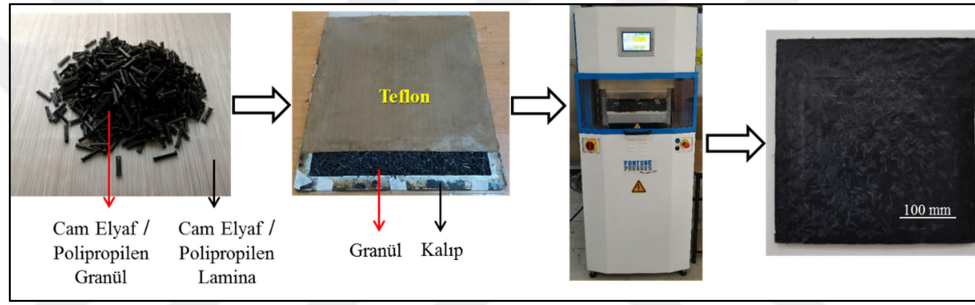


Şekil 4.4 a) Çalışmada kullanılan darbe cihazı ve b) ön yükleme aparatı (Kişisel arşiv, 2018)

4.2 Kompozit Üretimi

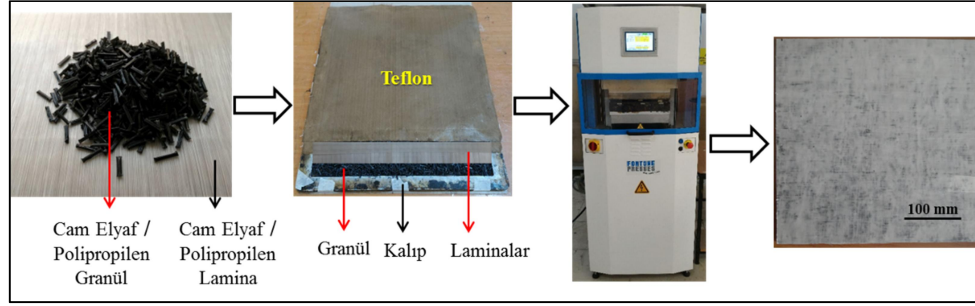
Çalışma kapsamında kullanılacak kompozitlerin belirlenmesi amacı ile bir ön çalışma yapılmıştır. Ön çalışmada iki farklı dizilime sahip uzun cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları iki farklı kalınlıkta (4 ve 6 mm) incelenmiştir.

İlk kompozit grubu sadece uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerinin sıcak presleme işlemi sonucu plaka formuna getirilmesi ile oluşturulmuştur. Bu amaçla granüllerin tedarikçi firmasından alınan öz kütle değerlerini göz önüne alarak 660 ve 990 gram granül tartılmıştır. Sonrasında sırası ile 4 ve 6 mm kalınlığındaki kalıplara homojen olarak yerleştirilmiştir. Kalıbın prese yapışmasını önlemek ve işlem sonucunda sıcak preseten kolay çıkarılmasını sağlamak amacı ile kalıbın alt ve üst yüzeyleri teflon ile kaplanmıştır. Son olarak kalıp sıcak presin çenelerinin arasına yerleştirilmiştir. Plaka üretimi için üretim sırası Şekil 4.5'te özetlenmiştir.



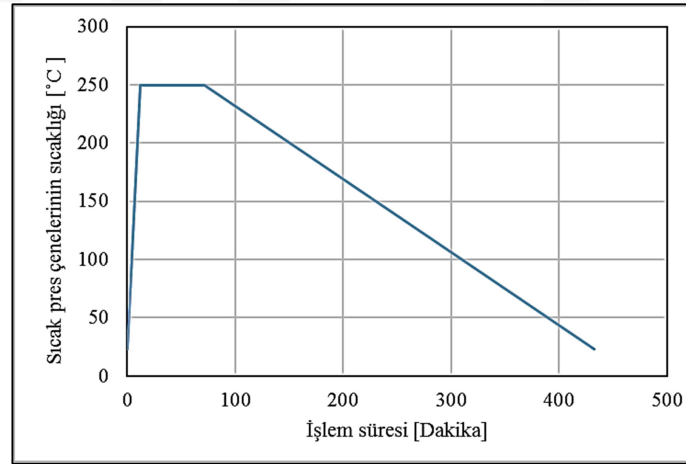
Şekil 4.5 Ön çalışmada kullanılacak ilk kompozit plaka üretiminin işlem sırası (Kişisel arşiv, 2017)

İkinci kompozit grubu ise tek eksenli cam elyaf takviyeli polipropilen laminalar ile uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerinin birlikte kullanılması ile üretilmiştir. İkinci kompozit grubunun üretiminde öncelikle prepreg laminalar sırası ile 0° ve 90° açılı dizilimlerinde kalıba yerleştirilmiştir. Sonrasında ilk kompozit grubu ile aynı ağırlıklardaki granüller laminaların üzerine homojen olarak yerleştirilmiştir. Son olarak laminaların bu yapı üzerine 90° ve 0°'de yerleştirilmesiyle sandviç kompozit yapı tamamlanmıştır. Yapılan cam elyaf takviyeli polipropilen sandviç kompozit oryantasyonu kısaca 0/90/Granül/90/0 şeklinde özetlenebilir. Bu işlemler sonrası kalıp, ilk kompozit grubu ile benzer şekilde, teflon ile kaplanmış ve sıcak prese yerleştirilmiştir. İkinci kompoziti üretmek için işlem sırası Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6 Ön çalışmada kullanılacak ikinci kompozit plaka üretiminin işlem sırası (Kişisel arşiv, 2017)

Üretim işlemlerinin tümünde yapılan sıcak presleme süreci sabit kalmıştır. Sıcak presleme işlemi sırasında kompozit yapılar öncelikle 250°C sıcaklıkta ve 100 kN yük altında 1 saat sıcak preslenmiştir. 1 saatlik presleme sonunda kompozit plakaların çarpılmaması amacıyla kompozit yapılar 100 kN’luk yük altında 6 saat soğumaya bırakılmıştır. Sıcak presleme işleminde sıcaklığın zaman ile değişimini gösteren grafik Şekil 4.7’de verilmiştir. 7 saat 12 dakika süren işlem sonucunda 350x350 mm ebatlarında 4 ve 6 mm kalınlığında kompozit plakalar kalıptan çıkartılmıştır.



Şekil 4.7 Sıcak presleme işlemi sırasında sıcaklığın zaman ile değişimi

Yapılan 1. aşama sonrası sadece uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller kullanarak üretilen kompozitlerin darbe dayanımlarının çok düşük olduğu görülmüştür. Bu nedenle deneylere sandviç kompozitler ile devam edilmesi gerektiğine karar verilmiştir. Yapılan literatür çalışmasında ön yüklemeli darbe deneylerinde kullanılan kompozitlerin 3 mm’den ince kompozitler olduğu görülmüştür.

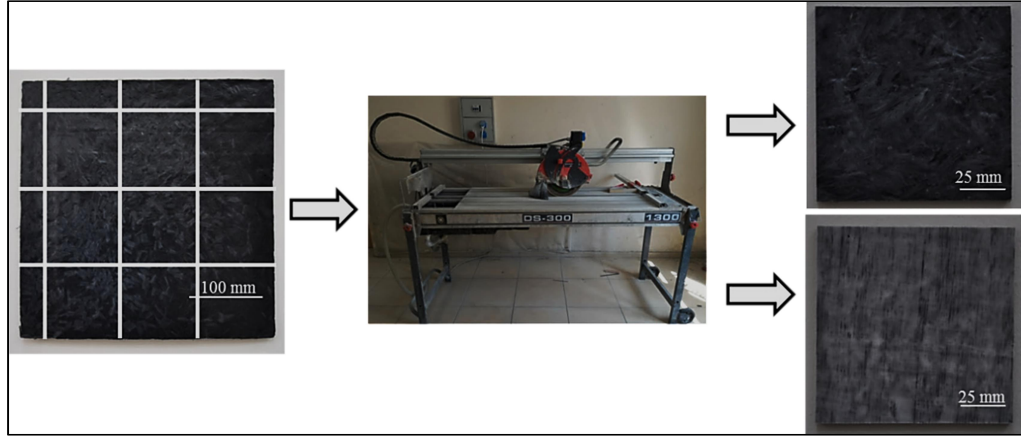
sebebi ile üretilecek yeni kompozitlerin kalınlıkları 2 ve 3 mm olarak belirlenmiştir. Ön gerilmeye maruz bırakılacak kompozitlere ön gerilmenin daha kolay verilebilmesi amacıyla ön gerilmeli darbe deneyleri 2 mm kalınlığa sahip sandviç numuneler ile yapılmıştır.

Üretilen 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin üretim şekilleri 4 ve 6 mm kalınlığındaki sandviç numuneler ile aynıdır. Bu numunelerde kullanılan granül ağırlığı sırası ile 180 ve 360 gramdır. 2 ve 3 mm kalınlığındaki sandviç kompozitlerin oryantasyonu 4 ve 6 mm kalınlığındaki numuneler ile benzer şekildedir (0/90/Granül/90/0). Bu kompozitlerdeki tek değişken çekirdek malzemesinin kalınlığıdır.

4.3 Deney Numunesi Hazırlama

Araştırma kapsamında yapılacak darbe deneyleri Ceast Fractovis Plus darbe cihazında yarı küresel darbe ucuna sahip vurucu uç ile ASTM 3763 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Araştırma kapsamında üretilen tüm kompozit plakalar 350x350 mm boyutlarında sıcak prestan çıkartılmıştır. Bu kompozitler sulu testere kullanılarak kesilmiştir. Ön yüklemeye maruz bırakılmayacak olan numuneler 100x100 mm boyutlarında kesilerek darbe deneyine uygun hale getirilmiştir. Ön yükleme altında darbe deneyi uygulanacak olan numuneler ise ön yükleme aparatının çenelerinin tutabilmesi için her kenardan 25 mm daha büyük kesilerek 150x150 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Ön yükleme numunelerinin darbeye maruz kalan bölgesi tutucu çenelerin arasında yer alan 100x100 mm boyutlarındaki alan olmuştur. Bu sayede ASTM D3763 deney standartları korunmuştur. Darbe numunelerinin hazırlanması için yapılan işlem sırası Şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8 Ön yüklemesiz numunelerin hazırlanması (Kişisel arşiv, 2017)

4.4 Darbe Deneyi

Kompozit malzemelerin uygulamada çeşitli sebeplerle darbeye maruz kalmaları kaçınılmaz bir durumdur. Cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin kullanım yerleri (araba kapısı, inşaat sektörü, mobilya sanayi, kano iskeleti) sebebi ile düşük hızlı darbeye maruz kalmaları beklenir. Bu nedenle çalışma kapsamında düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Ön çalışma sırasında üretilen numunelerin (4 ve 6 mm kalınlığına sahip) düşük hızlı darbe davranışlarını belirlemek için darbe deneyleri 30J, 50J, 70J ve 90J'lük enerji değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Darbe deneyleri ağırlık düşürme prensibi ile çalışan cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde kullanılan darbe ucunun aynı olması sebebi ile darbe ucunun ağırlığı değişmemiştir. Bu nedenlerle deneylerdeki değişken darbe ucunun hızı olmuştur. Ön çalışma sırasında kompozitlerin darbe tepkilerine sıcaklığın etkisini incelemek amacı ile darbe deneyleri 23°C (oda sıcaklığı) ve 50 °C sıcaklıklarında gerçekleştirilmiştir. Araştırmanın sonraki aşamalarında darbe deneyleri sadece 23°C'de (oda sıcaklığında) gerçekleştirilmiştir.

Araştırmanın ikinci aşaması olarak adlandırabileceğimiz 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin incelendiği aşamada ise ön çalışma sırasında belirlenmiş olan sayısal değerlerden yararlanılarak darbe deneylerini 10J, 20J, 25J, 30J ve 40J darbe

enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadaki deneylerin tamamı ön yüklemeye maruz bırakılmamış numunelere yapılmıştır.

Kompozitler, kullanım yerlerinde montaj hataları, montaj toleransları ve üretimlerindeki hatalar gibi çeşitli sebeplerle ön yüklemeye maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle araştırmanın üçüncü aşamasında 2 mm kalınlığına sahip numunelerin farklı ön yükleme durumları için darbe deneyleri 10J, 20J, 25J, 30J ve 40J darbe enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. İnceleme sırasında tek eksenli çeki (çeki-0), tek eksenli bası (bası-0) ve kayma (bası-çeki) yükleme durumları incelenmiştir. Tek eksenli çeki ve bası durumlarında yük verilen eksen, kompozitlerin üst yüzeyindeki laminanın takviye malzemesi ile aynı yönlüdür. Bu aşamada tek eksenli çeki deneylerinde birinci eksendeki yüklemelerin büyüklüğü +250 μ ve +500 μ , ikinci eksendeki yükleme ise 0 μ olarak belirlenmiştir. Tek eksenli bası deneylerinde ise birinci eksendeki yüklemelerin büyüklüğü -250 μ ve ikinci eksendeki yükleme ise 0 μ olarak belirlenmiştir. Bası yüklemeinde numunelerin -500 μ yüklemeye dayanamaması sebebi ile bu deneyler sadece -250 μ yüklemesi altında yapılmıştır. Kayma yüklemesi altındaki deneylerde ise birinci eksendeki yüklemelerin büyüklüğü +250 μ ve +500 μ ve ikinci eksendeki yükleme ise sırası ile -250 μ ve -500 μ olarak belirlenmiştir. Karşılıklı olarak x ve y eksenlerinde şiddetleri aynı yönleri farklı iki yüklemenin olması kompozit yapı içinde kayma yüklemesinin oluşabilmesine olanak sağlamıştır.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen tüm deneyler sonuçların sürekliliğini kontrol etmek amacı ile 3 kere tekrarlanmıştır. Çalışmanın ikinci ve üçüncü aşamasında gerçekleştirilen darbe deneyleri, tekrarlı darbe durumunun etkisini inceleyebilmek amacıyla numuneler delininceye kadar tekrarlanmıştır. Bu sayede ön yüklemenin tekrarlı darbe üzerine olan etkisi de incelenmiştir. Araştırma kapsamında gerçekleştirilen deneyler sonucunda enerji-zaman, temas kuvveti-deformasyon ve eş enerji grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler kullanılarak numunelerin maksimum temas kuvveti, maksimum çökme, maksimum temas süresi ve absorbe edilen enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca uygulanan darbe enerjisine bağlı olarak

numunelerin tekrar sayıları belirlenmiştir. İlgili sonuçlar bir sonraki bölümde tartışılmıştır.



BÖLÜM BEŞ

DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Kompozit malzemelerde aranacak özellikler kullanılacakları yerlere ve bu yerlerde maruz kalacakları yüklere göre değişiklik göstermektedir. Çalışma kapsamında incelenen malzemeler farklı formlarda cam elyaf takviyeli polipropilen ile üretilmiş kompozitlerdir. Bu kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları farklı yönlerden araştırılmıştır. Araştırmalarda kullanılan kompozitlerin türlerine ve darbe deneylerinde araştırılan durumlara göre çalışma üç ana bölümden oluşmaktadır.

Bu çalışma aşamaları şu şekildedir:

- Birinci aşama (ön çalışma)
- İkinci aşama (kalınlık etkisi)
- Üçüncü aşama (ön yükleme etkisi)

Ön çalışma kapsamında sonraki deneylerde kullanılacak olan kompozitlerin çeşidi belirlenmiştir. Sonrasında kompozitlerin ortam koşullarından hangi ölçüde etkilendiği araştırılarak ileriki aşamalarda yapılacak deneylerin ortam şartları belirlenmiştir. Ayrıca, ikinci aşamada sonraki aşamada incelenecek olan kompozitin kalınlığı belirlenmiştir. Üçüncü aşamada ise çalışmanın asıl konusu olan, kompozit plakaların düşük hızlı darbe davranışları çeşitli ön yüklemelerde incelenmiştir. Üçüncü aşamada, literatürde araştırmasına rastlanılmayan, ön yükleme altındaki kompozitlerin tekrarlı darbe davranışları ayrıca araştırılmıştır. Aynı şekilde, tekrarlı darbe davranışı çalışmanın ikinci aşamasında da yapılmıştır. Bu sayede ön yüklemeli ve yükleme-siz kompozitlerin tekrarlı darbe davranışları deneysel olarak araştırılmıştır.

5.1 Birinci Aşama

Araştırmanın bu aşamasında, sonraki deneylerde kullanılacak olan kompozitlerin belirlenmesi temel konu başlığı olmuştur. Bu amaçla farklı kalınlıklara sahip iki kompozit üretilmiş ve bu kompozitlerin darbe dayanımlarında gözlenen değişim oda

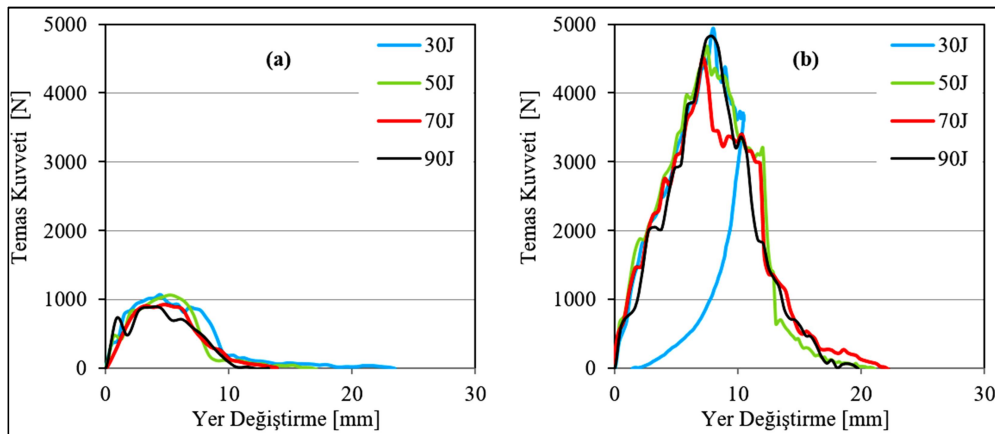
sıcaklığında ve 50°C sıcaklıklarında incelenmiştir. Bu bölümde, incelenen grafikler sırası ile temas kuvveti-yer değiştirme ve enerji-zaman grafikleridir. Bu grafiklerin yanı sıra hasarlı numuneler görsel olarak incelenmiştir (Özdemir ve Kandaş, 2018).

5.1.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme Grafikleri

Temas kuvveti - yer değiştirme grafiklerinde inceleme önceliği sıcaklık etkisine verilmiştir. Sonraki aşamada ise kalınlık etkisi araştırılmıştır.

5.1.1.1 Oda Sıcaklığında Gerçekleştirilen Deneyler

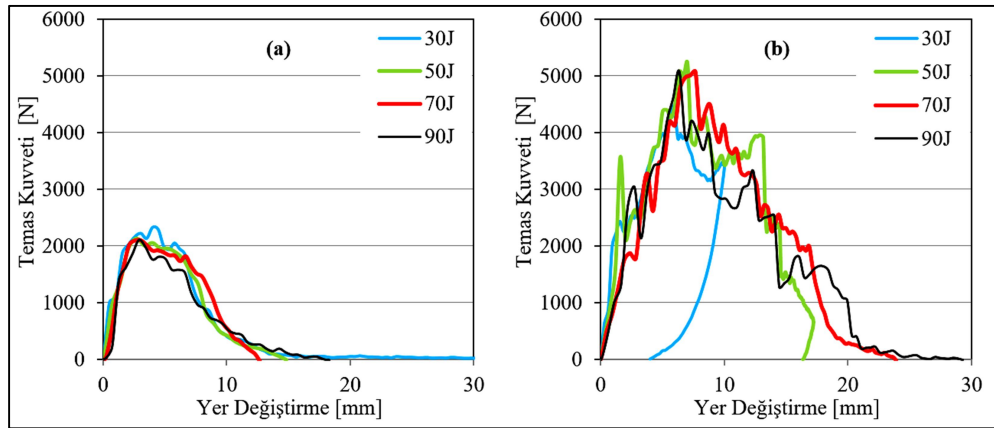
5.1.1.1.1 Kalınlığı 4 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları. Granülden üretilmiş kompozitlerde eğrinin alçalan kısmı incelendiğinde yer değiştirmede her hangi bir geri dönüş olmadığı görülmektedir. Bu durum vurucu ucun numunelerin hepsini delip geçtiğini göstermektedir. Granülden üretilmiş kompozitlerde artan darbe enerjisiyle birlikte maksimum temas kuvvetinde düşüş gözlemlenmiştir. Şekil 5.1-b grafiğinin 30J'lük enerji seviyesindeki eğrinin kapalı formda olduğu görülmektedir. Bu durum, vurucu ucun numuneden geri sektikğini göstermektedir. Ancak, enerji seviyesinin 50, 70 ve 90J'e artırılmasıyla birlikte bu numunelerde delinmenin meydana geldiği grafiğin alçalan kısmında görülmektedir.



Şekil 5.1 Oda sıcaklığında 4 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

Şekil 5.1 incelendiğinde granüllerin laminalar ile takviye edilmesi ile üretilen sandviç yapıların temas kuvvetleri tüm enerji seviyelerinde önemli oranlarda artmıştır. Sandviç kompozitlerin temas kuvvetinin önemli oranlarda artması sebebi laminaların sürekli cam elyaf takviyesine sahip olmasıdır. Bu durum granüllerdeki fiberler arasında bulunan mekanik boşlukların laminalar ile doldurulması olarak açıklanabilir. Lamina takviyesi ile kompozitlerin temas kuvvetinde yaklaşık %400 oranında bir artış meydana gelmiştir. Sandviç kompozitlerde görülen maksimum temas kuvveti 4952 N ile 30J'lük enerji seviyesindedir. Ayrıca, granülden üretilmiş kompozitlerin eğilme rijitlikleri (eğrinin maksimum temas kuvvetine kadar olan kısmının eğimi) 275,3 N/mm iken sandviç kompozitlerde bu değer 628,2 N/mm'dir.

5.1.1.1.2 Kalınlığı 6 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları. Şekil 5.2 a-b'de sırasıyla 6 mm kalınlığa sahip sadece polipropilen granüllerden üretilen kompozitlerin ve aynı kalınlıktaki sandviç kompozitlerin oda sıcaklığında (23°C) ve 30J, 50J, 70J ve 90J enerji seviyelerindeki temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri verilmiştir. Bu iki grafik incelendiğinde sandviç yapıdaki numunelerin darbe dayanımlarının, maksimum temas kuvveti düşünüldüğünde granülden üretilmiş kompozitlerden daha yüksek olduğu görülmektedir.



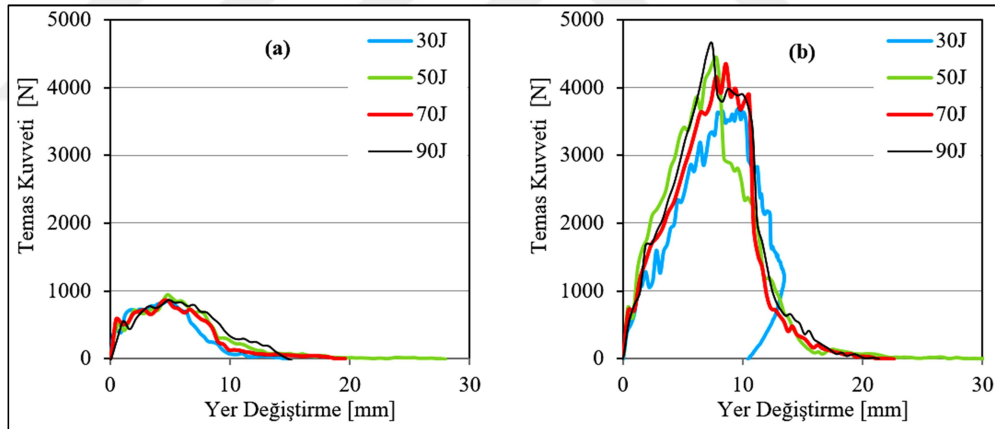
Şekil 5.2 Oda sıcaklığında 6 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

Numunelerin kalınlıklarının 4 mm'den 6 mm'ye çıkarılmasıyla beraber granülden üretilen ve sandviç yapıdaki kompozitlerin darbe dayanımları önemli oranlarda

artmıştır. Buradan, düşük hızlı darbe deneylerinde numune kalınlığının etkili bir parametre olduğu açıkça görülmektedir. Bu duruma hasar tipleri açısından bakarsak; 50J'lük enerji seviyesinde 4 mm kalınlığındaki sandviç numunelerde delinme meydana gelmişken kalınlığın 6mm'ye çıkartılmasıyla vurucu uç numuneye saplanmıştır.

5.1.1.2 50°C'de Gerçekleştirilen Deneyler

5.1.1.2.1 Kalınlığı 4 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları. Çalışmada kapsamında daha önce yapılmış olan 4 mm kalınlığa sahip sadece polipropilen granüllerden üretilen kompozitlerin ve aynı kalınlığa sahip sandviç kompozitlerin 30J, 50J, 70J ve 90J'lük enerjilerdeki darbe deneyleri 50°C'de tekrarlanmış ve temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri Şekil 5.3'de verilmiştir.

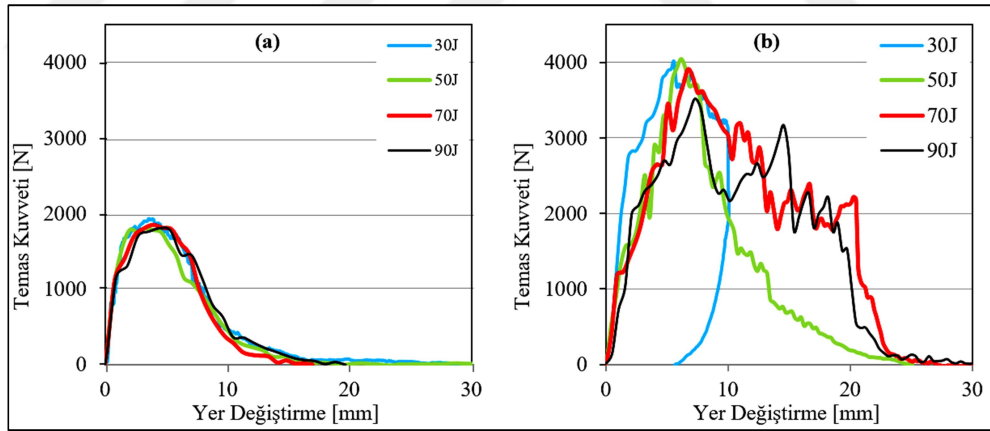


Şekil 5.3 50°C sıcaklıkta 4 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

Şekil 5.3-a'daki numuneler için alçalan kısmın şekline bağlı olarak tüm numunelerin delindiği görülmektedir. Granülden üretilmiş kompozitlerin tüm enerji seviyelerinde; sandviç kompozitlerin ise 30J dışındaki enerji seviyelerinde sıcaklığın 50°C'ye gelmesi ile maksimum temas kuvvetinde büyük bir değişiklik görülmemiştir. Ancak sıcaklık artışı ile sandviç kompozitlerin 30J darbe enerjisindeki maksimum temas kuvvetlerinde yaklaşık %27 oranında düşüş meydana gelmiştir. Maksimum temas kuvvetindeki düşüş sıcaklık artışının rijitliği

düşürmesiyle açıklanabilir. Yani daha sünek davranış gösteren numuneler vuruca uca karşı yeterli oranda direnç gösteremediği için temas kuvvetleri azalmıştır. Ayrıca, daha yüksek enerji seviyelerinde de sıcaklık artışı numunelerin rijitliğini düşürmesine rağmen numunelerde delinme meydana geldiği için sıcaklık artışı maksimum temas kuvvetini önemli ölçüde etkilememiştir.

5.1.1.2.2 Kalınlığı 6 mm Olan Kompozitlerin Sonuçları. 6 mm kalınlıktaki sadece polipropilen granüllerden üretilen kompozitlerin ve aynı kalınlığa sahip sandviç kompozitlerin 50°C'de 30J, 50J, 70J ve 90J'lük enerjilerde temas kuvveti-yer değiştirme grafikleri sırasıyla Şekil 5.4 a-b'de verilmiştir. Şekil 5.4'e bakıldığında sandviç yapıdaki kompozitlerin darbe dayanımlarının granülden oluşmuş kompozitlerden daha yüksek olduğu görülmektedir. Şekil 5.2-b ve Şekil 5.4-b birlikte düşünüldüğünde, sıcaklığın 6 mm kalınlığındaki numunelere olumsuz etkisi olduğu yani darbe dayanımlarını düşürdüğü gözlemlenmektedir.



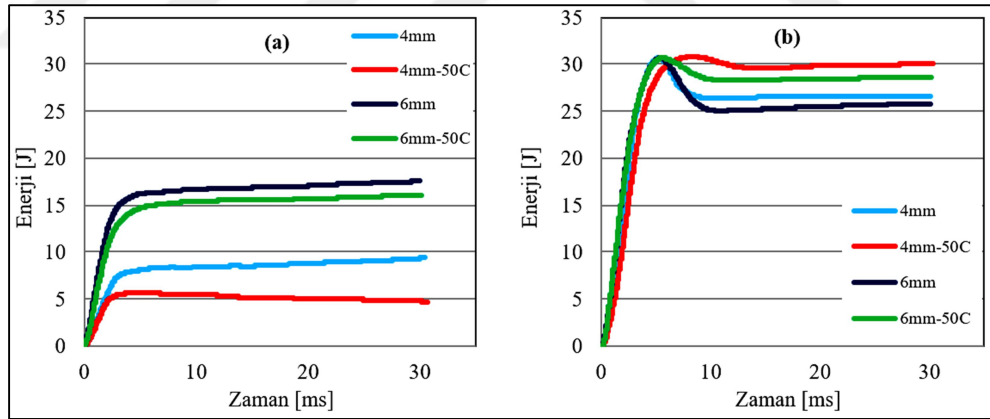
Şekil 5.4 50°C sıcaklıkta 6 mm kalınlığa sahip a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerinde, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

5.1.2 Enerji – Zaman Grafikleri

Enerji – zaman grafiklerinde inceleme sıralaması darbe enerjisinin seviyesine göre yapılmıştır. Grafiklerin çiziminde ise kompozit türüne göre gruplandırma yapılmıştır. Enerji – zaman grafiği uygulanan darbe enerjisi altında numunelerin ne kadar enerji absorbe ettiği hakkında bilgiler vermektedir.

5.1.2.1 30J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler

Şekil 5.5 a-b’de sırasıyla 30J’lük enerji seviyesinde, farklı kalınlıklara sahip olan ve farklı ortam sıcaklıklarına maruz bırakılan, sadece granülden üretilen kompozitlerin ve sandviç kompozitlerin enerji – zaman grafikleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde granülden üretilmiş kompozitlerde maksimum absorbe edilen enerjinin 18J olduğu ve 6mm kalınlığa sahip kompozitlerde meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu enerji seviyesinde granül ve sandviç yapıdaki kompozitlerin enerji – zaman grafikleri incelendiğinde sandviç yapı kompozitlerin farklı kalınlık ve ortam sıcaklıklarında granüllerden üretilen kompozitlerden daha fazla enerji absorbe ettiği gözlemlenmiştir. Şekil 5.5-b’de sandviç yapı kompozitlerde kalınlığın artmasıyla birlikte elastik enerjinin arttığı görülmektedir. Numune kalınlığının artmasının darbe dayanımına olumlu etki yaptığı bu sonuçtan görülmektedir.

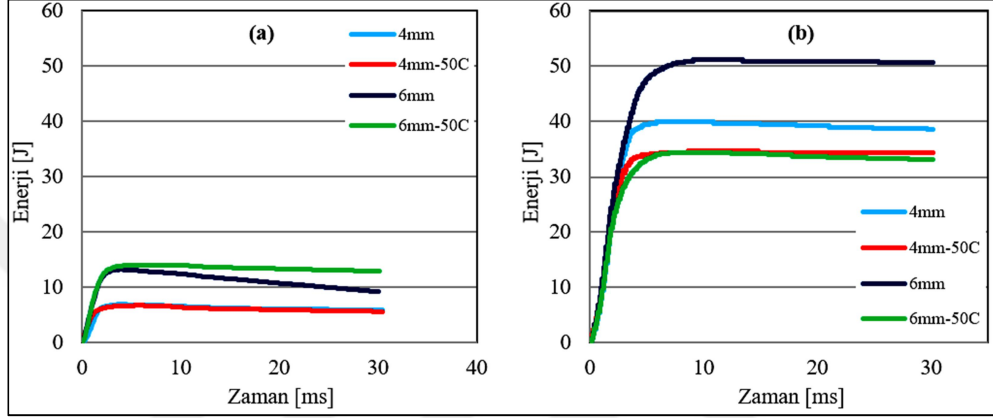


Şekil 5.5 30J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri

5.1.2.2 50J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler

50J’lük enerji seviyesinde farklı kalınlıklara sahip olan ve farklı ortam sıcaklıklarına maruz bırakılan, sadece granüllerden üretilen kompozitlerin ve sandviç kompozitlerin enerji – zaman grafikleri Şekil 5.6’da verilmiştir. Granülden üretilmiş kompozitlerin 50J enerji seviyesi altında absorbe ettiği enerji değerlerinin düştüğü

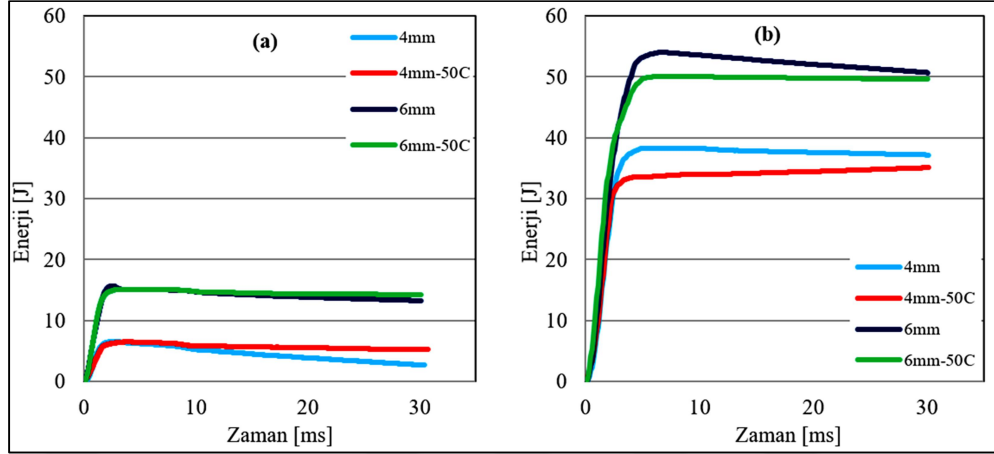
görülmektedir. Bu enerji seviyesinde 6 mm kalınlığa sahip sandviç kompozitin ise uygulanan enerji seviyesinin tamamını absorbe ettiği grafikte görülmektedir. Diğer bir deyişle dışarıdan uygulanan 50J'lük enerjin tamamı absorbe edilmiştir. Vurucu uç numunenin içinde saplanıp kalmıştır.



Şekil 5.6 50J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri

5.1.2.3 70J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler

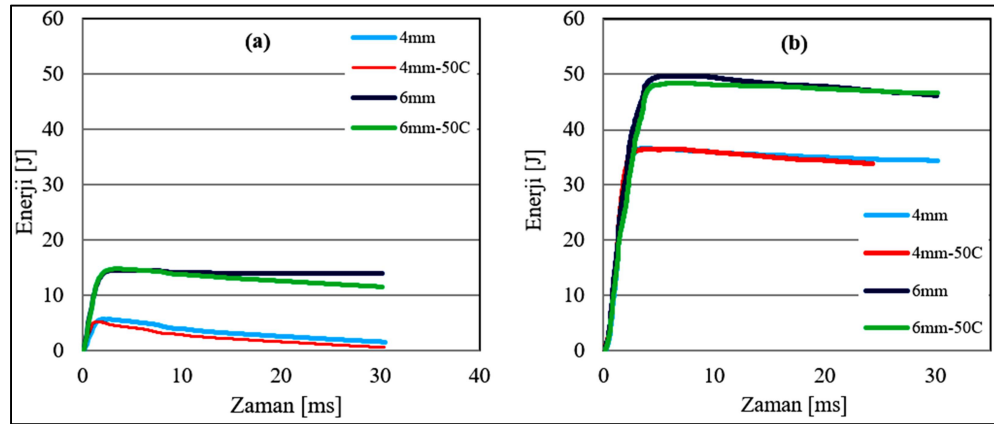
Şekil 5.7’de sırasıyla 70J’lük darbe deneyi yapılmış farklı kalınlıklara sahip olan ve farklı ortam sıcaklıklarına maruz bırakılan, kompozitlerin (sadece granüllerden üretilen ve sandviç türlerinde) enerji – zaman grafikleri gösterilmiştir. Sandviç kompozitlerin darbe davranışları incelendiğinde 6 mm kalınlığa sahip numunelerin 50°C’lik sıcaklık altında absorbe ettikleri enerjinin 50,1J olduğu ve bu değerin oda sıcaklığındaki absorbe edilen enerji değerinden (54J) düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.7 70J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri

5.1.2.3 90J Enerji Seviyesinde Gerçekleştirilen Deneyler

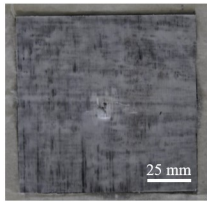
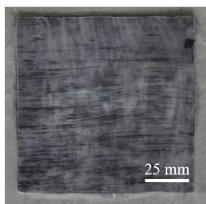
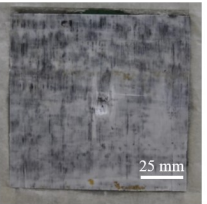
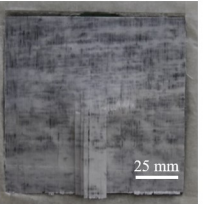
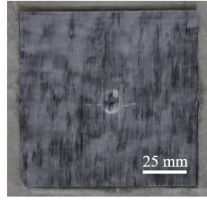
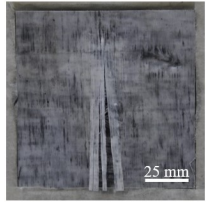
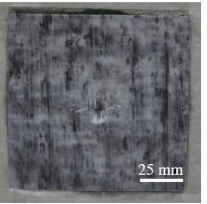
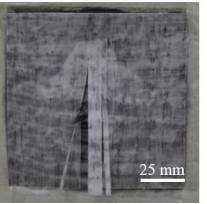
90J'lük darbe enerjisinde farklı kalınlıklara sahip olan ve farklı ortam sıcaklıklarındaki, sadece granüllerden üretilen kompozitlerin ve sandviç kompozitlerin enerji – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.8 a-b'de verilmiştir. Her iki farklı dizilime sahip kompozitinde darbe tepkileri incelendiğinde absorbe edilen enerji miktarlarının uygulanan darbe enerjilerinden önemli oranlarda düşük olduğu görülmüştür. Bu durumunun sadece granülden üretilmiş kompozitlerde kendini önemli derecede gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 5.8. 90J enerji seviyesinde a) Sadece granülden oluşmuş ve b) sandviç kompozitlerin farklı kalınlık ve sıcaklıklar için enerji – zaman grafikleri

5.1.3 Hasarlı Numunelerin İncelemesi

Çalışmanın bu bölümünde darbe sonrası numunelerdeki hasar yüzeyleri görsel muayene ile incelenmiştir. Bu amaçla Şekil 5.9'da iki önemli enerji değeri olan 30J ve 90J'lük enerjilerinde darbeye maruz kalmış numunelerin 4 mm kalınlığa sahip sandviç kompozitlerin üst ve alt yüzyelerinin dijital resimleri verilmiştir. Oda sıcaklığında 30J'lük enerji seviyesinde vurucu uca yakın olan üst yüzeyde hasar meydana gelirken alt yüzeyde herhangi bir hasar görülmemiştir. Darbe enerjisinin 90J'e çıkartılmasıyla birlikte oda sıcaklığında üst ve alt yüzyelerde hasar meydana gelmiştir. Her iki darbe enerjisinde üst yüzeyde fiber kırılması ve matris kırılması meydana gelirken 90J'de alt yüzeyde delinme meydana gelmiştir. Sandviç yapıyı oluşturan laminaların darbe dayanımı granüllerden yüksek olduğu için delinme ile birlikte tabakalar arası ayrılmalar da gözlemlenmiştir. Sıcaklığın 50°C olduğu darbe numunelerindeki hasar yüzeyleri incelendiğinde benzer şekilde üst yüzeyde fiber ve matris hasarları gözlemlenmiştir. Fakat sıcaklık artışı numunelerin rijitliklerini düşürdüğü için 30J'de alt yüzeyde bulunan laminalarda da delaminasyonlar meydana gelmiştir.

	Oda Sıcaklığı		50°C	
4 mm	Üst Yüzey	Alt Yüzey	Üst Yüzey	Alt Yüzey
30J				
90J				

Şekil 5.9 4 mm kalınlığa sahip sandviç kompozitlerin 30J ve 90J'de darbe sonrası hasar şekilleri (Kişisel arşiv, 2017)

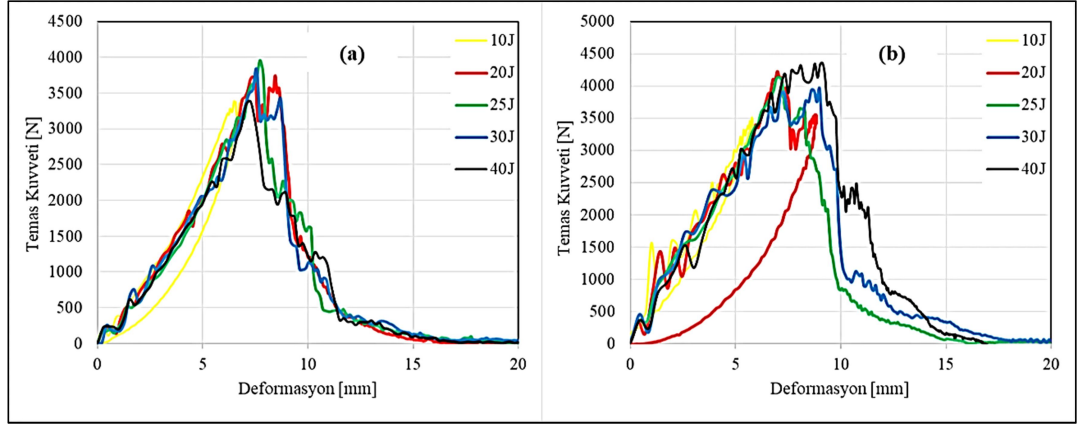
5.2 İkinci Aşama

Çalışmanın ikinci aşamasında amaçlanan sonraki aşamada kullanılacak olan kompozitin kalınlığının belirlenmesi üzerine incelemeler yapılmıştır. Bu aşamada sadece sandviç kompozitler kullanılmıştır. Bu aşamadaki kompozitlerin kalınlıkları 2 ve 3 mm'dir. Çalışmanın bu safhasında ön çalışma (birinci aşama) sırasında belirlenmiş olan sayısal değerlerden yararlanılarak darbe deneylerinin 10J, 20J, 25J, 30J ve 40J darbe enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. Bu aşamadaki deneylerde numunelere herhangi bir ön yükleme verilmeden deneyler sadece oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

Bu safhada temas kuvveti - yer değiştirme ve enerji - zaman grafiklerinin yanında numunelerin maksimum temas kuvveti, maksimum yer değiştirme ve absorbe edilen enerji değerleri farklı enerji düzeyleri için araştırılmıştır. Bu grafiklerin yanı sıra hasarlı numuneler görsel olarak incelenmiştir.

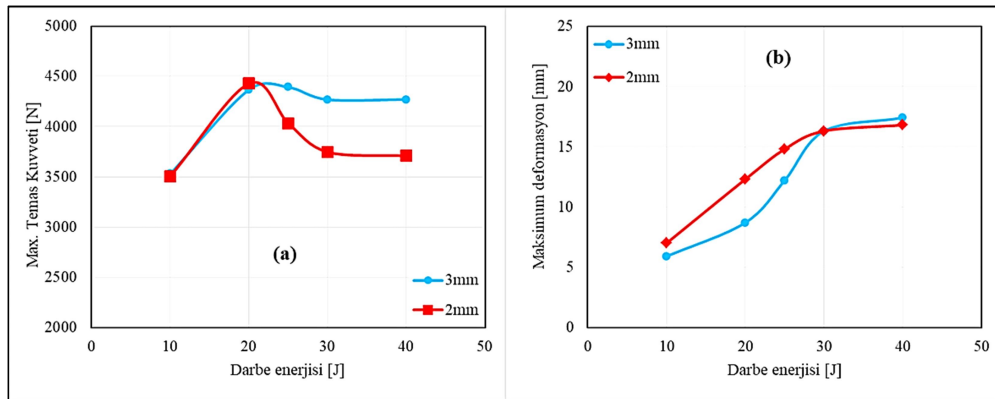
5.2.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme

Kalınlıkları 2 ve 3 mm olan sandviç kompozitlerin 10J, 20J, 25J, 30J ve 40J'lük düşük hızlı darbe enerjilerindeki temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri Şekil 5.10'da verilmiştir. Grafiklerde eğrilerin alçalan bölgeleri incelendiğinde 2 mm kalınlığa sahip numunelerde 20J, 25J, 30J ve 40J, 3 mm kalınlığa sahip numunelerde ise 25J, 30J ve 40J'lük enerji değerlerinde delinme olduğu görülmektedir. 2 mm'lik numunelerde 10J, 3 mm'lik numunelerde ise 10J ve 20J enerji değerlerinde eğride geri dönüş olmuştur. Yani geri sekme durumu görülmektedir. 20J ve 25J'lük darbe enerjilerinin sırasıyla 2 ve 3 mm kalınlığındaki numuneler için delinme olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.10 a) 2 mm kalınlığındaki ve b) 3 mm kalınlığındaki kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

Kompozit numunelerin darbe davranışlarını daha iyi yorumlayabilmek amacıyla numunelerin ortalama maksimum temas kuvvetleri ve ortalama maksimum yer değiştirme değerlerinin grafikleri Şekil 5.11’de verilmiştir. Şekil 5.11-a incelendiğinde 2 mm ve 3 mm’lik numunelerin sırasıyla delinme enerjileri olan 20J ve 25J değerlerinden sonra maksimum temas kuvvetlerinde düşüş görülmektedir. Ancak maksimum temas kuvvetleri yükselen enerji değerleri 2 mm kalınlığa sahip numuneler için 3720 N ve 3 mm kalınlığa sahip numuneler için ise 4350 N olarak stabil hale gelmektedir. Delinme değerlerine kadar ise maksimum temas kuvvetleri tüm kalınlıklar için artmaktadır.

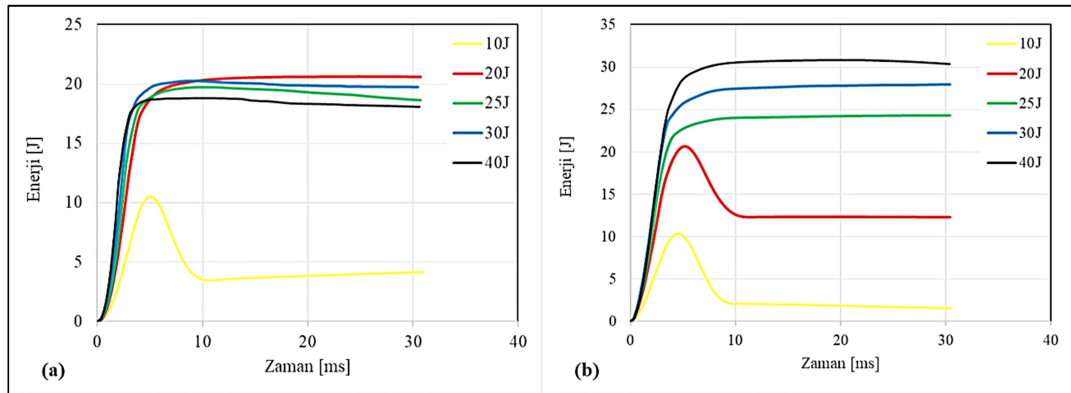


Şekil 5.11 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin b) maksimum yer değiştirmelerinin; darbe enerjisi ile değişim grafikleri

Şekil 5.11-b incelendiğinde ise iki kalınlıkta da maksimum temas kuvvetinin sabitleştiği 30J ve 40J değerlerinde maksimum yer değiştirmenin de sabit bir değere yakınsamaya başladığı görülmektedir. 30J ve 40J değerlerine kadar 3 mm kalınlığa sahip numunelerin maksimum yer değiştirmeleri 2 mm kalınlığa sahip numunelerden daha düşük değerlerdedir. Bu durumun nedeni 3 mm kalınlığındaki numunelerin daha rijit olmasından kaynaklanmaktadır.

5.2.2 Enerji – Zaman

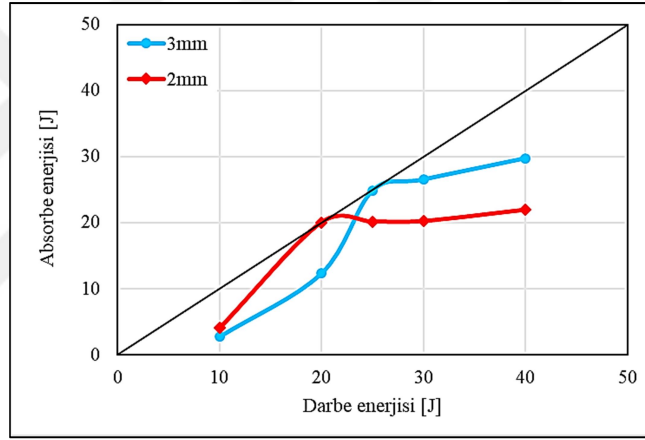
Düşük hızlı darbe deneyleri 10J, 20J, 25J, 30J ve 40J enerjilerinde yapılmış olan 2 ve 3 mm kalınlığındaki kompozitlerin kalınlıklarına göre çizilmiş olan enerji – zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5.12-a ve Şekil 5.12-b’de verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde 2 mm kalınlığa sahip numunelerde 10J enerjisinde, 3 mm kalınlığa sahip numunelerde ise 10J ve 20J enerjilerinde geri sekme olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisinin artışı ile grafiklerin yatay bölgelerinin (absorbe edilen enerji değerleri) belli enerji aralıklarında yoğunlaşmaya başladıkları gözlenmiştir. Absorbe edilen enerjinin darbe enerjisi ile değişimini daha iyi inceleyebilmek amacıyla kompozitlerin eş enerji grafikleri (absorbe edilen enerji – darbe enerjisi) çizilmiştir. Çizilen bu grafik Şekil 5.13’te verilmiştir.



Şekil 5.12 a) 2 mm kalınlığındaki ve b) 3 mm kalınlığındaki kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri

Eş enerji grafikleri kompozitlerin darbe altında enerji absorbe edebilme kabiliyetleri konusunda fikir veren önemli bir grafikdir. Numunelerin enerji

sönümlleme kabiliyetleri konusunda daha doğru değerlendirmeler yapmak amacı ile eş enerji çizgisi grafiğe eklenmiştir. Şekil 5.13 incelendiğinde kompozitlerin delinme enerjilerinin sınırları daha net görülmektedir. İki numunede de delinme enerjisine kadar absorbe edilen enerji değeri artmıştır. Delinme sonarında ise çizgiler yatay forma dönüşmeye başlamıştır. Bunun dışında delinme öncesinde 3 mm kalınlığındaki numunelerin absorbe edilen enerji değerleri daha düşüktür. Delinme sonrasında ise 3 mm kalınlığındaki numunelerin absorbe ettikleri enerji değeri 2 mm kalınlığındaki numunelerin üzerine çıkmaktadır. Bu durum kalınlık artışı ile kompozitlerin darbe sönümlleme kabiliyetlerinin artması ile açıklanabilir.



Şekil 5.13 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri

5.3 Üçüncü Aşama

Kompozitlerin kullanımları sırasında çeşitli sebeplerle ön yüklemeye (gerilmeye) maruz kaldıkları bilinen bir gerçektir. Çalışmanın bu aşamasında bu gerçekten yola çıkarak çeşitli ön yükleme durumlarındaki (çeki, bası ve kayma) 2 mm kalınlığındaki sandviç kompozitlerin darbe dayanımları incelenmiştir. Bu aşamada incelenen ön yüklemeli darbe enerjileri 10J, 20J, 30J ve 40J'dür. Bu enerji değerleri ikinci aşama sırasında belirlenmiştir. Çalışmanın bu aşamasında ön yükleme durumunun kompozitlerin tekrarlı darbe davranışlarına olan etkisini incelemek amacıyla darbe deneyleri delinme meydana gelinceye kadar tekrarlanmıştır. Ayrıca ön yüklemenin tekrarlı darbeye etkisini incelemek amacı ile araştırmanın ikinci aşamasında yapılmış olan deneylerde tekrarlı darbe durumu için tekrarlanmıştır.

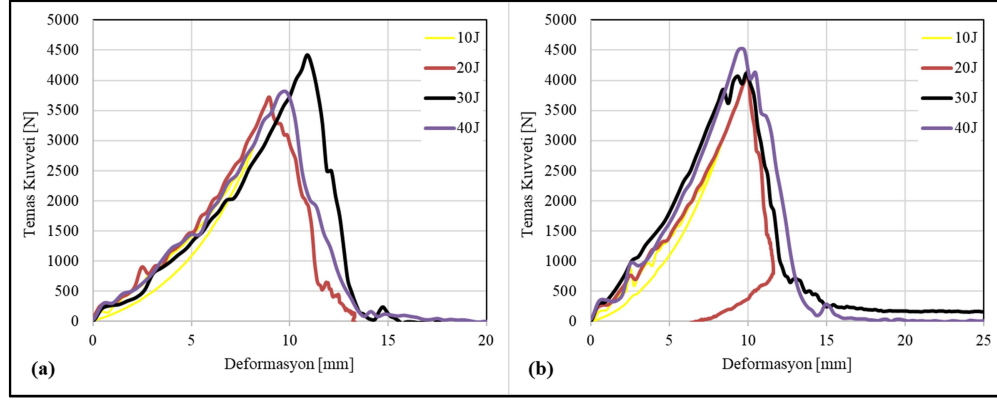
5.3.1 Çeki Durumu

Çalışma sırasında kullanılan ön yükleme aparatının 2 mm kalınlığa sahip numunelere verilmesi gereken ön yükleme değeri dışında bir hasar vermemesi amacıyla numuneler ön yükleme aparatının çeneleri ile kaydırma meydana gelmeyecek şekilde sıkılmıştır. Çeki durumu için ön gerilme değeri +500 μ olarak belirlenmiştir. Ayrıca ön yüklemenin etkisini incelemek amacıyla ikinci bir ön yükleme değeri olan +250 μ 'luk çeki değeri altında düşük hızlı darbe deneyleri gerçekleştirilmiştir.

5.3.1.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme

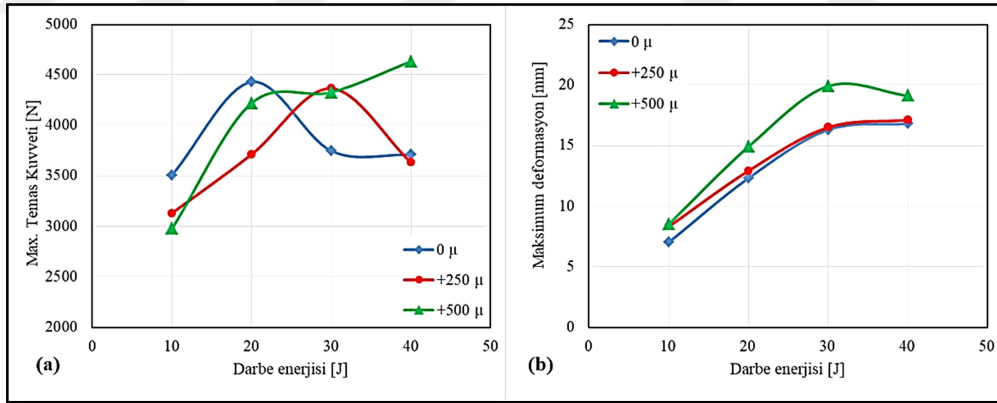
Ön yükleme değerleri +250 μ ve +500 μ olan 2 mm kalınlığındaki sandviç kompozitlerin 10J, 20J, 30J ve 40J darbe enerjilerinde temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Grafiklerin alçalan bölgeleri incelendiğinde numunelerin 30J ve 40J enerjilerinde tüm ön gerilme değerlerinde delindiği, 10J'de ise geri sekme olduğu görülmektedir. Ancak 20J enerji değerinde 250 μ ön gerilme değerinde saplanma meydana gelirken 500 μ değerinde geri sekme görülmektedir. Grafikler ikinci aşamada incelenmiş olan 2 mm kalınlığındaki numunelerin darbe grafikleri ile karşılaştırıldığında delinme enerjisinde önemli bir değişimin olmadığı görülmektedir. Ancak bu üç durum (0 μ , +250 μ , +500 μ) karşılaştırıldığında çeki yükünün artışı ile kompozitlerin daha sünek bir duruma geçtiği anlaşılmaktadır.

Şekil 5.15-a incelendiğinde 250 μ 'luk ön yüklemede delinme sonrası (30J) maksimum temas kuvvetinde ciddi bir düşüş görülmüştür. Ayrıca, çeki yükünün 250 ve 500 μ olarak uygulanması ile maksimum temas kuvvetinde 30J enerji değerinde önemli bir değişiklik görülmemiştir. 40J altında ise maksimum temas kuvveti 500 μ 'da elde edilmiştir.



Şekil 5.14 a) +250 μ ve b) +500 μ ön yüklemesi altındaki sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

Şekil 5.15-b'ye bakıldığında ön yüklenmemiş ve ön yüklenmiş numunenin maksimum deformasyon değerinin 30J'den sonra değişmediği görülmüştür. Bunun yanı sıra, ön yüklemenin artmasıyla delinme öncesi ve sonrası maksimum yer değiştirme değerleri tüm ön yükleme değerleri için artmaktadır.

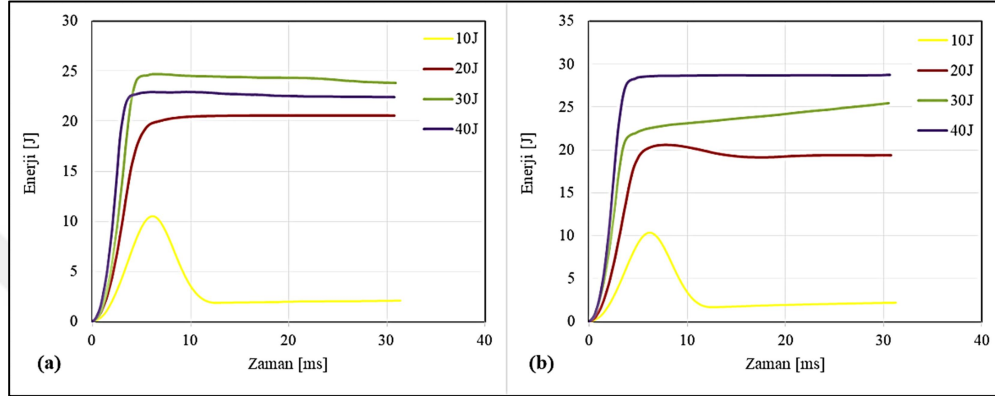


Şekil 5.15 0 μ , +250 μ ve +500 μ ön yüklerine maruz numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin ve b) maksimum yer değiştirmelerinin darbe enerjisi ile değişim grafikleri

5.3.1.2 Enerji – Zaman

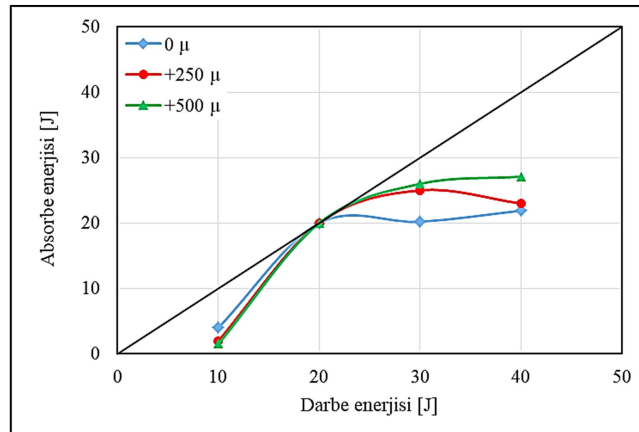
Çeki yönünde +250 μ ve +500 μ değerinde ön yüklemeye maruz bırakılmış 2 mm kalınlığındaki kompozitlerin 10J, 20J, 30J ve 40J enerjilerinde yapılmış olan darbe deneylerinin enerji – zaman grafikleri Şekil 5.16'da verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde ön yüklenmiş numunelerde 10J'lük darbe enerjisi altında geri sekme

durumunun gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca, darbe enerjisinin 30J'den 40J'e çıkarılmasıyla +250 μ değerinde ön yüklenmiş numunelerde absorbe edilen enerjinin azaldığı gözlemlenmiştir. +500 μ değerinde ön yüklenmiş numunelerde ise darbe enerjisinin artışıyla absorbe edilen enerji değeri artmıştır.



Şekil 5.16 a) +250 μ ön yüklerine ve b) +500 μ ön yüklerine maruz kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri

Ön yüklemenin absorbe edilen enerjiye etkisinin daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla kompozitlerin eş enerji grafikleri (absorbe edilen enerji – darbe enerjisi) çizilmiştir. Çizilen bu grafik Şekil 5.17'de verilmiştir. Burada ön yüklemenin artışıyla delinme sonrası absorbe edilen enerji değerinin ciddi şekilde artırdığı net olarak görülebilmektedir. Ayrıca, ön yüklemenin değerinin artışı numunelerin delinme enerjilerini ciddi bir şekilde değiştirmemiştir.



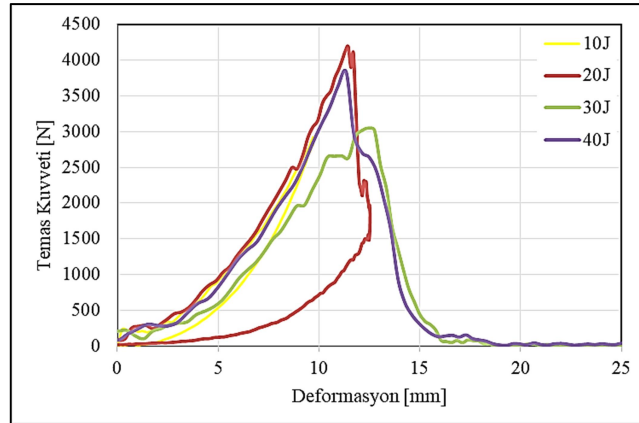
Şekil 5.17 0 μ , +250 μ ve +500 μ ön yüklerine maruz numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri

5.3.2 Bası Durumu

Çalışmanın bu safhasında 250 μ bası ön yüklemesi numunelere uygulanmıştır. Numuneler 500 μ bası yüküne maruz kaldıklarında şekilsel bütünlüklerini koruyamamışlardır. Bu yükleme durumunda numunelerde burkulma meydana gelmiştir. Bu sebeple bası yönünde 500 μ değerindeki ön yükleme çalışma kapsamında kullanılmamıştır.

5.3.2.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme

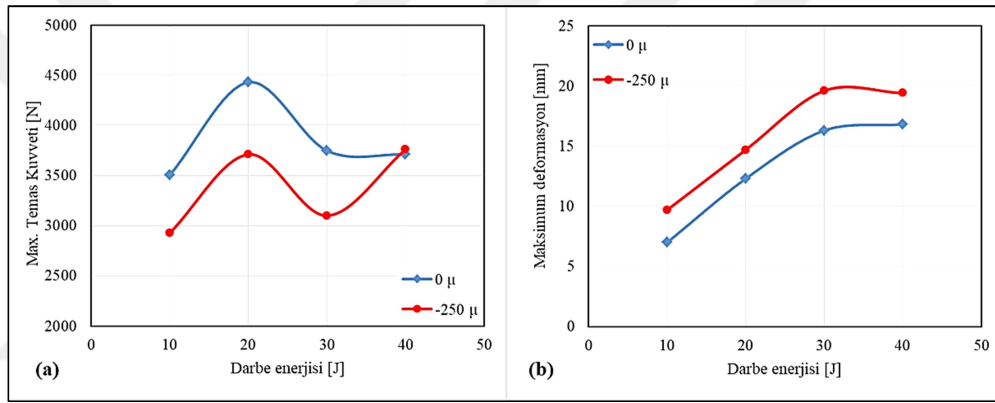
Ön yükleme değerleri -250 μ olan 2 m kalınlığındaki sandviç kompozitlerin 10J, 20J, 30J ve 40J darbe enerjilerinde temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri Şekil 5.18’de verilmiştir. Eğrilerin alçalan bölgeleri incelendiğinde numunelerin 30J ve 40J enerjilerinde delindiği, 10J ve 20J’de ise darbe ucunun numuneler üzerinden geri sektiği görülmektedir. Bu grafikler ikinci aşamada incelenmiş olan 2 mm kalınlığındaki numunelerin darbe grafikleri ile karşılaştırıldığında delinme enerjisinin 20J’ün üzerine çıktığı görülmektedir.



Şekil 5.18 -250 μ ön yükleme altındaki sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

Şekil 5.18’de verilmiş olan verileri daha iyi yorumlayabilmek amacıyla bası ön yüklemesine maruz ve ön yüklenmemiş kompozitlerin maksimum temas kuvvetleri ve maksimum yer değiştirme değerlerinin darbe enerjisine bağlı grafikleri Şekil

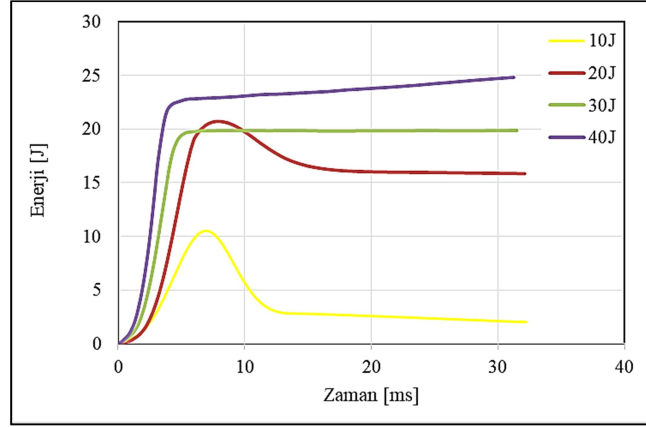
5.19’da verilmiştir. Şekil 5.19-a incelendiğinde maksimum temas kuvvetinin, bası ön yüklemesi ile ciddi olarak düştüğü, ancak darbe enerjisinin artışı (40J) ile ön yüklenmemiş numuneler ile aynı seviyeye yükseldiği görülmüştür. Şekil 5.19-b incelendiğinde ise bası ön yüklemesinin çeki yönündeki ön yükleme ile benzer olarak maksimum yer değiştirme değerinin ön yüklenmemiş numunelerden daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı şekilde ön yüklenmemiş numunenin maksimum deformasyon değerinin sabitleştiği 30J ve 40J değerlerinde bası ön yüklemesine sahip numunelerin maksimum deformasyon değerleri de sabitleşmiştir.



Şekil 5.19 0 μ ve -250 μ ön yüklerine maruz numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin b) maksimum yer değiştirmelerinin darbe enerjisi ile değişim grafikleri

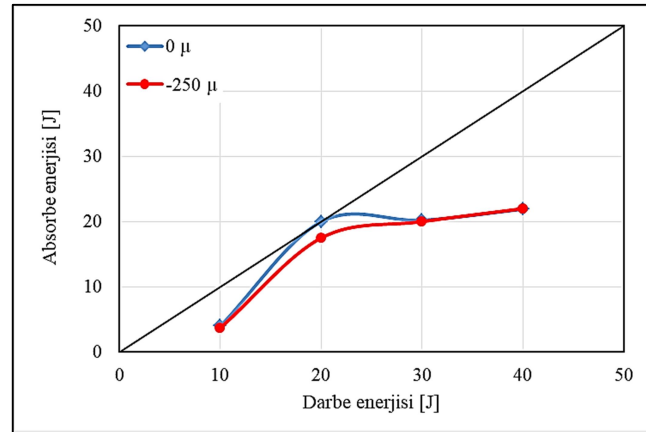
5.3.2.2 Enerji – Zaman

Şekil 5.20’de -250 μ değerinde bası ön yüklemeye maruz bırakılmış 2 mm kalınlığındaki kompozitlerin 10J, 20J, 30J ve 40J enerjilerinde yapılmış olan darbe deneylerinin enerji – zaman grafikleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde ön yüklenmiş numunelerde 10J ve 20J enerjilerinde geri sekme olduğu görülmektedir. Ayrıca darbe enerjisini 20J değerinin üzerine çıktığında enerji eğrileri yatay olarak devam etmiştir. Bu durum 30J ve 40J’lük darbe enerjilerinde numunelerin sırasıyla 20J ve 23J enerji absorbe ettiğini göstermektedir.



Şekil 5.20 -250 μ ön yüklerine maruz kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri

Bası yönündeki ön yüklemenin absorbe edilen enerjiye etkisinin gözlemleyebilmek amacıyla çizilen eş enerji grafiği Şekil 5.21'de verilmiştir. Şekil 5.21'deki eğrilere bakıldığında bası ön yüklemesinin numnelerin enerji absorbe edebilme kabiliyetine önemli oranda etkisi olmadığı anlaşılmaktadır. Şekil 5.21'de verilen eğrilere ön yüklenmemiş numunenin eğrisi tüm enerji değerlerinde -250 μ değerinde ön yüklenmiş numunenin değerlerinin üzerindedir. Bası yükünün numunelerin enerji absorbe etme kabiliyetini düşürdüğü anlaşılmaktadır.



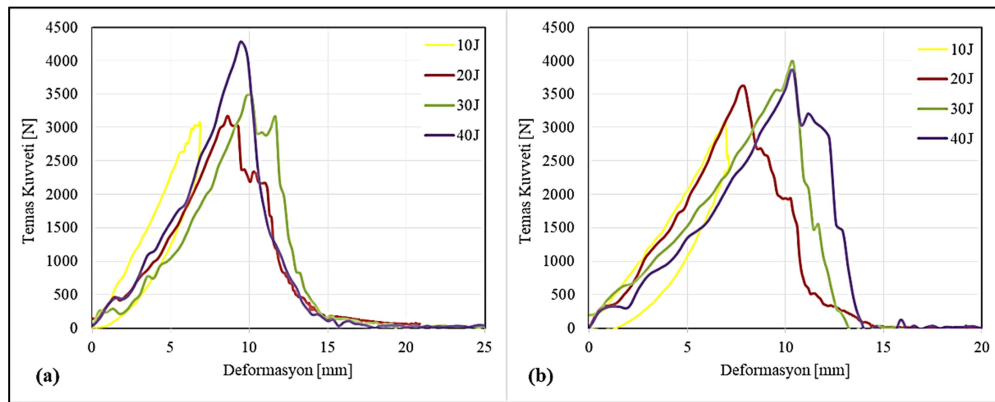
Şekil 5.21 0 μ ve -250 μ ön yüklerine maruz numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri

5.3.3 Kayma Durumu

Çalışmada tek eksenli çeki ve bası ön yüklemesi dışında kayma durumu da incelenmiştir. Bu durum aynı şiddetteki yüklerin bir eksenenden pozitif değerinden negatif yönde etki etmesi ile oluşturulmuştur. Yani bu yükleme türü iki eksenli bir yüklemedir. Çalışmada bu yöntem ile numunelere 250 μ ve 500 μ yükleri uygulanmıştır. Sonrasında bu numunelere 10J, 20J, 30J ve 40J enerjilerinde düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır.

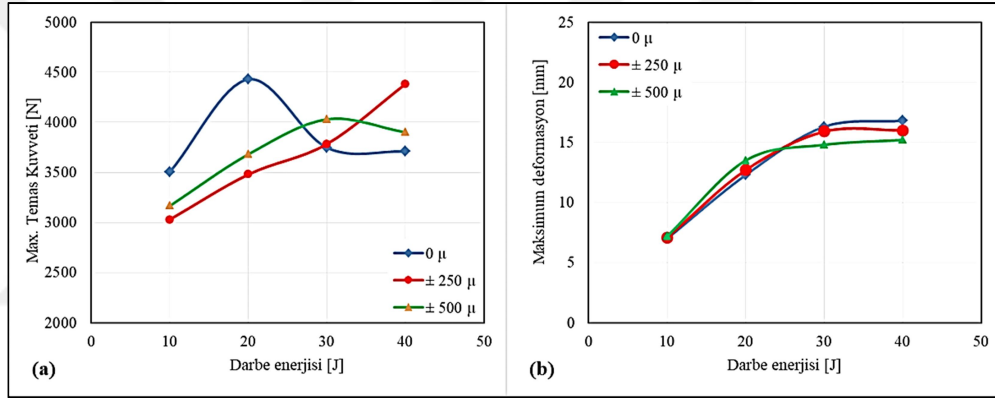
5.3.3.1 Temas Kuvveti – Yer Değiştirme

Ön yükleme büyüklükleri $\pm 250 \mu$ ve $\pm 500 \mu$ olan 2 m kalınlığındaki sandviç kompozitlerin 10J, 20J, 30J ve 40J darbe enerjilerinde temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri Şekil 5.22’de verilmiştir. Grafiklerin alçalan bölgeleri incelendiğinde tüm kayma ön yüklemesi değerlerinde numunelerin 20J, 30J ve 40J enerjilerinde delindiği, 10J’de ise darbe ucunun numuneler üzerinden geri sektiği görülmektedir. 20J değeri ön yüklenmemiş numuneler ile karşılaştırıldığında benzer olarak bu enerjinin delinme sınırı olduğu görülmüştür. Aynı şekilde, 500 μ kayma yükü altındaki numunelerin grafikleri incelendiğinde ise 10J haricinde tüm numunelerde delinme gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.22 a) $\pm 250 \mu$, b) $\pm 500 \mu$ kayma ön yüklemesi altındaki sandviç kompozitlerin farklı enerji seviyelerindeki, temas kuvveti – yer değiştirme grafikleri

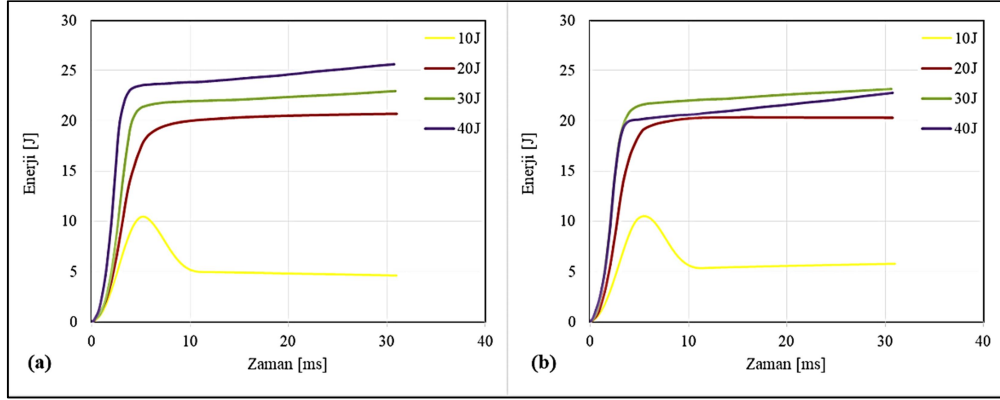
Bu ön gerilme durumunda sonuçları daha iyi yorumlayabilmek amacı ile maksimum temas kuvvetleri ve maksimum yer değiştirme değerlerinin darbe enerjisine bağlı grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler Şekil 5.23'te verilmiştir. Şekil 5.23-a incelendiğinde kayma yükü verilen numunelerin maksimum temas kuvvetinin, ön yüklemeye maruz kalmamış numunelerin delinme enerjisine kadar daha düşük olduğu görülmektedir. Şekil 5.23-b incelendiğinde ise delinme noktasına kadar ön yüklemenin maksimum yer değiştirme değerini arttırdığı, delinme sonrasında ise düşürdüğü görülmektedir. Bunun yanı sıra kayma ön yüklemesinin deformasyonun stabilize ettiği enerji değerini düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 5.23 0 μ , $\pm 250 \mu$ ve $\pm 500 \mu$ kayma ön yüklerine maruz numunelerin a) maksimum temas kuvvetlerinin b) maksimum yer değiştirmelerinin; darbe enerjisi ile değişim grafikleri

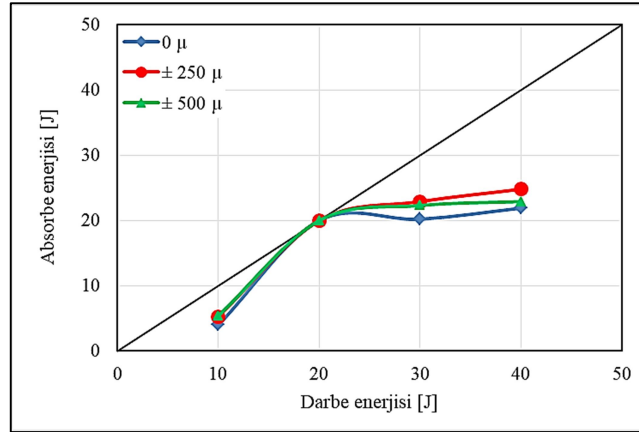
5.3.3.2 Enerji – Zaman

Ön yükleme büyüklükleri $\pm 250 \mu$ ve $\pm 500 \mu$ olan 2 mm kalınlığındaki kompozitlerin 10J, 20J, 30J ve 40J enerjilerinde yapılmış olan darbe deneylerinin enerji – zaman grafikleri Şekil 5.24'te verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde ön yüklenmiş numunelerde 10J enerjilerinde geri sekme olduğu ve 30J ile 40J enerjilerinde delinme olduğu teyit edilmiştir. Ayrıca 20J enerjileri incelendiğinde bu enerji değerlerin delinme sınırı olduğu görülmektedir. Bir diğer durum ise ön yüklemenin $\pm 250 \mu$ olarak artışı ile absorbe edilen enerjinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5.24 a) $\pm 250 \mu$ ön yüklerine ve b) $\pm 500 \mu$ ön yüklerine maruz kompozitlerin farklı darbe enerjilerindeki, enerji - zaman grafikleri

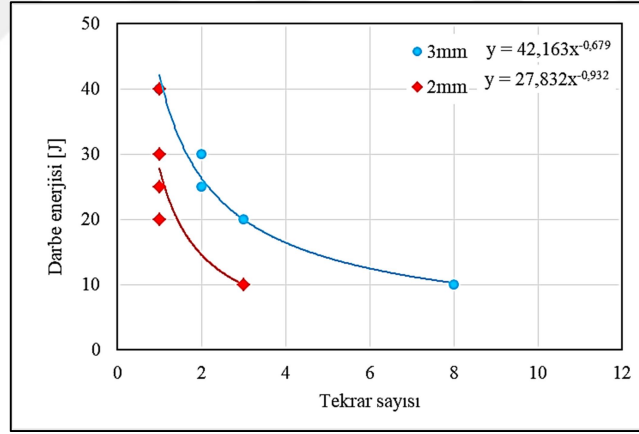
Kayma ön yüklemesinin absorbe edilen enerjiye etkisinin daha iyi anlayabilmek amacıyla çizilen eş enerji grafiği Şekil 5.25'te verilmiştir. Şekil 5.25'teki eğrilerin delinme sonrası bölümlerine bakıldığında, kayma yüklemesinin artışı ile başlangıçta absorbe edilen enerji değerini arttırdığı, sonrasında ise düştüğü gözlenmektedir. $\pm 250 \mu$ ön yüklenmiş numune ile çeki yönünde (+) 250μ ön yüklenmiş numunelerin absorbe edilen enerji eğrilerinin delinme sonrasındaki bölgeleri birbirine çok yakındır. Ancak 500μ ön yükleme durumunda bu benzerlik kaybolmaktadır.



Şekil 5.25 0μ , $\pm 250 \mu$ ve $\pm 500 \mu$ kayma ön yüklerine maruz numunelerin absorbe edilen enerji - darbe enerjisi grafikleri

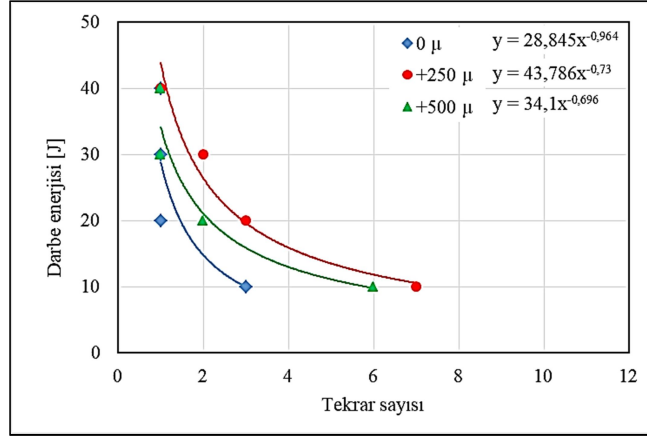
5.3.4 Tekrarlı Darbe Grafikleri

Kompozit malzemelerin kullanımlarında tekrarlı darbe davranışları önemli bir yer tutmaktadır. Bu amaçla çalışmanın ikinci ve üçüncü aşamasında yapılan deneyler tekrarlı darbe durumu için tekrarlanmıştır. Sonrasında numunelerin dayanabilecekleri tekrar sayılarının darbe enerjisine göre değişim grafikleri hazırlanmıştır. İkinci bölümde incelenen ön yüklemesiz durumdaki 2 ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin darbe enerjisi – tekrar sayısı noktaları Şekil 5.26’da verilmiştir. Sonrasında bu değerleri daha iyi yorumlamak amacıyla noktalara eğri uydurma metodu ile üssel eğim çizgileri eklenmiştir. Darbe enerjisinin 20J değerinin altına düşmesi ile numunelerin tekrar sayıları iki kalınlık içinde ciddi seviyede artmaktadır. Darbe enerjisinin 40J değerine ulaşması ile tüm numuneler sadece bir tekrara dayanabilmiştir. Numunelerin tekrar sayıları bire düşene kadar 3 mm kalınlığa sahip numunelerin tekrar sayıları 2 mm numunelerden daha yüksektir.



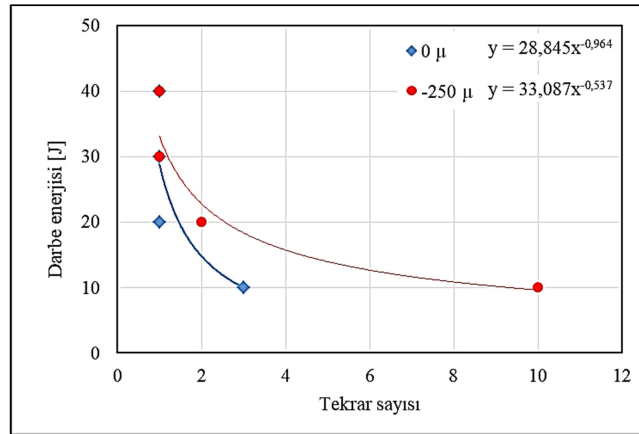
Şekil 5.26 2 mm ve 3 mm kalınlığındaki numunelerin tekrar sayısı - darbe enerjisi grafikleri

Şekil 5.27’de çeki yönünde ön yüklenmiş (+250 μ ve +500 μ) numuneler ile ön yüklenmemiş durumdaki 2 mm kalınlığında sandviç numunelerin tekrarlı darbe sayılarının grafikleri verilmiştir. Darbe enerjisinin 20J değerinin altına düşmesi ile numunelerin tekrar sayıları tüm durumlar için önemli oranda artmaktadır. Ön yükleme değeri +250 μ olan numuneler darbe enerjisinin 40J değerine ulaşması ile sadece bir tekrara dayanabilmektedir.



Şekil 5.27 0 µ, +250 µ ve +500 µ ön yüklerine maruz numunelerin tekrar sayısı - darbe enerjisi grafikleri

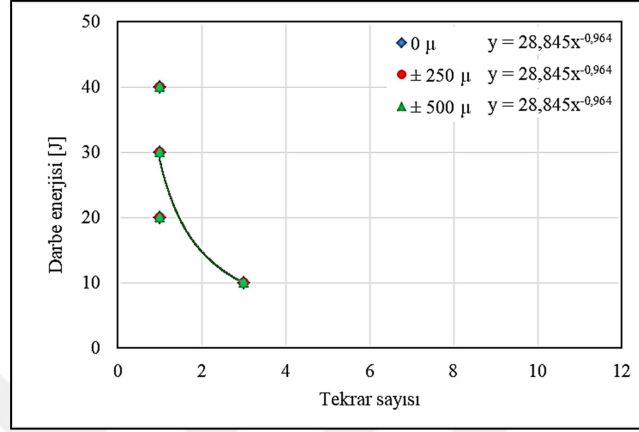
Bası ön yüklemesine maruz bırakılmış numunelerin ve ön yüklemeye maruz kalmamış numunelerin darbe enerjisi - tekrar sayısı Şekil 5.28'de verilmiştir. Bu grafiklere bakıldığında 30J değerinden sonra tüm numunelerin tekrar sayısının bire düştüğü görülmektedir. Ön yüklenmiş numunelerin darbe enerjileri 20J değerinin altına düşmesi ile tekrar sayıları ciddi miktarda artmaktadır.



Şekil 5.28 0 µ ve -250 µ ön yüklerine maruz numunelerin tekrar sayısı - darbe enerjisi grafikleri

Şekil 5.29'da ±250 µ ve ±500 µ kayma ön yüklemesine maruz bırakılmış ve ön yüklenmemiş durumdaki sandviç kompozitlerin darbe enerjisi ile tekrar sayılarının değişim eğrileri verilmiştir. Darbe enerjisinin 20J'den artırılmasıyla numunelerin tekrar sayılarının bire düştüğü görülmektedir. Tüm enerji değerleri altıda ön

yüklenmemiş ve farklı kayma ön yükleme değerlerine sahip numunelerin tekrar sayıları aynıdır.



Şekil 5.29 0 μ, ±250 μ ve ±500 μ ön yüklerine maruz numunelerin tekrar sayısı - darbe enerjisi grafikleri

BÖLÜM ALTI

YARGILAR VE SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında, cam elyaf takviyeli polipropilen kompozitlerin düşük hızlı darbe davranışları deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan farklı dizilime sahip (sadece uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüllerden üretilmiş kompozitler ve uzun cam elyaf takviyeli polipropilen granüller ile birlikte cam elyaf takviyeli laminalardan üretilmiş kompozitler) 4 mm ve 6 mm kalınlığındaki kompozitlerin düşük hızlı darbe deneyleri oda sıcaklığında ve 50°C sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Aşağıda sonuç olarak elde edilen genel yargılar sıralanmıştır:

- Sandviç kompozitler ile sadece granüllerden üretilen kompozitler karşılaştırıldığında laminaların düşük hızlı darbe dayanımını tüm enerji seviyelerinde önemli ölçüde arttırdığı görülmüştür.
- Numune kalınlığının 6 mm'ye çıkmasıyla birlikte farklı dizilimdeki kompozitlerin tüm enerji seviyelerinde düşük hızlı darbe dayanımlarının yükseldiği gözlemlenmiştir.
- Sıcaklığın 50°C'ye yükselmesiyle birlikte tüm numunelerin rijitliklerinin azaldığı gözlenmiştir. Sıcaklık artışının düşük hızlı darbe davranışına olumsuz etki yaptığı ortaya konulmuştur.
- Farklı darbe enerjileri altında enerji – zaman grafiğinin yatay olduğu kısımlar dikkate alındığında, sandviç yapıdaki kompozitlerin granülden oluşmuş kompozitlerden daha yüksek enerji absorbe ettiği görülmüştür.
- Temas kuvveti – yer değiştirme grafiklerinde artan numune kalınlığı ile daha da belirgin hale gelen ikinci bir tepenin oluştuğu bunun da numunenin alt kısmında bulunan laminalardan kaynaklandığı görülmüştür. Granüllerden üretilen kompozitlerin grafiklerinde ikinci bir tepeye rastlanılmamıştır.
- Darbe sonrası numune resimleri incelendiğinde, darbe enerjisinin artmasına bağlı olarak üst yüzeyde oluşan hasarın alt yüzeylerde de meydana geldiği ve fiber ve matris hasarlarının yanı sıra delaminasyonların da oluştuğu gözlemlenmiştir.

Tezin sonraki aşamasında 2 mm ve 3 mm kalınlığa sahip numuneler düşük hızlı darbe deneyine tabi tutulmuştur. Kalınlıkları 2 mm ve 3 mm olan numunelerin darbe deneyleri 10J, 20J, 25J, 30J ve 40J enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. Bu aşamada yapılan deneyler oda sıcaklığında (23°C) gerçekleştirilmiştir. Sonrasında numunelere tekrarlı darbe deneyleri yapılmıştır. Bu iki kalınlıktaki numunelerin deneylerinden elde edilen sonuçlar ile varılan yargılar aşağıda sıralanmıştır:

- Sandviç numunelerin kalınlığının artışı ile numunelerin delinme eşiğine (20J) kadarki maksimum temas kuvvetlerinde önemli ölçüde değişiklik görülmemiştir. Ancak maksimum temas kuvvetlerinin delinme sonrası kalınlığın artışı ile önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir.
- Sandviç numunelerin maksimum deformasyon değerleri de temas kuvvetinin stabilleştiği aralıkta yaklaşık olarak aynı değerleri almaktadırlar. Daha düşük enerjilerde ise kalın numunelerin maksimum deformasyon değerleri daha düşüktür.
- Sandviç numunelerin delinme enerjileri 2 mm için 20J, 3 mm için 25J, 4 mm için 30J-50J arası, 6 mm için 50J olarak elde edilmiştir.
- Kalın numunelerin enerji absorbe edebilme kabiliyetleri daha yüksektir.
- Sandviç kompozitlerin kalınlıklarının artışı ile numunelerin tekrarlı darbe davranışı artmıştır.

Çalışmanın son aşamasında ön yüklenmiş numunelerin düşük hızlı darbe deneyleri yapılmıştır. Darbe deneyleri 10J, 20J, 30J ve 40J enerjilerinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sırasında incelenen ön yükleme durumları çeki, bası ve kayma (çeki ve bası) yükleme şeklidir. Çeki yüklemeleri 250 μ ve 500 μ büyüklüklerinde, bası yükleme 250 μ büyüklüğünde ve kayma yükleme ise 250 μ ve 500 μ büyüklüklerindedir. Darbe deneyleri ön yüklenmiş numunelerin tekrarlı darbe davranışlarını incelemek amacı ile delinme meydana gelinceye kadar tekrarlanmıştır. Deneyler sonucunda varılan yargılar aşağıda sıralanmıştır:

- Çeki yükleme durumunda numunelerin darbe absorbe edebilme kabiliyetleri artmaktadır.
- Çeki ön yüklemesinin artışı ile numunelerin tekrar sayıları önce artmış

sonrasında ise azalmıştır.

- Düşük enerji değerlerinde kompozitlerin maksimum temas kuvvetleri bası ön yüklemesinin uygulanması ile düşmektedir.
- Bası ön yüklemesi kompozitlerin darbe sönümleme kabiliyetini ve delinme enerjisini düşürmüştür.
- Numunelerin tekrar sayıları, özellikle düşük darbe enerjilerinde bası ön yüklemesi ile ciddi oranda artmaktadır.
- Çeki ve bası ön yüklemeleri altında kompozitlerin maksimum deformasyon değerleri ön yüklemesinin artışı ile yükselmektedir.
- Kayma ön yüklemesinin artışı ile numunelerin maksimum deformasyon değerleri delinme öncesinde artmış, delinme sonrasında ise azalmıştır.
- Kayma ön yüklemesi ile numunelerin absorbe edilen enerjileri delinme değerine kadar birbirine yakındır. Ancak delinme sonrası kayma ön yüklemesine maruz numunelerin absorbe ettikleri enerji değerleri ön yüklemesiz numunelerden daha yüksektir.
- Kayma ön yüklemesinin numunelerin tekrarlı darbe sayıları üzerine bir etkisi gözlenmemiştir.
- 30J ve 40J darbe enerjisi aralığında 2 mm kalınlığındaki tüm numunelerde maksimum deformasyon değeri sabittir.

Yukarıda varılan yargılar incelendiğinde sandviç kompozitlerin darbe davranışında deformasyonun önemli olduğu yerlerde ön yüklemenin bu yapılar için bir tehlike oluşturduğu sonucuna varılabilir. Bir diğer önemli sonuç ise kompozitlerin darbe sönümleme kabiliyetlerinin önem kazandığı yerlerde tek eksenli ön yüklemenin olumlu etkisinin olacağıdır. Koruyucu ekipmanlar gibi özellikle delinme sonrası yüksek darbe sönümleme kabiliyetine ve düşük şekil değişimine ihtiyaç duyulan yerlerde ise kayma ön yüklemesinin önemli olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abrate S. (2010). *Impact engineering of composite structures* (1. Baskı). New York: Springer Wien.
- Al-Shamary, A.K.J., Karakuzu, R. ve Özdemir, O. (2016). Low-velocity impact response of sandwich composites with different foam core configurations. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 18 (6), 754-768.
- Arikan, V. ve Sayman, O. (2015). Comparative study on repeated impact response of E-glass fiber reinforced polypropylene and epoxy matrix composites. *Composites Part B*, 83, 1-6.
- Bekisli, B. ve Grenestedt, J.L. (2004). Experimental evaluation of a balsa sandwich core with improved shear properties. *Composites Science and Technology*, 64, 667-674
- Biron, M. (2013). *Thermoplastics and thermoplastic composites* (1. Baskı). Amsterdam: Elsevier.
- Boumbimba, R.M., Coulibaly, M., Khabouchi, A., Kinvi-Dossou, G., 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, F.C. (2010). *Structural composite materials* (1. Baskı). Ohio: ASM International.
- Cantor, B., Dunne, F. ve Stone, I. (2004). *Metal and ceramic matrix composites* (1. Baskı). Bristol and Philadelphia: Institute of Physics Publishing.

- Dhakal, H.N., Zhang, Z.Y., Bennett, N. ve Reis, P.N.B. (2012). Low-velocity impact response of non-woven hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites: Influence of impactor geometry and impact velocity. *Composite Structures*, 94, 2756–2763.
- Doğan, A. ve Arıkan, V. (2017). Low-velocity impact response of E-glass reinforced thermoset and thermoplastic based sandwich composites. *Composites Part B*, 127, 63-69
- García-Castillo, S.K., Sa'nchez-Sa'ez, S., Lo'pez-Puente, J., Barbero, E. ve Navarro, C. (2009). Impact behaviour of preloaded glass/polyester woven plates. *Composites Science and Technology*, 69, 711–717.
- Garcia-Gonzalez, D., Rodriguez-Millan, M., Rusinek, A. ve Arias, A. (2015). Low temperature effect on impact energy absorption capability of PEEK composites. *Composite Structures*, 134, 440–449.
- Guillaud, N., Froustey, C., Dau, F. ve Viot, P. (2015). Impact response of thick composite plates under uniaxial tensile preloading. *Composite Structures*, 121, 172–181.
- Heimbs, S., Heller, S., Middendorf, P., Hahnel, F. ve Weiße, J. (2009). Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: Test and modelling. *International Journal of Impact Engineering*, 36, 1182–1193.
- Heimbsi, S., Bergmann, T., Schueler, D. ve Toso-Pentecôte, N. (2014). High velocity impact on preloaded composite plates. *Composite Structures*, 111, 158–168.
- Herszberg, I. ve Weller, T. (2006). Impact damage resistance of buckled carbon/epoxy panels. *Composite Structures*, 73, 130–137.

- Kurşun, A., Şenel, M. ve Enginsoy, H.M. (2015). Experimental and numerical analysis of low velocity impact on a preloaded composite plate. *Advances in Engineering Software*, 90, 41–52.
- Mallick, P.K. (2007). *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. London: CRC Press.
- Mazumdar, S.K. (2002). *Composites manufacturing materials, product and process engineering* (1. Baskı). America: CRC Press.
- Mitreviski, T., Marshall, I.H., Thomson, R.S. ve Jones, R. (2006). Low-velocity impacts on preloaded GFRP specimens with various impactor shapes. *Composite Structures*, 76, 209–217.
- Moallemzadeh, A.R., Sabet, S.A.R. ve Abedini, H. (2018). Preloaded composite panels under high velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 114, 153–159
- Özdemir, O. ve Kandaş, H. (2018). Cam lifi takviyeli polipropilen kompozitlerde kalınlığın ve sıcaklığın darbe davranışına etkileri. *Tekstil ve Mühendis*, 25 (110), 103-112.
- Özdemir, O., Öztoprak, N ve Kandaş, H. (2018). Single and repeated impact behaviors of bio-sandwich structures consisting of thermoplastic face sheets and different balsa core thicknesses. *Composites Part B*, 149, 49–57
- Russo, P., Langella, A., Papa, I., Simeoli, G. ve Lopresto, V. (2017) Thermoplastic polyurethane/glass fabric composite laminates: Low velocity impact behavior under extreme temperature conditions. *Composite Structures*, 166, 146–152.

- Saghafi, H., Brugo, T., Minak, G. ve Zucchelli, A. (2014). The effect of pre-stress on impact response of concave and convex composite laminates. *Procedia Engineering*, 88, 109 – 116.
- Saghafi, H., Minak G. ve Zucchelli, A. (2014). Effect of preload on the impact response of curved composite panels. *Composites: Part B*, 60, 74–81.
- Schueler, D., Toso-Pentecôte, N. ve Voggenreiter, H. (2016). Effects of static preloads on the high velocity impact response of composite plates. *Composite Structures*, 153, 549–556.
- Sorrentino, L., de Vasconcellos, D.S., D'Auria, M. ve Sarasini, F. (2017). Effect of temperature on static and low velocity impact properties of thermoplastic composites. *Composites Part B*, 113, 100-110.
- Vieille, B., Casado, V.M. ve Bouvet C., (2013), About the impact behavior of woven-ply carbon fiber-reinforced thermoplastic- and thermosetting-composites: A comparative study. *Composite Structures*, 101, 9-21.
- Wang, R., Zheng, S. ve Zheng Y. (2011). *Polymer matrix composites and technology*. Sawston. Woodhead Publishing.
- Whittingham, B., Marshall, I.H., Mitrevski, T. ve Jones, R. (2004). The response of composite structures with pre-stress subject to low velocity impact damage. *Composite Structures*, 66, 685–698.