



T.C.
NECMETTİN ERBAKAN
ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**KUMAŞ SARIM METODU İLE ÜRETİLEN
ARAMİD FİBER BORULARIN DARBE
DİRENÇLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Ahmet Faruk DOĞAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Temmuz-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet Faruk DOĞAN tarafından hazırlanan “Kumaş Sarım Metodu ile Üretilen Aramid Fiber Boruların Darbe Dirençlerinin Araştırılması” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr.Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ

Danışman

Dr.Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Üye

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/.../20.. gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. İbrahim KALAYCI
FBE Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ahmet Faruk DOĞAN

29/07/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KUMAŞ SARIM METODU İLE ÜRETİLEN ARAMİD FİBER BORULARIN DARBE DİRENÇLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Ahmet Faruk DOĞAN

**Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

2022, 90 Sayfa

Jüri

Dr.Öğr. Üyesi M. Turan DEMİRCİ

Dr.Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI

Prof.Dr. Hüseyin ARIKAN

Özet

Kompozit malzeme üretiminde silindirik geometriler yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Silindirik geometrilerin üretiminde en çok kullanılan metot filaman sarım tekniğidir. Ancak filaman sarım tekniğinin en büyük dezavantajı sarım katmanları arasında kayma gerilmelerinin oluşmasıdır. Bu çalışmada filaman sarım metodu yerine literatüre uygun şekilde 55° sarım açısı olarak düz sarım tekniğine uygun 2*2 twill kumaş sarım tekniği uygulanmıştır. Atkı ve çözgü lifleri arasında kıvrım etkisi minimuma indirilerek üretilen aramid fiber borunun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca aynı malzemeden 9 kat plaka üretimi yapılarak çekme ve eğme gerilmelerine maruz bırakılmış, aramid fiber kompozit boruda ise 5-10-15 J enerji seviyelerinde darbe deneyi yapılarak kompozit malzemelerin darbe dayanımları araştırılmıştır. Darbe dayanımı açısından yükselen enerji seviyelerinde fiber kırıklarının daha az miktarda olduğu aramid fiber kompozit borunun darbe dayanımının yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Aramid, Vinilester Reçine, Darbe Dayanımı, Kumaş Sarım Tekniği

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF IMPACT RESISTANCE OF ARAMID FIBER PIPES MANUFACTURED BY FABRIC WINDING METHOD

Ahmet Faruk DOĞAN

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN MECHANICAL ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Mehmet KAYRICI

2022, 90 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. M. Turan DEMİRCİ

Asst.Prof.Dr. Mehmet KAYRICI

Prof.Dr. Hüseyin ARIKAN

Cylindrical geometries are used extensively in the production of composite materials. The most widely used method in the production of cylindrical geometries is the filament winding technique. However, the biggest disadvantage of the filament winding technique is the formation of shear stresses between the winding layers. In this study, instead of filament winding method, 2*2 twill fabric winding technique suitable for flat winding technique was applied as 55° winding angles in accordance with the literature. The mechanical properties of the aramid fiber pipe produced by minimizing the curling effect between the weft and warp fibers were investigated. In addition, 9 layers of plates were produced from the same material and exposed to tensile and bending stresses, and impact strength of composite materials was investigated by performing impact tests at energy levels of 5-10-15 J in aramid fiber composite pipe. In terms of impact resistance, it was concluded that the impact resistance of aramid fiber composite pipe is high, with less fiber fractures at higher energy levels.

Keywords: Aramid, Vinylester Resin, Impact Resistance, Fabric Winding Technique

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYIRICI hocama teşekkürü bir borç bilirim. Atölye imkanlarından fayda sağladığı için Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN hocama da teşekkür ederim. Çalışmanın tamamlanmasında Gürol SEVİM ve Osman ÇAVUŞOĞLU abilerime de teşekkür ederim. Eğitim hayatı boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı anneme, babama, Recep YAZICI hocama ve ailesine ve kardeşlerime de ayrıca teşekkür ederim.

Ahmet Faruk DOĞAN

KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
KISALTMALAR.....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	4
3. KOMPOZİT MALZEMELER	12
3.1. Matris fazına göre kompozitlerin sınıflandırılması	12
3.1.1. Polimer matrisli kompozitler	12
3.1.1.1. Reçineler	14
A. Polyester Reçineler	15
B. Epoksi Reçineler.....	15
C. Vinilester Reçineler	16
D. Fenolik Reçineler	16
D. Silikon Reçineler	16
3.1.1.2. FİBERLER	17
A. Cam Elyaf	18
B. Aramid Elyaf	18
C. Karbon Elyaf	19
D. Boron Elyaf	20
3.1.2. Metal matrisli kompozitler	20
3.1.3. Seramik matrisli kompozitler	21
3.2. Takviye fazına göre kompozitlerin sınıflandırılması.....	22
3.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler	22
3.2.2. Parçacık takviyeli kompozitler	23
3.2.3. Tabakalı kompozit malzemeler.....	23
3.3. Hibrit kompozitler	24
3.4. Nano takviye malzemeleri.....	24
3.5. Nanodolgu malzemeleri	25
3.6. Kompozit malzeme üretimi	25
3.6.1. Laminat üretimi.....	25
3.6.1.1. Fiber takviyeli kompozit laminat üretim teknikleri	26
Islak yatırma / El yatırması yöntemi	26
Vakum torbalama.....	26

Pultrüzyon	27
Reçine transfer kalıplama (RTM)	28
Otoklav kalıplama	29
Otoklav dışı torbalama – Prepreg	31
3.6.2. Boru üretimi	31
3.6.2.1. Fiber takviyeli kompozit boruların üretim teknikleri	32
A. Filament sarım işlemi	32
B. Rulo sarma işlemi	34
C. Çekme örgü işlemi	35
3.7. Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının Belirlenmesi	35
3.7.1. Kompozitlerin çekme davranışlarının belirlenmesi	35
3.7.2. Kompozitlerin eğilme davranışlarının belirlenmesi	36
3.7.3. Kompozitlerin darbe davranışlarının belirlenmesi	36
3.7.3.1. Silindirik Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasarlar	37
A. Matris hasarı	39
B. Delaminasyon	41
C. Fiber kopması	42
D. Fiber-matris ara yüzü hasarı	43
3.8. Kütleme Süreci ve süresinin Mekanik Özelliklere Etkisi	44
4. MATERYAL VE METOT	45
4.1. Materyal	45
4.1.1. Aramid elyaf kumaş	45
4.1.2. Vinilester reçine	45
4.1.2.1. Reçinenin hazırlanması	46
4.2. Metot	46
4.2.1 Hibrit Kompozit Malzeme Üretimi	46
A. Hibrit kompozit üretiminde kullanılan malzemeler	50
B. Vakum infüzyon malzemeleri	50
4.2.2. Çekme ve eğme cihazı ve deney özellikleri	51
4.2.3. Darbe Cihazı ve Deney Özellikleri	52
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	53
5.1. Çekme deneyi grafik analizi	53
5.1.1 Gerilme-Şekil değiştirme grafiği	53
5.2. Eğilme deneyi grafik analizi	54
5.2.1. Kuvvet – Deplasman grafiği	54
5.3. Darbe deneyi grafik analizleri	54
5.3.1. Kuvvet- deplasman grafikleri	55
5.3.2. Kuvvet- Zaman grafikleri	57
5.3.3. Enerji – Zaman grafikleri	58
5.4. Optik mikroskop görüntü analizleri	58
5.4.1. Çekme deneyi görüntü analizleri	58
5.4.2. Eğme deneyi görüntü analizleri	59
5.4.3. Darbe deneyi görüntü analizleri	61

6. SONUÇLAR	63
7. Kaynakça	64
8. Özgeçmiş.....	80

KISALTMALAR

CFRP	: Karbon fiber takviyeli polimer
CGC	: Karbon- Cam- Karbon dizilimi
CNT	: Karbon nanotüp
DWCNT	: Çift duvarlı karbon nanotüp
GCG	: Cam- Karbon- Cam dizilimi
GRP	: Cam takviyeli polimer
MWCNT	: Çok duvarlı karbon nanotüp
PAN	: Poliakrilonitril
PVA	: Polivinil alkol
SWCNT	: Tek duvarlı karbon nanotüp

TABLÖLAR DİZİNİ

Çizelge 4.1.1. Aramid elyafa ait teknik özellikler.....	59
Çizelge 4.1.2. Vinilestere ait teknik özellikler.....	60

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1 Kompozit malzemelerin matris fazına göre sınıflandırılması.....	12
Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin takviye fazına göre sınıflandırılması.....	22
Şekil 3.6.1.1.A. Vakum torbalama yöntemi (Gurit Holding AG,2000).....	27
Şekil 3.6.1.1.B. Pultrüzyon yöntemi (Gurit Holding AG,2000).....	28
Şekil 3.6.1.1.C. Reçine transfer kalıplama yöntemi (Gurit Holding AG,2000)	29
Şekil 3.6.2.1.A. Elyaf sarma metodu (Nuplex, 2016a).....	34
Şekil 3.6.2.1.B. Helisel sarım, çevresel sarım ve polar sarım gösterimi (material textbook,1981)...	34
Şekil 3.7.3.1. Tabakalı kompozit malzemede meydana gelen hasarlar (Shyr ve Pan 2003).....	38
Şekil 3.7.3.1.A. Matris çatlaklarına ait iki tip çatlak oluşumu, (a) Çeki çatlağı, (b) Kayma çatlağı (Abrate 1998).....	40
Şekil 3.7.3.1.B (a) Hasarın üst tabakadan alt tabakaya doğru çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi, (b) Hasarın alt tabakadan üst tabakaya tersine dönmüş çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi (Abrate 1998).....	41
Şekil 4.2.1 Numune Deney Standartı	48
Şekil 4.2.1.A. vakum torbalama işlem.....	49
Şekil 4.2.1.B. Otoklavda kütleme.....	49
Şekil 4.2.1.D. El yatırma yöntemi ile tabakalı kompozit imalatı.....	50
Şekil 4.2.1.E. Sıcak pres yöntemiyle tabakalı kompozit imalatı.....	50
Şekil 4.2.3 1 Darbe test cihazı.....	53
Şekil 5.1.1.A. Kompozit borunun gerilme/şekil değiştirme grafiği.....	54
Şekil 5.2.1.A. Kompozit borunun kuvvet deplasman grafiği.....	55
Şekil 5.3.1.A. 5 10 15 j enerji seviyelerinde kompozit boru kuvvet/deplasman grafikleri.....	57
Şekil 5.3.2.A. 5 10 15 j enerji seviyelerinde kompozit boru kuvvet zaman grafikleri.....	58
Şekil 5.3.3.A. 5 10 15 j enerji seviyelerinde kompozit boru enerji /zaman grafikleri.....	59
Şekil 5.4.1.A. Kompozit plaka çekme görüntüsü.....	60
Şekil 5.4.1.B Kompozit plaka çekme hasar görüntüsü.	60
Şekil 5.4.2.A. Kompozit plaka eğme görüntüsü.....	6
1	
Şekil 5.4.2.B Kompozit plaka eğme hasar görüntüsü.....	61

1. GİRİŞ

Kompozitlerin tarihine bakıldığında uzun kullanım sürelerine sahiptir. İlk örnekleri saman ile güçlendirilmiş kerpiç evlerdir. Kompozit, makroskobik düzeyde bir araya getirilmiş ve birbiri içinde çözünmeyen iki veya daha fazla bileşenden oluşmuş mühendislik yapı malzemesidir. Bileşenlerden birisi takviye fazı, diğeri ise matristir. Takviye fazı fiber, kumaş, parçacık veya pul formunda olabilir. Matris fazı genellikle sürekli dir. Örnek olarak beton ve otomobil lastiğ i verilebilir. Polimer matrisli uygulamalar termoset, termoplastik ve elastomer şeklinde sınıflandırılabilir. Termoset matrisler vinilester, epoksi, polyester, silikon gibi reçinelerdir ve sıvı formda bulunmaktadır. Kompozit malzemelerde amaç, bir araya getirildikleri malzemelerin en üstün özelliklerini alıp yüksek özellikli yeni malzeme elde etmektir. Takviye fazına göre farklı olmakla birlikte fiber takviyeli polimer kompozitler yüksek özgül mukavemet ve yüksek özgül modüle sahip olduklarından ağırlık azaltma uygulamalarında kullanılmaktadır.

Polimer matrisli kompozit yapımında matris fazı olarak vinilester, epoksi, polyester ve silikon kullanılırken takviye fazında cam elyaf, karbon elyaf, aramid elyaf gibi malzemelerdir. Fiberlerin belirli bir düzenle örülmesiyle elyaf kumaşlar oluşmaktadır.

Polimer matrisli kompozit malzemeler, takviye malzemesi olan elyafın matris fazı olan reçine içerisine gömülerek belirli bir üretim yöntemiyle elde edilen bir yapıdır. Elyaf, reçine içerisinde sürekli veya süreksiz formda bulunabilir. Polimer matrisli kompozitler, yüksek özgül mukavemet ile modül, kimyevi dayanıklılık, korozyon dayanımı, farklı kesitlerde ve boyutlarda esnek üretim kabiliyetinden dolayı farklı endüstri ve mühendislik uygulama alanlarında kendine yer bulmaktadır. Kompozitler malzemeler, metallere göre hafiflik ve yüksek mukavemet üstünlüğünden yararlanılmasıyla mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanına sahip olmuştur. Havacılık ve uzay endüstrisindeki uygulamalarda düşük yoğunluk yoluyla hafiflik sağlamak büyük önem arz etmektedir. Bilhassa fiber takviyeli kompozit malzemelerin uçak ve savunma endüstrisinde ağırlıklı olarak kullanılması faydalı yükü arttırmada önemli bir yarar sağlamıştır. (Abrate,1991),(Yalçın, 2013) Kompozit borular mühendislikte pek çok uygulamada kullanılmaktadır. Daha fazla mukavemeti, daha hafif ağırlığı ve daha düşük patlama riski ile fiber takviyeli kompozit borular, onları petrol ve gaz endüstrileri gibi uygulamalar için iyi adaylar haline getirir (Gemi vd. 2017) Kompozit malzemeler genellikle çok çeşitli hasar oluşumları gösterir. Bu hasarlar ve kusurlar imalat sırasında

ve servis sırasında oluşabilir (Kang,2010), (Cho,2006), (Lee,2005). Fiber takviyeli tabakalı kompozitler genellikle, tabakalar arası gerilmelerin oluşması nedeniyle delaminasyona neden olan (Abrate,1991) farklı yönlerde sahip istiflenmiş katlardan oluşur. Hasar şiddetli hale geldiğinde yapısal bütünlüğü etkileyebilir (Zou,2002) ve sızıntıya (Anderson,1992) ve mekanik özelliklerin azalmasına (Corbett,1994) (Reid,1996) neden olabilir ve dinamik tepkiyi etkiler. Ayrıca çevresel koşullar sırasında kompozitlerde matris, fiber ve fiber-matris ara yüzey bölgelerinde bozulma olması beklenir. Bu kompozit borular, matris çatlağı, delaminasyon, fiber kırılması, fiber-matris bağının ayrılması ve fiber çekilmesi gibi boruda çeşitli hasarlara neden olan enine darbe yüklemesine maruz kalabilir. Bu hasarlar, kompozit boruların yapısal rijitliğinde önemli ölçüde azalmaya neden olabilir. (Deniz vd,2012)

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan Gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin en uygun cevabı verebilmesi istenir. Yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Genel olarak, darbeler düşük, orta ve yüksek hızlı olarak sınıflandırılırlar, fakat bu kategoriler arasında açık bir geçiş yoktur. Yapılan araştırmalar bu geçişi belirlenmesinde henüz net bir sonucun elde edilemediğini göstermektedir. Bu konuda yapılmış çalışmalardan bir kısmı düşük hızlı darbeyi hedefin rijitliğine, malzeme özelliklerine, çarpan cismin kütle ve rijitliğine bağlı olarak 1 ila 10 m/s arasında değişen hızlar olarak değerlendirilmesi gerektiğini savunmaktadır (Ceyhun ve Turan 2003). (Kara,2012)

Düşük hızlı darbeye karşı olan cevap malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımlarında darbe sonucunda oluşan hasar darbeye maruz kalan yüzeyde meydana gelir. Kompozit malzemelerde ise darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde de meydana gelebilir. İçyapıda delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde görülebilir. Metallerde darbe cevabı, plastik şekil değiştirme sonucunda bir kopma veya kırılma şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir değişiklik meydana gelmez. (Kara, 2012)

Bu çalışmada kumaş sarım tekniğiyle 55° sarım açısına sahip Aramid/epoksi kompozit borular [55°] olacak şekilde 10 kat olarak üretilmiştir. Borular istenilen kalite ve kalınlığa gelmesi için taşlama yapılmıştır. Kompozit boru numunelerine 5, 10 ve 15 Joule enerji seviyesinde düşük hızlı darbe testleri uygulanmıştır. Düşük hızlı darbe deneyleri sonucunda elde edilen kuvvet-deplasman, kuvvet-zaman, enerji-deplasman,

enerji-zaman değişimleri belirlenmiştir. Farklı darbe enerji seviyelerinde düşük hızlı darbeye maruz kalan deney numunelerinde oluşan hasar alanları incelenmiş ve hasar modları tespit edilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Teknolojik gelişmelerle birlikte gereksinimler de değişmiştir. Bazen geleneksel malzemeler bu gereksinimleri karşılamada yetersiz kalmaktadır. Özellikle denizcilik uygulamalarında, rüzgâr türbini kanatlarında ve uzay araçlarında yüksek mukavemetin yanında hafif olması da istenmektedir. (Arıkan vd., 2015)

Kompozit malzemeler, yüksek dayanım/ağırlık oranı ve yüksek modül gibi üstün mekanik özelliklerinden dolayı, havacılık, inşaat, mekanik, savunma ve endüstri mühendisliği alanlarında uygulamalara sahiptir. (Ramadhan vd,2013) Kompozit malzemeler, üstün yorulma direnci nedeniyle de geleneksel metallere göre tercih edilmektedir. (Santiago vd,2012)

Sertlik ve mukavemete özgü özellikler, düşük ağırlık, korozyon önleyici, daha yüksek doğal frekanslar ve yorulma olgusuna karşı uzun ömür dahil olmak üzere daha yüksek mekanik özelliklerden oluşan polimerik kompozit malzemelerin benzersiz ve olağanüstü özellikleri, onları geniş mühendislik yelpazesi içinde vazgeçilmez kılmıştır. Ayrıca, polimerik kompozitlerle ilişkili yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, genellikle daha uygun maliyetli ve katma değerli üretim hatlarıyla sonuçlanmıştır. Kompozitlerin en önemli kategorisi olan polimerik kompozitler, sadece havacılık ve askeri sektörler gibi yüksek teknoloji endüstriyel uygulamalarda değil, aynı zamanda sağlık gereçleri gibi düşük teknoloji endüstrilere de girmiştir. Polimerik kompozitler demir, kara, hava ve deniz taşımacılığı, askeri, havacılık, belediye, enerji üretimi ve iletimi, sivil ve altyapı, petrol ve petrol, spor ve eğlence sektörlerinden oluşan geniş bir endüstriyel sektör yelpazesini kapsamaktadır.(Rafiee,2016)Kompozit malzemelerin kullanımı, çeşitli muharebe araçları ve koruma cihazları için kütle verimliliği sağlar(Abrate,1994),(Richarson,1996),(Choi,1990),(Davies,1995),(FongYen,2012).Havacılık alanında kullanılan kompozit laminatların önemli bir sorunu, uçakların servis ve bakımı sırasında yabancı cisimlerin çeşitli etkilerinin beklenmesi nedeniyle düşük ve yüksek hızlı darbelere karşı dirençleridir (Aktas,2009)(Wang,2013),(Abrate,1991),(Abrate,1994)(Cantwell,1991),(Trillo ,2017)

Kompozit malzemeler, çeşitli kara, deniz ve havacılık araçlarında yapı elemanı olarak kullanılmasının yanı sıra, etkin balistik koruma için zırh çözümlerinin önemli bir parçasıdır. Kompozitler, spesifik uygulama alanı nedeniyle farklı enerji seviyelerinde darbe yüklemesine maruz kalabilir. İşletme ve bakım faaliyetleri sırasında düşürülen aletlerden kaynaklanan düşük enerjili etkilere, dış malzemelerin çarpmalarından

kaynaklanan ara enerji etkilerine karşı yeterli koruma için uygun bir tasarım ve üretim süreci gereklidir (Sutherland,2005) (Freitas,1998). Fiber takviyeli kompozit malzemeler, yüksek özgül mukavemetleri, ağırlık azaltmaları ve üretim kolaylıkları nedeniyle havacılık, denizcilik endüstrileri ve kara platformlarında kullanılmaktadır (Aslan,2003),(Gómez,2005),(Cheon,1999),(Evcı,2012)

Kompozit borular, ağırlık azaltımından artırılmış mukavemet ve dayanıklılık özelliklerine kadar geliştirilmiş özellikleri nedeniyle başta fosil enerji endüstrisi olmak üzere havacılık, otomotiv, altyapı, basınçlı depolama gibi endüstri uygulamasında, kimyasal içeren akışkanların iletimi ve taşınımı, endüstriyel atıkların taşınması ve geri dönüşümü, deniz suyu tahliye uygulamaları, petrol ve gaz iletim hatları, denizaltı doğalgaz boru hatları ve basınçlı kanalizasyon hatları gibi mühendislik alanında kullanılmaktadır. Genel olarak, düşük hızlı darbeye maruz kalan metaller, bozulmadan önce plastik davranış gösterir ve malzemeyi tavlayarak ve/veya yeniden işleyerek deformasyon/hasarın etkilerini ortadan kaldırmak mümkün olabilir. Ancak bu yükler kompozit borularda bazen gözle muayene ile fark edilemeyen potansiyel hasarlı bölgelere neden olabilir. Bu nedenle darbe sonrası dayanım azaltma mekanizmasının netleştirilmesi ve iyileştirilmesi gerekmektedir. (Gemi vd,2016) Ayrıca enine darbe yükleri malzemede fark edilmeyen hasarlara neden olabilir. Kalınlık yönünde lif bulunmadığından bu yön kompozitin zayıf yönüdür. Ayrıca çevresel koşullar sırasında kompozitlerde matris, fiber ve fiber-matris ara yüzey bölgelerinde bozulma olması beklenir. (Deniz vd,2013)

Kompozit malzemeler genellikle bileşenlerinin yapıştırılmış veya mekanik olarak sabitlenmiş bağlantılar kullanılarak bir araya getirilmesini gerektirir (Sayman vd,2013).

Kompozit yapılar, artık mukavemetlerini büyük ölçüde azaltan darbelere karşı özellikle savunmasızdır. Havacılık endüstrisi sertifikasyonu, hasar tolerans kavramı (Abrate,1998), (Rouchon),(Hull,1993),(Bouvet,2016) olarak bilinen bu yapıların darbe hasarı tespit edilebilirliğine bağlı olarak darbe direncinin kanıtına ihtiyaç duyar. Bazı yazarlara göre, çarpma sırasında ayrılan katmanların burkulması, nihai göçmeden sorumludur ve daha sonra yapıyı artık mukavemeti yönlendirir. Aynı zamanda, özellikle darbeleri tarafta, hasar alanının sınırında bir gerinim (veya stres) konsantrasyonu gözlemlenir. Gerinim konsantrasyonu sıkıştırma kırılma gerinmesine ulaştığında, çatlak yayılır ve yapının nihai göçmesine yol açar (Rivallant vd, 2013),(Chen vd ,2002),(Li vd, 2016),(Suemasu vd, 2008) (Ostre vd, 2016)

CNT ler sarılmış grafit tabakaları olarak düşünüldüğünden nanolif, MWCNT ve SWCNT olarak mükemmelliğe doğru sıralanabilir, fakat malzeme üretiminde önemli yapısal farklılıklar meydana getirir. (Sinnott vd,2001)

Karbon nanotüpler üzerinde yapılan çekme ve eğme testlerinde yüksek mukavemet ve young modülü elde edilmiştir. Ayrıca eğme testlerinde kompozit borularda dikkati çekecek şekilde esneklik gözlemlenmiştir. Nanotüplerin yüksek mekanik performansının günlük malzemelere uygulanmasıyla mükemmel sonuçlar elde edilmiştir (Demczyk vd,2002). Karbon nanotüpler sarılmış grafit tabakaları olarak düşünülebilir.

Nano yapılı malzemelerin işlenmesi, mükemmel özelliklere sahip 100 nm'den küçük tane boyutuna sahip dökme malzemelerin üretimini içeren nano teknoloji olarak adlandırılan gelişmekte olan bir alanın bir parçasıdır (Vasyukiv vd,2003),(Gleiter vd,1993),(Mayo vd,1993) Nano kristal seramikler, düşük yoğunluklu, yüksek sertlik ve mükemmel termal stabiliteye sahip olsalar da kırılabilirlikleri yapısal malzeme olarak kullanımını engellemektedir (Samal vd,2008). Karbon nanotüpler kompozit yapılar için güçlü, hafif ve yüksek tokluğa sahip takviye lifleri olarak kullanılabilecekleri yeni teknolojik alanlar (Sun vd,2004) açarak nanoteknolojiye (Hammel,2004) giden yolu açmıştır. Nanotüpler, ya bir grafen tabakasının içi boş bir tüp oluşturmak üzere yuvarlanmasıyla tanımlanan tek duvarlı (SWCNT'ler) ya da basitçe eş merkezli grafen katmanlarından (Peigney vd,2010) oluşan ve genellikle her iki ucunda kapaklı olan çok duvarlı nanotüpler (MWCNT'ler) olarak bulunur. Sentez yöntemine ve koşullarına bağlı olarak, SWCNT'ler ve MWCNT'ler yüksek yapısal mükemmellik ile elde edilebilir. CNT'leri seramik kompozitlerde kullanmanın ilgisi, onların müthiş mekanik özelliklerinden (Wong vd,1997), yani SWCNT için 1470 GPa'ya kadar Young modülü (Yu vd,2000) ve MWCNT'ler için 950 GPa'ya kadar (Yu vd,2000) kaynaklanmaktadır. Uzunluk/çap oranı yüksek (en-boy oranı 1000 veya üzeri) ve küçük çaplı (yüz nanometreden fazla olmayan) CNT'ler olağanüstü mekanik özelliklere sahiptir (Zhan vd,2003),(Zhu vd,2008) Nano takviyelerden CNT ile farklı sentezlemelerle kompozit malzemede yüksek yapısal mükemmellik elde edilebilir. CNT ler seramik kompozit malzemelerde SWCNT ve MWCNT olarak kullanıldığında sırasıyla 1470 GPa,950 GPa' a kadar elastisite modülü elde edilebilir (Bocanegra vd,2011)

Seramik matrislerde takviye malzemesi olarak çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT) veya tek duvarlı karbon nanotüplerin (SWCNT) kullanılması, yüksek mekanik özelliklere sahip kompozitler oluşturabilir. Konvansiyonel sinterleme ile

ağırlıkça %0.01 MWCNT veya ağırlıkça %0.01 SWCNT ilavesi ile yoğun monolitik alümina (Al_2O_3) ve zirkonya ile sertleştirilmiş alümina (ZTA) kompozitleri hazırlandı ve mekanik özelliklerin CNT' lerin dağılımına bağlı olduğunu gösterildi. SWCNT' lerle güçlendirilmiş Al_2O_3 seramiklerinin kırılma tokluğu, MWCNT' lerle güçlendirilmiş olanlardan önemli ölçüde daha iyi olduğu tespit edildi. Bununla birlikte, MWCNT ile güçlendirilmiş ZTA' daki kırılma tokluğu, toklaşma etkeni içermeyen ZTA' ya göre %41 ve SWCNT' lerle güçlendirilmiş ZTA' ya göre %44 arttı. İyi dağılmış ve az miktarda MWCNT, ZTA kompozitlerinde kırılma tokluğunun artması için yeterliydi. MWCNT ve SWCNT lerin takviye malzemesi olarak kullanılması seramik matrislerde mekanik özellik açısından fark oluşturur. Ağırlıkça %0.01 MWCNT veya ağırlıkça %0.01 SWCNT ilave olarak zirkonya takviyeli alüminada (ZTA) CNT' lerin matris dağılımı ve seramik fazlardaki etkileşimi incelendiğinde SWCNT' lerin ZTA' daki kırılma tokluğu %44 MWCNT' lerin ZTA' daki kırılma tokluğu %41 olduğu deneysel olarak açıklandı. (Bocanegra vd,2011)

Kompozit malzemelerde karbon nanotüp ilave edilerek bazı mekanik ve fiziksel özellikleri güçlendirilen çalışmalar yapılmıştır. Araştırmalar elektrik iletkenliği ve yüksek mukavemet üzerinde yoğunlaşmıştır. Peigney ve ark yaptıkları çalışmada çift duvarlı karbon nanotüp DWCNT /nano yapıya sahip magnezyum kompozitlerde tokluk ve mikrosertlikte artış gözlemlenildi. SWCNT' nin MWCNT' ye göre daha çok tercih edilir. (Bocanegra vd,2011), (Peigney vd,2010)

Karbon nanotüplerle güçlendirilmiş kompozitler üzerinde yapılan çalışmalar geliştirilmiş elektrik iletkenliği, optik cihazlar ve daha yüksek mukavemet için polimer matris malzemeler üzerinde yoğunlaşmıştır (Sun vd,2004) Öte yandan Peigney ve ark. çok yakın tarihli bir araştırmada, çift duvarlı karbon nanotüpler (DWCNT' ler)/nano yapıya magnezia kompozitlerinde hem tokluk hem de mikrosertlikte bir artış elde etmişlerdir. Çok yüksek konsantrasyonlarda CNT' nin homojen dağılımını elde etmenin çeşitli zorlukları vardır (Samal vd,2008)

Bazı yazarların bildirdiği kadarıyla SWCNT tercih edilir, MWCNT çok kolay duvarlar arası kayma sergileyebilir, Bununla birlikte, SWCNT' de genellikle birbirine göre kolayca kayabilen zayıf Van der Waals etkileşimi gibi bir sorunu vardır. Bu nedenle, demetler arası bu kayma, SWCNT'nin yük taşımasını sınırlar, bu nedenle mekanik performansları bireysel CNT' lerinkinden çok daha düşüktür (Kis vd,2004)

Kevlar ve bazalt kumaşları ile güçlendirilmiş hibrit termoplastik kompozit zırhların balistik performansı, genel istifleme dizisine bağlıdır. Her bir yüksek

performanslı balistik lifin belirli özellikleri diğer liflerden farklıdır. Örneğin, aramid (Kevlar) lifleri, cam/karbon liflerinden daha yüksek lif-lif sürtünmesi sunar. Bu, merminin dış ceketini çıkarttırmak için iyi bir özelliktir. (David vd,2009), (Iannucci vd,2011) Jang et al., grafit kompozite sert ve yüksek gerilimli kırılmaya dayanıklı liflerin eklenmesinin daha iyi bir enerji emme kapasitesi ve darbe yüklemesine karşı iyi bir hasar direnci sağladığını tespit etmişlerdir. İstifleme sırasının delaminasyonu ve plastik deformasyonu kontrol etmede önemli bir rol oynadığı sonucuna varmışlardır. (Jang vd,0989)

Yüksek hızlı balistik darbe koşulları altında laminatlarda aşamalı hasar/arızanın hesaplamalı analizlerini sağlamak için düz dokuma kompozit laminatlar için kat seviyesinde malzeme oluşturu bir model geliştirilmiştir. Kompozit malzemeler, diğer birçok malzeme sınıfına göre üstün sertlikleri ve mukavemet-ağırlık özellikleri nedeniyle bu role çok uygundur. Kompozitler, II. Dünya Savaşı'ndan bu yana personel ve araç korumasında etkin bir şekilde kullanılırken, patlama ve balistik çarpmanın neden olduğu hasarın ilerlemesini ve nihai başarısızlığı modellemek ancak 1980'lerden beri geliştirilmiştir. (FongYen,2012).

Balistik darbe sırasında, kompozit laminatlar, öncelikle liflerin eksenel gerilim/basınç, zımba kesme ve ezilme yüklemesi altındaki arızası nedeniyle enerjiyi emer. Darbe yükü altında kompozit malzemelerin hasar modellemesi çok sayıda çalışmanın konusu olmuştur. Darbe esnasında laminant kompozitlerin basma, çekme ve kayma gerilmeleri ile enerji emerek hasar modellemeleri üzerinde farklı çalışmalar yapılmıştır. (Abrate vd,1994),(Richarson vd,1996),(Choi vd,1990),(Davies vd,1995) Daha önceki çalışmalar yüksek oranlı darbe esnasında kompozit malzemelerin sertlik ve mukavemet açısından gerinim oranı duyarlılığı göstermiştir. (Harding vd,1998),(Al-Hassani vd,1998)

Yapılan çalışmalar, patlama ve balistik darbe gibi yüksek oranlı yüklemelere maruz kalan belirli kompozit malzemelerin hem sertliklerinde hem de mukavemetlerinde önemli bir gerinim oranı duyarlılığı sergilediğini göstermiştir. Yüksek gerinim oranı koşulları altında kompozit malzemelerin mekanik davranışının deneysel karakterizasyonu literatürde (Harding vd,1998), (Al-Hassani vd,1998) bildirilmiştir. Dokuma cam ve aramid kompozitler gibi bazı koruyucu malzemelerin önemli oranda hız hassasiyeti sergilediği gösterilmiştir (Harding vd,1979),(Welsh vd,1985)

%10 ve %20 zirkonya (ZrO₂) takviyeli yüksek etkili akrilik reçinenin enine mukavemetini, darbe mukavemetini, yüzey sertliğini ve su emilimini değerlendirme ve

amacıyla yapılan çalışmada zirkonyanın biyouyumlu olduğunu ve dolgu olarak zirkonyanın diğer metal dolgu maddelerine göre ek avantajının üstün estetik olduğunu göstermiştir. (Ayad vd,2008), (Zuccari vd,1997) (Asopa vd,2015)

Aramid lifleri inorganik liflere karşı daha iyi darbe direncine yol açan daha yüksek kopma uzamasına sahiptir (Park vd,2003). Bununla birlikte, havacılık yapısında aramid elyaf kompozitlerin artan kullanımı ile, hizmet ömrü boyunca bu tür bir hasarla karşılaşma olasılığı çok yüksek olduğundan, düşük hızlı darbe performansına da daha fazla dikkat edilmelidir. Ayrıca, aramid fiber kompozitlerin darbe hasar mekanizmaları, karbon fiber kompozitlerinkinden belirgin şekilde farklıdır (Kang vd,2000),(Yang vd,2013)

Termoplastik poliamidler, uçak, uzay, otomotiv ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle düşük yoğunluğa, ince mukavemete ve ısı stabilitesine sahiptir (Drobny vd,2014), (Kausar,2017),(Katunin vd,2016). Bu bağlamda alifatik (naylonlar) ve aromatik (aramidler) poliamidler yüksek performanslı endüstriyel malzemelerde uygulanmaktadır Endüstriyel kasklar için önemli bir karbon fiber/p-aramid kompozit uygulaması bulunmuştur (Kim vd,2019)

Özellikle tek yönlü lamine plakalar, matris çatlakları, delaminasyonlar ve fiber kırılmaları gibi önemli hasarlarla sonuçlanan enine darbe yüklerine karşı oldukça hassastır. Bu nedenle kompozit malzemelerin ve yapıların darbe tepkisini anlamaya ve iyileştirmeye yardımcı olmak için birçok çalışma yapılmıştır (Abrate,1991),(Cantwell vd,1991), (Abrate,1994), (Richardson vd,1996), (Bibo vd,1996) Darbe enerjisi yükseldikçe birincil hasar modunun fiber kırılması olduğu küçük darbeleri enerjilerde hasar modunun delaminasyon ve matris çatlaması olduğu ortaya konulmuştur. Karbon/epoksi hibrit laminat kompozisyonlarının diğer hibrit kompozisyonlarına göre yük taşıma kapasitesinin daha yüksek bulunduğu gözlemlenmiştir. (Hosur vd,2005) (Aktaş vd,2009)

Kompozit malzemelerde düşük hız etkisi önemlidir, çünkü malzemenin içindeki hasar mukavemette azalmaya neden olur. (Freitas vd,1998),(Moura vd,2004),(Sutherland vd,2005),(Abrate,1991),(Cantwell vd,1991),(Ibekwe vd,2007),(Hosur vd,2005)Araştırmalar katman sayısının kompozit laminatlarda enerjiyi dağıtma sistemi için önemli husus olduğunu vurgularlar. Sutherland ve Soares, kompozitlerde hasar aşamalarını delaminasyonsuz, delaminasyonlu ve lif hasarı olarak tanımlamışlardır (Sutherland vd,2005).

Sorrentino ve arkadaşları yaptıkları çalışmada termoset reçine ile emdirilmiş Kevlar29 dokuma kumaşlarından meydana gelen kompozit malzemede darbe performansı ve balistik kritik hızını tahmin etmek için matematik model oluşturmuştur. Dokuma kumaş kullanılması lif demetlerinin iç içe geçmesi sebebiyle gerilim, basma ve darbe yükleri altında yüksek gerilme-kırılma oranlarına sahip olması kompozit malzemede farklı mekanik özellikler gösterir. (Sorrentino vd,2015)

J.G.Carrillo ve arkadaşları çok katmanlı Kevlar (aramid) kumaş/polipropilen (PP) kompozit laminat (CL) ve düz katmanlı aramid kumaş (AF) darbe örneklerinin balistik özelliklerini araştırdılar. Polipropilen matrisin, yakın yoğunluğa sahip düz katmanlı aramid kumaş örneği ile kıyas edildiğinde kompozit laminatların balistik performansında artış yaşandığı ve polipropilen matrisin eklenmesi sonucunda aynı özellikleri elde etmede daha az aramid kumaş ihtiyacı gerekli olduğu bulundu. (Carrillo vd,2012)

Bu çalışmada hibrit nano kompozitlerin üretim ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Hibrit nano kompozitler, epoksi reçine içine gömülmüş bor nitrür nano platelerden (BN) ve çok duvarlı karbon nano tüplerden (MWCNT) oluşur. Elastisite modülü ve çekme mukavemeti değerleri, çekme testleri ile elde edilmiştir. Nano kompozitler, nano veya moleküler boyutlu parçacıkların matris malzemelerine gömüldüğü ve çok düşük konsantrasyonlarda performans iyileştirmesine neden olabilen bir kompozit malzeme şeklidir (Dagani vd,1999) Knt'ler yüksek bir Young modülüne ve mükemmel elektriksel ve termal iletkenliklere sahiptir (Treacy vd,1996),(Zettl vd,1997),(Kim vd,2001),(Berber vd,2000). Karbon nanotüpler (CNT), yüksek özgül yüzey alanları nedeniyle dikkatleri üzerine çekmiş ve polimerlerin modifikasyonu için kullanılmıştır. Ayrıca, geleneksel kompozitlerin matrisinin modifikasyonu için nano partiküller kullanıldığında, iyi arayüzeysel bağlanma nedeniyle enerji absorpsiyon özelliklerinin değiştiği bildirilmektedir(Han vd,2006),(Vlasveld vd,2005),(Liu vd,2005) Öte yandan, bir matriste nano boyutlu takviyelerin bir sonucu olarak çatlak sehiminin toklaşmada önemli bir rolü olduğu bildirilmiştir(Faber vd,1983),(Faber vd,1983).Nano dolgular, nano partiküller veya nano trombositler orijinal yön boyunca çatlak yayılmasını durdurabilir (Sun vd,2009)

Demirci ve arkadaşları bu çalışmada, araştırma çalışmalarına ve literatüre katkı sağlamak amacıyla karbon, kevlar ve cam elyaflara alternatif oluşturmak amacıyla $\pm[55]_6$ filament sargılı halka kompozitinde takviye malzemesi olarak bazalt elyaf kullanmıştır. $\pm[55]_6$ filamentle sarılmış BFR/Epoksi halka kompozitlerinin epoksi matrisine SiO₂ nano parçacık ilavesi, %27,7–30.3 aralığında çember çekme gerilimi

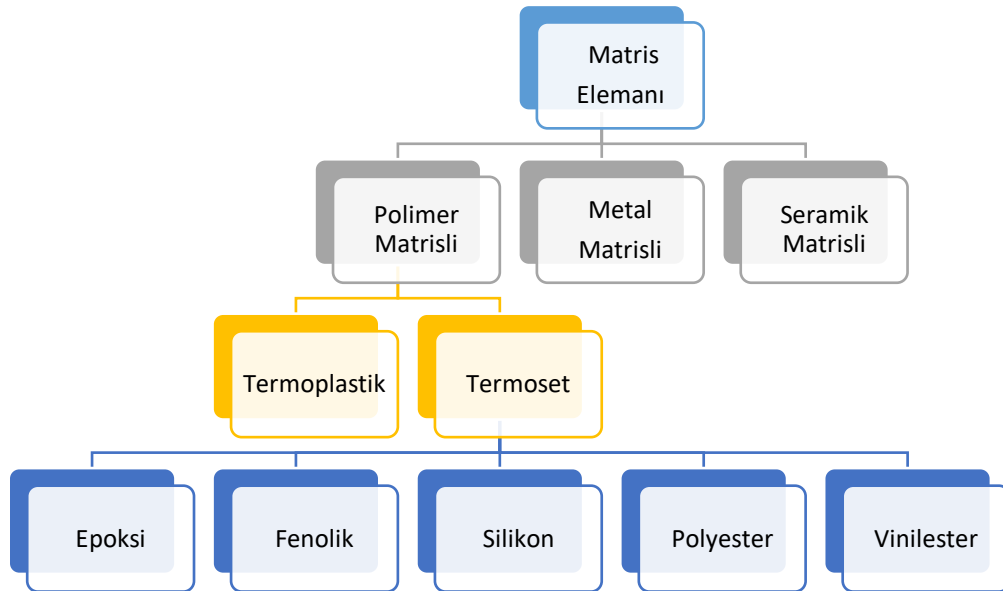
sonuçları vermiştir. SiO₂ nano parçacıklarının ağırlıkça %4 ilave seviyesinde mod I kırılma tokluğunda %43-50'lik etkili bir artış elde edildi. SiO₂ nano parçacığının sağladığı epoksi matriste çatlak dallanması, matris çatlaması, bağ ayrılması, delaminasyon ve elyaf kırılması başarısızlıkları mikroskop ve SEM analizi ile gözlemlenmiştir. Özel yüzey alanı, maliyeti, etkileşim kabiliyeti, mukavemeti, modülü, kırılma tokluğunu ve çizilme direncini arttırması nedeniyle en çok tercih edilen nano parçacıklardan biri SiO₂ nanoparçacıktır. (Demirci,2015),(Deng vd,2007),(Brunner vd,2006),(Han vd,2006),(Arabli vd,2013),(Tzetzis vd,2012),(Phonthammacha vd,2012),(Demirci vd,2017)

3. KOMPOZİT MALZEMELER

İki veya daha fazla malzemenin makroskobik düzeyde aralarında herhangi bir kimyasal işlem gerçekleşmeksizin her iki malzemenin en iyi özelliklerini alarak yani bir malzeme oluşturma işlemine kompozit denir. Kompozitler matris ve takviye elemanı malzemesinin bulundukları geometrik ve fiziksel büyüklüklerine göre sınıflandırılırlar.

3.1. Matris fazına göre kompozitlerin sınıflandırılması

Matrisler takviye elemanlarını bir arada bulunmasını sağlar. Matris ayrıca, yüksek nem koşulları altında darbe direncinin azalması (Bazhenov ,1997) ve ultraviyole radyasyonun neden olduğu foto-bozunma nedeniyle mekanik özelliklerin azalması gibi çevresel faktörlerden lifleri koruyabilir. (Dobb vd,1993), (Liu vd,2011),(Carrillo vd, 2012) Polimer matris, seramik matris ve metal matris olmak üzere 3 kısma ayrılır. Şekil 3.1 de verilmiştir.



Şekil 3.1 Kompozit malzemelerin matris fazına göre sınıflandırılması

3.1.1. Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler kolayca şekillenebilme, maliyet açısından uygun, Young modülünün düşük olması ve kullanım sıcaklığı düşük olması sebebiyle pek çok araştırmacı tarafından kullanılır. Polimer matrisli kompozitler sadece havacılık ve askeri sektörler gibi yüksek teknolojiye endüstriyel uygulamalarda değil, aynı zamanda sağlık gereçleri gibi düşük teknolojiye endüstrilere de girmiştir. Polimerik kompozit pazarı, demiryolu, karayolu, hava ve deniz taşımacılığı, askeri, havacılık, belediye, enerji üretimi

ve iletimi, sivil ve altyapı, petrol ve petrol, spor ve eğlence sektörlerinden oluşan geniş bir endüstriyel sektör yelpazesini kapsamaktadır. (Rafiee ,2016)

Polimer matrisli kompozitlerde kendi aralarında üç kısımda incelenir. Bunlar termoplastik, termoset ve elastomer olarak polimer matrisli kompozit sınıflandırılır. Termosetler, mer molekülleri ile kimyasal reaksiyona girerek güçlü bağ yapısına sahip polimer molekül olarak bilinen matris malzemesidir. Oda şartlarında sıvı fazdadır. Matris olarak kullanılabilmesi için reçine içerisine sertleştirici ve katalizör katılımı ile ekzotermik bir reaksiyona girmesi gerekmektedir. Kurlenme sonrası geri döndürülemez katalitik bir süreçtir.

Termoplastikler termosetlerin aksine çapraz bağ oluşturmayıp zayıf van der waals bağları oluştururlar. Bu nedenle rijit bir yapıda değildir. Isıtıldıkları zaman yumuşar, erimeye başlar ve soğutuldukları anda katı faza dönüşürler. Kimyasal bir süreç içermeyip fiziksel sürece tabidirler. Bu da termoplastiklerin avantajlarındanıdır. Termoplastik poliamidler, uçak, uzay, otomotiv ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaları nedeniyle düşük yoğunluğa, yüksek mukavemete ve ısı stabilitesine sahiptir. (Drobny,2014), (Kausar,2017),(Katunin,2016) (Kausar,2019)

Elastomerler, termoset polimerlere benzer olarak çapraz bağa sahip olan uzun zincir moleküllerinden teşekkül eder. Düşük gerilmeler altında yüksek elastik deformasyon yeteneğine sahiptirler. Gerilmeler ortadan kalktığı zaman tekrar eski haline dönebilen polimerlerdir.

Fiber takviyeli polimer kompozitler genel itibariyle burkulmaya meyilli düşük kalınlığa sahip tabakalı yapılardır. Kompozit malzemedeki lamine yerleşimleri malzeme seçimi, tabaka kalınlığı, tabaka oryantasyonu ve istifleniş sırasına göre farklılıklar gösterir. (Kere,2012) (Katajisto vd,2016)

Fiber takviyeli polimer kompozit malzemeler, geleneksel metalik malzemelere kıyasla daha yüksek sertlik/ağırlık ve mukavemet/ağırlık oranları nedeniyle birçok yapısal uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, kalınlık boyunca takviye eksikliği, onları matris çatlağı, delaminasyon ve elyaf kırılmaları gibi hasarlarla sonuçlanan enine darbe yüklemesine karşı oldukça hassas hale getirir. Ayrıca, sertlik ve basınç dayanımının azalmasına neden olan bu arızalar bazen gözle fark edilemeyebilir. Bu nedenle kompozit malzeme ve yapıların darbe tepkisini anlamak için birçok çalışma yapılmıştır(Abrate,1998),(Abrate,1991), (Cantwell vd,1991),(Abrate,1994), (Icten vd,2009)

Polimer matrisli kompozitler (PMC'ler) daha hafif, daha güçlü ve güçlendirilmemiş polimerlerden veya geleneksel metallerden daha sert oldukları için çekicidir ve özelliklerinin ve biçimlerinin belirli bir uygulamanın ihtiyaçlarını karşılamak üzere uyarlanabilmesi gibi ek bir avantaj sağlar. Karbon, bor, grafit ve Kevlar gibi yüksek performanslı lifler, yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen ve korozyona geleneksel metallerden veya plastiklerden daha iyi direnç gösterebilen askeri ve havacılık kompozit uygulamaları için en çok ilgi çekenlerdir. PMC'ler, askeri uygulamalarda, yabancı cisim darbe yüklemesine direnmek için yaygın olarak benimsenmiştir. Balistik çarpma sırasında, PMC, kompozitin deformasyonu, delaminasyon ve katmanlar arasında kesme gibi farklı mekanizmalar yoluyla kinetik enerjisini emerek mermiyi geciktirir. Balistik limit olarak da adlandırılan perforasyon koşulu, uygun bir koruyucu yapı tasarlamak için kesinlikle en önemli faktördür. Kompozitin koruyucu bir yapı olarak etkin bir şekilde kullanılması için kompozit yapıların dinamik davranışını ve ilişkili hasar mekanizmalarını anlamak önemlidir.(Ramadhan vd,2013)

Son yüzyılda, fiber takviyeli polimer (FRP) kompozitler, üstün özgül mukavemetleri ve sertlikleri nedeniyle yarı statik yüklemeye maruz kalan yapısal bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, birçok durumda, havacılık, boru hatları ve askeri uygulamalarda kullanılan kompozit yapılar, darbe veya patlama olaylarına maruz kaldıklarında yüksek gerinim oranlı yüklemelere eğilimlidir (Hancox ,2000),(Abrate,1998). Bu bağlamda, kompozit bileşenlerin performansı, metaller gibi diğer sünek malzemelerle karşılaştırıldığında genellikle zayıf ve kırılgandır. Bu tür gevrek kırılmanın en önemli nedenlerinden biri, matris enine çatlaması veya fiber/matris arayüz bağlarının ayrılması nedeniyle kompozitlerin zamanından önce bozulmasıdır. Kompozitlerin zayıf tabakalar arası kesme mukavemeti ve tokluğu, yüksek gerinim oranlı uygulamalarda kullanımlarını sınırlamıştır. (Soliman vd,2012)

3.1.1.1. Reçineler

Polimer esaslı reçineler kompozit malzemelerin matris kısmını oluşturur. Fiberleri bir arada tutar. Malzeme gelen yükü fiberlere dağıtır. Darbelere ve hasarlara karşı fiberleri korur. Kompozit malzeme üretirken uygun reçine seçimi önemlidir. Reçinenin elyaf ile uyumu hasar mekanizmasına doğrudan etki eder. Ek olarak kompozit malzemelerde kullanılması gereken reçine sistemiyle üstün mekanik, yapışma, dayanım ve çevresel etkilere karşı direnç gösterebilme kabiliyeti aranır.

Fiber takviyeli kompozitlerde matris malzemesi olarak kullanılan reçineler polimer bazlıdır. Polimerlerin yapısına baktığımızda birbirini tekrar eden basit birimlerden uzun zincir molekülleri ile oluşmaktadır. Reçineler insan yapımı olduklarından sentetik reçine veya reçine şeklinde adlandırılır. Polimerleri ısı ya verdikleri tepkilerden dolayı termoplastik ve termoset reçine olarak sınıflandırılır. (Yanen,2016) Termoset reçineleri de beş kısımda incelenir. Bunlar epoksi, polyester, vinilester, fenolik ve silikon reçinelerdir.

A. Polyester Reçineler

Polyester matrisler dibazik asitlerin, etilen glikol veya fenoller gibi karışımların yoğunlaşması ile birlikte şekil alır. Dışarıdan bir enerji verilmesi ile kürleşme süreci başlar. Reçine içerisine belli katkı malzemeleri sertleştirici ve süreci hızlandırıcı kimyasal eklentiler yapılır. Kimyasal bir reaksiyondur. Matris polimerleşme sürecinde gerekli reçine oranı ve katkı maddeleri önem arz etmektedir. Reçineler arasında uygun maliyete sahiptir. Uygun elyaflar ile çevresel dayanımı yüksek çıkmaktadır.

B. Epoksi Reçineler

Polimerleşme özellikli termoset reçinedir. Epoksi reçine bir veya birden fazla epoksi grubu içeren ve amino (NH_2), alkol fenol, karboksilik asit, anhidrit ile kürlenene kimyasaldır. Epoksi reçineler kullanım alanlarına göre matris ve yapıştırıcı olarak kullanılır. Epoksiler termoset reçineler arasında en iyi özeliğe sahiptir ancak imalat işlemleri oldukça maliyetlidir. Epoksi reçinelerde 125°C ve 175°C olmak üzere 2 kürleme sıcaklığı vardır.

Termoset reçinelerde en sık kullanılan reçinedir. Yüksek mukavemette takviye malzemelerinin matris malzemesi olarak kullanılır. Epoksi reçineler içerik olarak çok az uçucu madde içerdiğinden dolayı kürleme safhasında çok çekme yaşanmaz.

Avantajları;

- Yüksek mekanik ve termal özellik
- Yüksek su emme direnci
- Uzun çalışma sürelerine sahip
- Yüksek sıcaklıklara direnç
- Kürleme sonrası düşük çekme

Dezavantaj;

- Yüksek maliyet
- Epoksi kürleme esnasında uçucu gazları bünyesinde tutar.

C. Vinilester Reçineler

Vinilester reçineler polyester reçineler ile benzer özellik gösterirler. Takviye elemanı ve matris arasındaki bağ kuvveti iyileştirilmiştir. Polyesterle glikol ile birlikte doymamış hidroksilik bileşenlerin ilave edilmesiyle meydana gelir. Vinilester reçineler; tokluğu arttırıcı, malzemedeki çekmeyi azaltıcı gibi mekanik özelliklere sahip yeni sentez yapıları da kullanılabilir. Kimyasal tesislerde, borularda ve tanklarda kullanımı mümkündür.

D. Fenolik Reçineler

Termoset reçinelerin bir çeşididir. Fenol ve aldehitin katalizör katkısı ile tepkime sonucu fenolik reçineleri oluşturur. Avantajlarından diyebileceğimiz ateşe karşı direnç göstermesi, uzun kullanım ömrünün olması ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımı kendisini kompozit malzeme üretiminde matris olarak kullanımını sağlamaktadır. Yüksek sıcaklıklardaki çalışma durumu kendisini ısı kalkanlarında kullanımını gerektirir. Aleve karşı direnç göstermesi ve yanmayı yavaşlatıcı etki göstermesi bu alanda kullanabilecek malzemeler için uygunluk gösterir.

E. Silikon Reçineler

Silikon reçineler termoset reçineler içerisinde farklı bir yapıda olması içerik bakımından inorganik esaslı silikon bulunduran matrislerdir. Mekanik dayanımları diğer termoset matrislerine göre düşük ve bununla birlikte maliyet açısından yüksek olması kullanım alanlarını kısıtlamaktadır. Yüksek hıza sahip araçlarda matris görevini üstlenirler.

Mekanik özelliklerinin düşük olmasına karşın 250 °C ye kadar uzun süreli çalışabilir. Reçineler arasında maliyeti yüksek olmasına karşın mekanik özellik yönünden su, ısı ve oksitlenmeye karşı dayanımı üstündür. (Yöney, H. 2007).

Silikon reçinelerin avantajlarını şu şekilde sıralayabiliriz (Biron, M. 2013).

- Yüksek alevlere karşı dayanım ve yüksek sıcaklıklarda özellikleri koruma
- Kürleşme için yüksek ısı ve basınç gerekir.
- Farklı sıcaklık uygulamalarında kullanabilmesi
- Uzun süreli ısı kararlılık
- Düşük sıcaklıklarda elastiklik
- Çevresel etkenlere karşı dirençleri

Silikon reçinelerin dezavantajları da şu şekilde sıralanır (Biron, M. 2013).

- Maliyeti yüksek olması
- Düşük sertlikte olması
- Güçlü asitlere karşı dirençli olması

3.1.1.2. FİBERLER

Takviyeli kompozitlerde fiberler, uzunlukları çaplarına nazaran düşük boyutlarda olması sebebiyle matris fazı içerisinde düzenlenmesiyle elde edilir. Fiberler sürekli, kısa, rastgele dizilmiş veya belli bir düzende olabilir. Sürekli fiberler birbirlerine paralel olacak biçimde istiflenir ve doğrultu ekseninde mekanik özellikleri yüksektir. Ancak fibere dik doğrultuda kuvvet uygulanması durumundaki mekanik özellikleri zayıftır. Anizotropik yapılar her yöndeki kuvvetlerin aksine belirli doğrultudaki kuvvetleri karşılar. Bu nedenle mekanik özellikler de farklılık gösterebilir. Kompozit malzemenin her yönde eşit mukavemetli olabilmesi için takviye elemanlarını belirli açılarla istiflenmesi gerekir. Bu ifadede izotropik yapılarda gerçekleşir.

Kompozit malzemelerde takviye elemanı fiber olanlarda uzunluk, yön ve şekli önemlidir. Fiberlerin yönlenmesi de mukavemetin eksen ve açısını belirlemede önemli rol oynar. Takviye elemanı süresiz fiber olan bir yapıda homojen bir şekilde üretimin olması sürekli fiberlere nazaran mukavemetli olur. Sebeplerinden bir tanesi olarak yüzey hatalarının az olması söylenebilir. Bunlar karmaşık yapıdaki olan malzemeler için üretilir.

Takviye fazı olan fiberleri şu 4 başlıkta inceleriz;

- Cam elyaf

- Aramid elyaf
- Karbon elyaf
- Boron elyaf

A. Cam Elyaf

Cam elyaf polimer kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılır. Matris fazı için termoset ve termoplastik reçinelerle kompozit yapı oluştururlar. Cam elyafın içeriği; silisyum, demir, kalsiyum, sodyum, bor alüminyum gibi elementlerin oksit ile kimyasal tepkimesiyle oluşmaktadır. Cam fiberlerde %50-%60 arasında silis (SiO_2) bulunmaktadır. (Yırtımcı,2011),(Kılıçtekin,2020)Polimer bazlı kompozitlerde kullanılan düşük mekanik özellikli takviye elemanıdır. Cam elyaflar, cam seramiklerin 1200 °C - 1500°C ocaklarda ergitilerek camların potadaki deliklerden süzülerek soğutulması sonucu oluşmaktadır.

- Çekme mukavemeti yüksektir.
- Isıl kabiliyetleri düşük seviyededir. Yüksek sıcaklığa temas ettiği zaman elyaflarda bozulma başlar.
- Nem tutmazlar.
- İletkenlik özellikleri zayıftır. Yalıtkanlık istenen kompozit malzemelerde kullanımı uygundur.
- Cam elyaf imalatında silis-kumu içerisine farklı özellikler içeren katkı malzemeleri eklenerek istenen mekanik özellikler elde edilmesi mümkündür. Bunlar A-camı, C-camı, E-camı, S-camı ve R-camı gibi cam elyaf türleridir.

B. Aramid Elyaf

Aramid, bir çeşit naylon olan aromatik poliamiddir. Aramid ismini aromatik poliamidin baş harflerinden meydana gelir. Takviye elemanı olarak kullanılan aramid elyafı piyasada ticari isim olarak Kevlar ve Twaron isimleri kullanılmaktadır. Kullanımı yaygın olan kovaların 3 türü vardır. Kevlar 29, Kevlar49 ve Kevlar 149'dur. Özgül sertlik özelliği Kevlar 49'u öne çıkarması ile bilinir. İleri teknolojik kompozit uygulamalarında kullanımı yaygınlaşmaktadır. Aramid elyaflar avantajlı özellikleri ile bilinir fakat

dezavantajları da vardır. Bazı türleri için ultraviyole ışın, asit ve tuzlara karşı dirençsiz olması, malzemenin kumaş ya da fiber halinde iken kesme ve katlama işlemlerinde zorluk yaşanmakta, matris malzemesi ile uyumlu bir birleşme yapılamaması durumunda bazı küçük çatlaklar oluşması malzemenin su emilmesine dolayısıyla malzemede deformasyona yol açar. Aramid elyaflar askeri alanda, denizcilik, havacılık ve otomotiv gibi sektörlerde çok farklı amaçlarla kullanılırlar. (Mazumdar,2002),(Bakkal,2011), (Chawla, 2011) ,(Asi,2018).

C. Karbon Elyaf

Karbon elyaf imalatında çeşitli yöntemler vardır. İlk ticari faaliyet olarak karbon elyaf piroliz (yanma) ve ısıtma işlemi yoluyla sentetik fiberlerin karbon ve grafit fiberlere dönüştürülerek üretilmiştir. Ayrıca karbon/grafit elyafı üretim işlemi, temel malzeme olarak zift kullanılmıştır. Zift, sıvı kristal zift haline dönüştürülür ve sıvı fazdaki kristal zift, yanma işlemi gerçekleştirilir. Sıvı haldeki ziftten meydana gelen fiberlerin yüksek elastik modüllü takviye özelliği ve yüksek mukavemet değerlerine ulaşabilmesi için ısıya maruz bırakılmakta ve fiberlere evrilmektedir. İlave olarak karbon elyafın sahip olduğu yapısal özellikleri sebebiyle bazı mekanik özellikleri zayıftır. Fiberler sınırlı uzama gerçekleştirdikleri için bazı darbe kaynaklı sorunlara maruz kalmaktadır. Fakat karbon fiberin dezavantajını avantaja çevirecek yüksek uzama özelliği gösteren fiber ürünleri üzerinde çalışılmaktadır. Elektrik iletkenliği bazı kullanım alanlarında sorun teşkil etmektedir. Karbon elyaflar demet, şerit ve kumaş türlerinde imal edilmektedir. Hazır kalıplama işlemlerinde termoplastik ve termoset matris malzemesi olarak kullanıma uygun, kırılmış ya da öğütülmüş halde pazarlanmaktadır. Grafit olarak, çok yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Bakıra göre dörtte bir ağırlığa sahip olan grafit/karbon fiberin termal iletkenliği bakırın termal iletkenliğinden üç, dört kat daha fazladır. Bu özelliğe sahip uygulama alanları geliştirilmektedir. (Cam Elyaf, 2004).

Karbon fiber oda sıcaklığındaki neme, atmosfere, zayıf asit ve bazlara karşı dirençlidir. Düşük sıcaklıklarda, cam ve aramid fiberlere karşı gerilmeli korozyona karşı dayanıklıdır. Yüksek sıcaklıklarda, karbon fiberler diğer fiber türlerine karşı avantajlıdır. Yüksek sıcaklıklardaki oksitlenme de dezavantajdır.

Karbon fiberin özellikleri aşağıda verilmiştir (Chung, 1994; Callister, 2011).

- Fiber malzemeler arasında karbon fiber, en yüksek özgül mukavemete ve elastisite modüle sahiptir.
- Düşük yoğunluğa sahip olması (2,3 gr/cm³)
- Düşük ısı genleşme katsayısına sahip olması
- 3000 °C 'ye kadar oksijensiz durumlarda ısı kararlılıkta olması
- Sürünme direncinin yüksek olması
- Güçlü asitlere karşı kimyasal kararlılığa sahip olması
- Biyolojik malzemeler ile uyumlu olması
- Isı iletkenliğinin yüksek derecelerde olması
- Elektrik direncinin düşük seviyelerde olması
- Aynı formda kullanılabilirliği
- Zamana bağlı olarak azalan maliyet (Bayraktar,2016)

D. Boron Elyaf

Bor fiberin uygulamaları 1960'lı yıllarda karşımıza çıkmaktadır. Elyaf çapının 0,1 mm ile 0,2 mm arasında olması birçok life göre yüksek çekme mukavemeti ve yüksek elastik modülüne sahiptir. Elastik modülü 400 Gpa'dır. [yavaş, 2009]. Çekme mukavemeti 2758 – 3447MPa'dır, Yüksek dayanıma sahip ve maliyeti yüksek olan bor lifleri, metal matris uygulamaları ile kullanılır. Aslında kendi içlerinde kompozit yapıdadırlar. Çekirdek kısmı ince bir filaman üzerine bor sarılarak üretilirler. Çekirdek kısmı karbon veya tungsten olarak uygulanır. Bor elyaflar silisyum karbür veya bor karbür uygulamaları ile yüksek sıcaklıklarda çalışabilir. Bor karbür uygulaması çekme mukavemetini yüksek anlamda artırır. (Can,2019). Uçak ve roket gövdelerinde, otomobil kaportaları, uzay mekiğinin orta gövde imalatında, savaş uçaklarının kuyruk kısımlarında kullanılmaktadır. (Ertürk, 2012), (Kılıçtek,2020)

3.1.2.Metal matrisli kompozitler

Matris olarak metallerin seçilmesi birkaç başlık altında sıralarsak; yüksek sıcaklıklarda uygulanması, yüksek basma, yüksek eğme, yüksek çekme dayanımına sahip, özellikle tokluğun yüksek seviyelerde olması ve dayanım/yoğunluk oranının yüksek olması, üstün yorulma dayanımı ve ısı genleşme katsayıları özelliklerinin

sonucunda metal matrisli kompozitlerin geleneksel metal malzemelere göre daha iyi olduğu görülür. Ayrıca elektriksel ve ısı iletimlerinin yüksek olması, geleneksel metal imal teknikleri ile üretilmeleri, neme karşı dirençli olmaları, yanmazlık özelliği bulundurmaları matris malzemesi olarak kullanılmasında etkili olur.

Birincil malzeme olarak titanyum, magnezyum, bakır, alüminyum gibi metaller matris kısmında kullanılır. Bahsi geçen metallerin bor ve silikon karbürlerle takviye edilip sırasıyla 300°C ve 800°C sıcaklık uygulamalarında sorunsuz bir şekilde çalışmaktadır. Magnezyum ve özellikle ısı iletim özelliği yönünden tercih sebebi olan bakırda genellikle kullanılan takviye elemanı grafittir. Metaller takviye elemanı ile mekanik özellikleri iyileştirilse dahi yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybetmeye başladıkları için çalışma sıcaklıkları göz önünde bulundurulması gerekir.

Metal matrisli kompozitlerin uzay ve havacılık alanlarında platformu taşıyan parçalar, uçak iniş takımlarındaki yapısal parçaları, uçak iniş takımlarındaki yapısal parçaları gibi farklı alanlarda kullanılırken otomotiv sektöründe fren diskleri, motor elemanları, mil ve şaft gibi parçaların da metal matrisli kompozitler tercih edilmektedir.

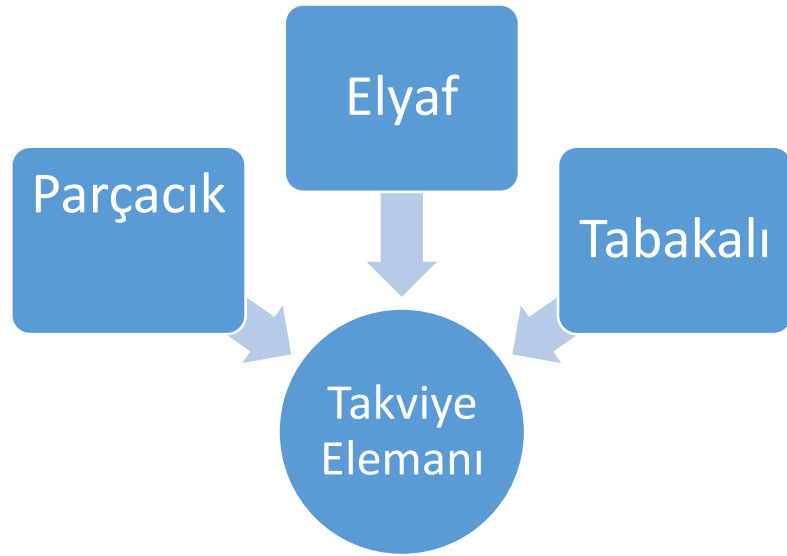
3.1.3.Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitlerin sert matrisli kompozitler olarak adlandırılması 1970 li yıllarda başlamıştır. (Sambell vd, 1972),(Phillips, 1974) Seramikler, bir veya daha fazla metalin yarı metal veya ametal elementler ile birleşmesi sonucunda oluşan inorganik yapıdaki bileşiklerdir. Seramikler bağ yapıları itibariyle kararlı bir yapıdadır. Sert ve gevrek malzemelerdir. Bu nedenle düşük kopma uzaması, düşük tokluğa sahip olmaları ve termal şoklara da dayanıklı olmamaları dezavantajlarındandır. Ancak sürekli fiber ile takviye edildiklerinde dezavantajları tolere edilebilir. Basma dayanımları yüksektir. Yüksek sıcaklıklara dayanım ve hafif olmalarından dolayı kullanışlı hale gelmektedir. Bu özelliklere binaen yüksek sıcaklıklarda çalışan yapılar için kullanımı yapılmaktadır. Seramik matrisli kompozitlerde genellikle takviye elemanı olarak SIC fiberleri, metal üzerinde oluşan küçük çıkıntı ve Al_2O_3 fiberleri kullanılır.

Isı motorları, aşınma parçaları, ısı değiştiricileri, kaplama (özellikle malzemede dış koruyucu kaplama) ve sağlık ürünlerinde kullanılır. Roket motorlarında yapısal eleman olarak kullanılır (Kotil,1991)

3.2. Takviye fazına göre kompozitlerin sınıflandırılması

Kompozitler malzemeleri oluşturan takviye fazı ve takviye fazı formu elyaf takviyeli, parçacık takviyeli ve tabakalı olmak üzere 3 kısımda incelenir. Şekil 3.2 de verilmiştir.



Şekil 3.2 Kompozit malzemelerin takviye fazına göre sınıflandırılması

3.2.1. Elyaf takviyeli kompozitler

Takviye fazı elyaf olan kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemelerin ortaya çıkmasındaki önemli faktör özgül ağırlığa sahip olması ile yüksek dayanım ve elastikliğe sahip olmalarıdır (William D. Callister 8.baskı). Takviyeli kompozit malzemedeki en önemli hususlardan birkaç tanesi şöyle sıralanır (Yanen,2016);

- Mamul üretiminin kolay olması
- İsteğe uygun boyut ve çaplarda üretilmesi
- Üstün kalitede yapısal özellikler

Fiberlerin sahip olduğu özellikler kompozitin özelliklerini belli seviyede artırır. Ancak fiberin önemli olduğu kadar matrisin de önemi vardır. Matris ile elyafın arasındaki uyum,

yük aktarma durumu, ara yüzey arasındaki ilişki kompozit malzemenin üstünlüğünü belirler.

Elyaf takviyeli kompozitlerde fiberler sürekli ve süreksiz olarak 2 kısımdır. Mekanik özelliklere doğrudan etkiler. İzotropik ve anizotropik yapı kompozit malzemede mekanik özellikleri doğrudan etkileyen hususlar arasında yer alır. İzotropik yapıdaki fiberler yatay ve dikey eksendeki yükler eşittir. Anizotropik yapıda fiber yönü ile fibere dik gelen yükler aynı değildir. Kullanım şartlarına göre tasarlanması gerekmektedir.

Kompozit malzemenin elyaf takviyesi mekanik özellikleri belirlemedeki parametreler; elyafın matris içindeki kompozisyonu, dağılımı, konumlandırılması ve yönlendirilmesi olarak ifade edilir.

3.2.2.Parçacık takviyeli kompozitler

Kompozit malzemedeki takviye fazı parçanın içerisinde partikül halinde bulunur. Malzemeye uygulanan yük takviye ve matris fazı tarafından karşılanır. Parçacıklar matris içerisinde belli bir kompozisyon içerisinde bulunmalıdır. Parçacıkların sertliği arttıkça kompozit malzeme üzerinde mukavemet oranı da doğru orantılı artmaktadır. Parçacıklar metal ve seramik olarak iki kısımdır. Metal parçacıklar kompozit malzeme de elektrik ve ısı iletkenliği kazandırır. Seramik parçacıklarda yüksek sıcaklıklarda çalışma dayanımı ve sertlik kazandırır. Parçacıklar Al_2O_3 , SiC, TiC, B alaşım ve metaller kullanılır.

3.2.3. Tabakalı kompozit malzemeler

Tabakalı kompozit malzemeler, farklı özellikte 2 veya daha fazla tabakanın kat kat olacak biçimde istiflenmesi ve yapıştırılarak üretilmesiyle elde edilir. Tabakaların kendisine ait özelliği mevcuttur. Tabakalı kompozit malzemeler tabaka ve ara bağlayıcı matrislerden meydana gelir. Bu sayede kompozit malzemeye sertlik, dayanım, ısı yalıtım ve korozyon ortamlarda kullanılabilme özelliği eklenebilmektedir. Tabaka kullanımında fiberleri belli yüklere dayanım gösterecek şekilde istiflemek mümkündür.

Lamine kompozit yapılar, darbelere ve sonuçta ortaya çıkan hasara karşı çok hassastır. Bu nedenle, kompozit yapılarda darbe yüklemesi büyük bir sorun teşkil etmektedir. Uçak yapılarında, düşen aletler, dolu, pistten atılan molozlar ve kuşlarla çarpışmalar darbe olarak değerlendirilebilir. Bu darbe yüklemesi, yüzeyde görünmeyebilecek, ancak kompozit laminatların mukavemetinde önemli bir azalmaya yol açabilecek geniş yüzey

altı hasarına neden olabilir. Kavisli kabuk, membran kuvvetleri aracılığıyla orta yüzeye dik olarak hareket eden yüklemeye direnebilir. (Mulage vd,2017)

3.3. Hibrit kompozitler

Hibrit kompozit, farklı 2 veya daha fazla elyaf türünün matris elemanı ile üretilmesi ile kompozit malzeme oluşturur. Matris fazı genel itibariyle termoset yapılıdır. Farklı olan özelliklerden düşük olan özelliği farklı elyaf türü ile arttırmayı amaçlamaktadır. Seramik esaslı olan S-camı ve E-camı malzemelerinin yüksek çekme mukavemeti, kimyasal tepkimelere karşı dirençli olmasının yanında yüksek ısıya dayanamamaktadır. İleri kompozit malzeme ürünü olan Kevlar yüksek dayanım, düşük yoğunluk, düşük elastikliğe sahiptir. Benzer olarak karbon fiberler yüksek mukavemet, yüksek elastikliğe sahiptir. Bu elyaflar ile isteğe uygun hafif, yüksek dayanım, korozyona dirençli, yorulma performansları iyi bir hibrit kompozit malzeme üretilir. Savunma sanayinde uçakların yapısal olarak iyileştirilmesinde, İHA VE SİHA gibi insansız savaş uçaklarının gövdesinde kullanımı gün geçtikçe artmaktadır.

3.4. Nano takviye malzemeleri

Kompozitlerde nano takviye elemanları genel itibari ile uzun boyutlara sahip olmazlar. Matris içerisinde parçacıkların en az bir boyutu nanometre (10^{-9} nm) olması durumunda nano takviye olarak adlandırılırlar. Farklı önem arz eden kimyasal ve fiziksel etkileşimlerde yüzey ve yüzey özellikleri vasıtasıyla kontrol edildiği bilindiğine göre, nano boyuttaki takviye elemanının aynı bileşimlerdeki daha büyük yapıdakilerden farklı özelliklere sahip olacağı açıktır. Nano boyuttaki takviyelerin mikro boyuttaki takviyelere göre gerilim transferinde ara yüzey görevi üstlenen çok büyük bir yüzey alanına sahip olmasıdır. Özellikle yüzey alanları ele alındığında 1000 m²/g değerinden daha fazla olan nano takviyelerin en önemli tarafı malzemeye düşük hacim kompozisyonunda bile iyileşmeler sağlandığı görülüyor. Kompozit malzemelerde camsı geçiş ve bozunma sıcaklığında artış yaşanması, çekme ve eğme gibi mekanik özelliklerde de iyileşme sağlandığı bulgular arasındadır. Nano takviyeler karbür ve oksit bazlı olmak üzere iki şekilde karşımıza çıkar. Oksit bazlılar genellikle seramik bazlıdır. SiO₂, Al₂O₃, SiC, AlN, B₄C, TiB₂, TiC nano takviyelere örnek verilebilir. (Arslan, 2016),(Luo vd,2013), (Njguna vd,2008),(Kurtuluş,2016)

3.5. Nanodolgu malzemeleri

Kompozit malzeme üretirken kullanılan nanometre seviyesindeki dolgu malzemeleri olarak yerini alır. Katıldığı kompozite işlenme özelliği kazandırmak, düşük maliyetli karışım yapmak ve renklendirmek gibi farklı amaçlar için kullanılır. Malzemede bazı mekanik özellikleri iyileştirmek için belli nano dolgu maddeleri kullanılır. Silika, nanokil, grafen gibi maddeleri örnek verebiliriz. Takviye edici ve takviye dışı dolgular olarak uygulamaları bulunmaktadır. Takviye olarak kullanılan nano dolgular fiziksel ve mekanik özelliklerinde iyileşme sağlanır. Grafen dolgusu malzemede sertlik, çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerde iyileşme sağlayan malzemelere örnek olabilir. Takviye dışı dolgular malzemeye hacim kazandırma ve maliyeti düşürme gibi amaçları vardır. Kalsiyum karbonat takviye dışı dolgu malzemesi olarak kullanılabilir. (Açar,2021)

3.6.Kompozit malzeme üretimi

3.6.1. Laminat üretimi

Laminat üretimi kompozit üretim tekniklerinin birçoğuna göre üretilebilir, ancak bu üretimde lamine denilen tek kat kumaş fiber elyaflar kullanılır. Kumaşlar, tek, çift yönlü ve çeşitli dokuma tekniklerine göre dokunmuş olabilir. El yatırma, vakum torbalama, direk herhangi bir kalıp üzerine uygulayarak vakuma alınması ve/veya otoklava konulması, sıcak pres kalıplama şeklinde üretilebilir. Üretim koşulları üretim yerinin ortam sıcaklığı üretim yerindeki açık hava basıncı üretim yerinin hava kalitesi eğer kalıp üzerine uygulanacaksa kalıp sıcaklığı, laminat üretimi için düz kalıp levhaların sıcaklığı gibi dış etkenlerin yanında matris olan reçinenin vizkozitesi ve sıcaklığı gibi iç etkenler önemli rol oynarlar. Birinci aşama üretimden sonra sıcak kalıplama ve/veya otoklav içerisinde ise vakum veya cihazların malzemeye uğradığı sıcaklıklar ve zaman periyodu ayrıca çok önemlidir.

3.6.1.1. Fiber takviyeli kompozit laminat üretim teknikleri

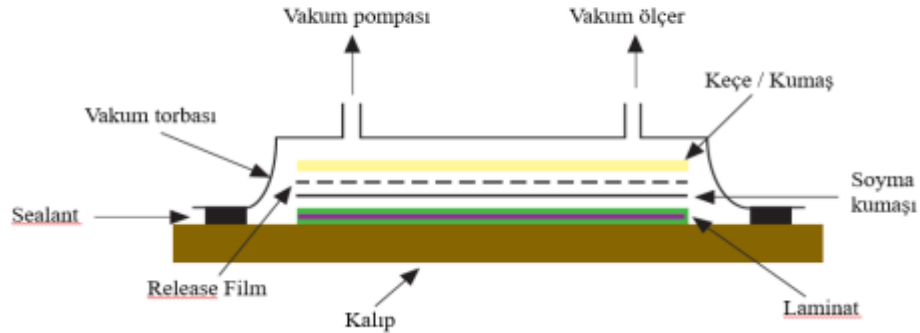
Islak yatırma / El yatırması yöntemi

Bu yöntemde kompozit yapı içerisinde matris görevi görecek olan reçineler fiberlerden elde edilen elyaflara elle emdirilir. Burada fiberlerden elde edilmiş elyaflar dokuma, örme veya dikişli formda olabilir. Reçineler elyaflar üzerine bir rulo veya fırça yardımıyla emdirilir. Kaç kat elyaf kullanılacaksa bu işlem her kat için tekrar edilir. Yapı içerisinde hava kalmaması ve fazla reçineyi yapıdan ayırmak için en son metal bir merdaneyle yapıya bastırılır. Reçineler ile ıslatılan elyaflar atmosferik şartlarda kürlenmeye bırakılır. Bu yöntem için epoksi, polyester, vinilester veya fenolik tüm yaygın reçine sistemleri kullanılabilir. Takviye malzemesi olarak cam ve karbon fiberler yaygın olarak kullanılırken, aramid fiberlerden elde edilen elyafların ıslatılması cam ve karbona göre daha zordur. Islak yatırma veya el yatırması yöntemi çok uzun senelerdir kompozit sektöründe uygulanmaktadır ve bu anlamda öğrenmesi veya öğretmesi kolay bir uygulamadır. Kürlenme şartları atmosferik koşullarda gerçekleştirildiği için diğer üretim yöntemlerine göre alet maliyeti anlamında en ucuz olan yöntemdir. Islak yatırma veya el yatırma yöntemi bazı dezavantajlara da sahiptir. Örneğin, kompozit laminat içerisindeki fiber oranını bu yöntemle ayarlamak çok zordur. Genellikle fiber oranı diğer yöntemlere göre biraz daha düşük olan bu yöntemde, reçinenin az kullanılması yapı içerisinde boşluklara da sebep verebilir. Bu anlamda kompozit yapı içerisindeki reçinenin homojen dağılımını ve fiber oranını ayarlamak bu yöntemde çok zordur. Bir diğer dezavantaj ise özellikle polyester ve vinilester reçine içerisinde bulunan stirenin üretim esnasında havaya karışmasıdır. Zehirli bir gaz olan stiren çalışma alanında olumsuz durumlara yol açabilmektedir. Bu yöntemde kullanılan reçinelerin fiberlerden oluşan elyafları ıslatabilmesi viskozitesinin çok yüksek olmaması gerekmektedir. Reçinenin viskozitesini düşürmek için reçine içerisine eklenecek seyreltici/stiren gibi maddeler oluşacak kompozit yapının mekanik veya termal özellikleri tehlikeye atmaktadır. (Semerciöz,2021)

Vakum torbalama

Vakum torbalama yönteminde el yatırması yönteminde olduğu gibi reçine elyaf yapısı üzerine emdirilir. El yatırması yönteminden farklı olarak reçine emdirilmiş elyaflar

daha sonrasında torbalanarak vakumlanır. Bu yöntemde vakum uygulanarak hem laminat üzerinde bir basınç uygulamak hem de emdirilen fazla reçinenin vakum yardımıyla yapıdan uzaklaştırılması hedeflenir. Elyaf üzerine bir release film onun üzerine de genellikle polyester bir keçe kullanılır. Keçenin görevi hem vakum uygulandığında torba içerisinde havanın hareket etmesi için uygun ortamı sağlamak hem de fazla reçineyi üzerinde toplamaktır. Bu yöntemde de el yatırması yöntemi gibi atmosferik şartlarda kürlenme gerçekleşir. Kürlenme sonrası release film ve üzerindeki keçe yapıdan ayrılır ve kompozit laminat elde edilir. Vakum torbalama yöntemi de el yatırması yöntemi gibi tüm reçine sistemlerine uygulanabilir. Vakum torbalama yöntemi el yatırması yöntemine göre fazla reçine toplanabildiği için daha yüksek fiber oranı sağlamaktadır. Vakum ve vakumun sağladığı basınç sayesinde yapı içerisinde oluşabilecek boşluk oranı daha azdır. El yatırması yönteminde bahsedilen polyester ve vinilester reçinelerin kullanıldığı üretimlerde ortaya çıkabilecek zehirli gazlar bu yöntemde havaya karışması oldukça azalmaktadır. Vakum torbalama yönteminin, el yatırması yönteminden farklı olarak sarf malzemeler kullanılacağı için maliyeti daha fazladır. Çalışabilirliği ve öğrenilmesi el yatırması yöntemi kadar kolay değildir ve çalışanın becerisini gerektirmektedir. Vakum torbalama yönteminin görseli Şekil 3.6.1.1.A.'de verilmiştir. (Semerciöz,2021)

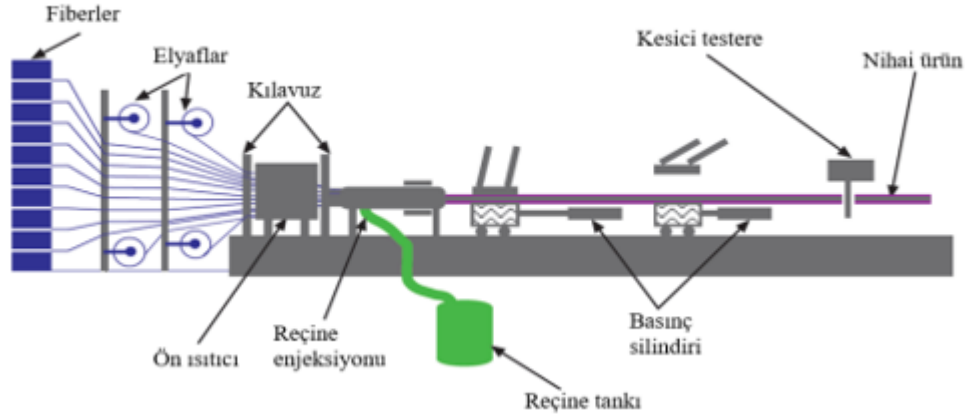


Şekil 3.6.1.1.A. Vakum torbalama yöntemi (Gurit Holding AG,2000)

Pultrüzyon

Pultrüzyon yönteminde fiberler bir bobin askısından çekilirken önce bir reçine banyosuna daldırılır, ardından ısıtılmış bir kalıptan geçirilir. Kalıp, reçine emdirilmiş

elyafın reçine içeriğini kontrol etmeye yardımcı olur. Ayrıca çıkacak nihai ürünün kalınlığı, boyutları yine bu kalıp tarafından belirlenir. Fiber yönlerini tayin etmek için bir kılavuz bu aşamada kullanılabilir. Isıtma işlemiyle de kurlenme işlemi sağlanmış olur. Hattın en sonunda yer alan kesici takım, kompozit laminatın istenilen boyda kesilmesini sağlar. Şekil 3.6.1.1.B.'da pultrüzyon yönteminin görseli paylaşılmıştır.

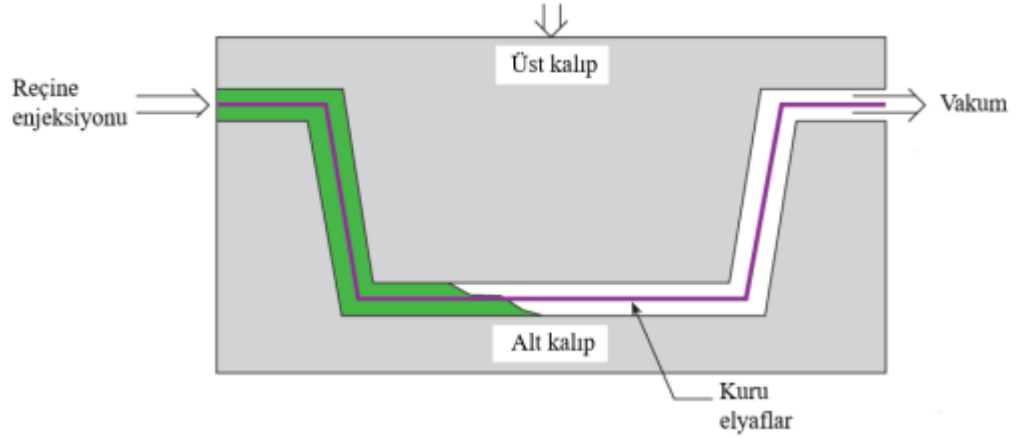


Şekil 3.6.1.1.B. Pultrüzyon yöntemi (Gurit Holding AG,2000)

Pultrüzyon yönteminde genellikle fiber olarak cam fiber, matris olarak polyester reçine tercih edilmektedir. Pultrüzyon yöntemi çok hızlı ve sürekli bir üretim yöntemidir. Kesintisiz olarak beslemeler yapıldığı takdirde kurlenme prosesi de çok hızlı gerçekleştiği için ekonomik bir yöntemdir. Bu proses kapsamında en büyük maliyeti ise ham maddeler dışında ısıtılacak kalıp oluşturmaktadır. Bu yöntemde reçine oranı kontrol edilebilmektedir, bu nedenle yüksek fiber oranlarıyla yüksek mekanik değerlere erişilebilir.

Reçine transfer kalıplama (RTM)

Reçine transfer kalıplama yönteminde elyaflar kuru formda kullanılır. Bu kumaşlar gerekli durumlarda kalıp şeklinde önceden preslenebilir, kalıba alıştırılan kumaşların üretim öncesi serim işlemi bu şekilde kolaylaştırılmış olur. Alt ve üst kalıbın birbirine kapatılması ardından vakum yardımıyla reçine enjeksiyonu sağlanır. Reçine kuru elyafların üzerinden ıslatarak vakum pompasına doğru hareket eder. Tüm elyaflar ıslatıldıktan sonra reçine enjeksiyonu kapatılır ve laminatın kurlenmesi beklenir. Reçine transfer kalıplama yönteminde hem enjeksiyon hem kurlenme aşamaları atmosferik şartlarda veya yüksek sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Reçine transfer kalıplama yönteminin görseli Şekil 3.6.1.1.C'de verilmiştir.



Şekil 3.6.1.1.C. Reçine transfer kalıplama yöntemi (Gurit Holding AG,2000)

Diğer yöntemlerde de olduğu gibi bu yöntemde de epoksi, polyester, fenolik ve vinilester gibi yaygın reçineler kullanılmakta olup, yüksek sıcaklıklarda da proses gerçekleştirebildiği için bizmalemid (BMI) reçinesine kullanılabilir. Fiberlerin bir araya gelerek oluşturacağı elyafların dikişli olması durumunda dikiş bölgelerindeki boşluklar sayesinde reçine akışı daha rahat gerçekleşecektir. Reçine transfer kalıplama yöntemiyle yapı içerisinde boşluk oranı çok düşük, yüksek fiber oranlı kompozit laminatlar elde edilebilir. Reçine kapalı bir ortamda yer aldığı için zararlı gazlar havaya karışmamaktadır. Kompozit laminatın iki yüzeyinde de kalıp olduğu için iki yüzey kalitesi de kozmetik olarak iyi bir seviyededir. Reçine transfer kalıplama yöntemiyle ilgili çekince ise olası hataların çok büyük maliyet kaybına sebep olmasıdır. Reçine ile ıslanmayan ufak bir bölge çok pahalı hurda laminatlara sebep olabilir.

Otoklav kalıplama

Otoklav kalıplama yöntemi önceden reçine entegre edilen elyafların, tekrar reçine enjeksiyonu olmaksızın yüksek sıcaklık ve basınç altında kürlenme prosesine dayanır. Özellikle havacılık sektöründe en çok tercih edilen yöntem olan otoklav kalıplama yöntemiyle yüksek fiber oranına sahip kompleks şekilli parçalar sorunsuz üretilmektedir. Bu işlemde, prepregler istenilen şekillerde kesilir, kalıplara tasarıma uygun olarak serimi yapılır ve ardından vakum ile torbalanır. Vakumla torbalama sonrası sıcaklık ve basınca maruz bırakmak için otoklav prosesi gerçekleşir. Otoklav kalıplama yönteminin işçilik süresi diğerlerine göre daha uzundur. Karbon fiber prepregler otoklav kalıplama yönteminde en fazla kullanılan malzemelerdir. Cam fiber, aramid fiber veya bor fiber prepreglerde bu yöntemde kullanılsa da miktarları karbon fiber prepreglere göre

daha azdır. Bunun ana nedeni, karbon fiber prepreglerle üretilen kompozit yapıların daha hafif ve daha fazla dayanıma sahip olmasıdır. Bu şekilde kütleden tasarruf edilebilmektedir. Ağırlık ki havacılık sektöründeki en önemli faktörlerden biri olduğu düşünülürse, karbon fiber prepregler tercih sebebidir. Prepreg sistemleri içerisinde epoksinin yanı sıra Poliimid, Polisiyanat ve BMI gibi yüksek sıcaklık reçine sistemleri de kullanılmaktadır. Otoklav kalıplama yöntemindeki kalıplar, üzerinde vakum torbalama işlemine müsaade edebilecek açık kalıplardır. Kalıp malzemeleri genel olarak çelik, alüminyum ve kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemeler olarak genelde karbon / epoksi, karbon / BMI, cam / epoksi sistemleri tercih edilmektedir (Mazumdar,2001). Otoklav kalıplama yönteminde kullanılan prepregler -18 °C'de soğuk oda şartlarında depolanır. Üretimde kullanılacağı zaman soğuk odadan çıkarılıp, prepreglerin oda sıcaklığı seviyesine gelmesi beklenir. Oda sıcaklığına geldikten sonra istenilen boyut ve şekilde kesilen prepreglerde daha sonra serim istasyonuna iletilir ve kalıplar üzerine gerekli tasarıma göre serim yapılır. Bu süreçlerin hepsi toz, basınç ve sıcaklık kontrollü temiz odalarda gerçekleştirilir. Prepreg çalışmalarında genellikle tek yönlü UD (0°) malzemeler tercih edilir. Fakat kompozit malzemenin tasarımına bağlı olarak gerekli durumlarda prepregler fabric ismi verilen dokuma elyaf formunda da kullanılabilir. Prepreg serimleri esnasında belirli katlarda tekrar edilerek ara sıkıştırma işlemleri vakum yardımı ile yapılır. Buradaki amaç, prepreglerin birbirine daha iyi yapışmasını sağlamak ve olası hataların önüne geçmektir. Tüm serim bittikten sonra final torbalama işlemi yapılır ve otoklav sürecine ilerletilir. Laminasyon ve torbalama işi tamamlanmış yapı, kürlleme ve konsolidasyon işlemleri için otoklav içerisine yerleştirilir. Otoklavlar torbalaması yapılan kalıplara belirli bir sıcaklık ve basınç uygulayan sistemlerdir. Sıcaklık ve basınç istekleri matris sisteminin türüne, parçanın kalınlığına ve geometrisine bağlı olarak belirlenir (Mzumdar,2001). Laminata iki çeşit basınç uygulanır. Bir tanesi torbalama esnasında uygulanan vakum diğeri dışardan uygulanacak olan basınçtır. Dışarıdan uygulanacak olan basınç, otoklav içerisine enjekte edilecek sıcak hava veya azot ile oluşur. Yanma veya yangın gibi istenmeyen durumların önüne geçilebilmesi için yüksek sıcaklıklarda kürlleme yapıldığı durumlarda genelde azot tercih edilir. Otoklav içerisindeki sıcaklık ve basınç, otoklav dışından bilgisayar destekli ekipmanlar ile kontrol edilmektedir. Basınç seviyesi prepreglere göre değişmekte olup, 3,2 bar ile 7 bar arasında değişmektedir. Otoklav proseslerinde sıcaklık genel olarak 180 °C'lerde tutulur. Oda sıcaklığından bu sıcaklığa ise genelde 2 °C/dakika hızla çıkartılır. İstenilen sıcaklığa çıkarıldıktan sonra bir süre bu sıcaklıkta bekletilip, laminasyonun tam olarak kürlenmesi

gerçekleştirildikten sonra sabit hızla sıcaklık tekrar oda sıcaklığına düşürülür. Günümüz teknolojisinde prepreglerin kalıplara serim işlemi olası insan kaynaklı hataların önüne geçmek için fiber yerleştirme makinalarında gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Prepregler yüksek fiber oranına sahip kompozit malzemelerin elde edilmesine olanak sağlar. Elde edilen kompozit malzemeler %60 fiber oranının üzerindedir ve bu yapının yüksek mekanik özellikler göstermesine sebep olur. Otoklav torbala yöntemiyle basit şekillerden en karmaşık şekillere her türlü geometrinin üretimi yapılabilir. Diğer taraftan dezavantajı olarak, otoklav yatırımı çok büyük bir maliyettir. Bu prosesin işçiliği de uzun olup, prepregler kuru elyaflara göre daha pahalıdır. Bu anlamda üretim hatalarının en aza indirgenmesi beklenir.

Otoklav dışı torbalama – Prepreg

Otoklav dışı prepreglerin kullanıldığı bu yöntemde prepreglerin otoklav öncesi işlemi otoklav torbalama yöntemiyle aynı olup, prepregler 60-120°C aralığındaki sıcaklıklar kürleşebilecek reçine kimyasal sistemine sahiptir. Bu yöntem için kullanılan prepreglerde matris sistemi olarak epoksi reçineler tercih edilmektedir. Bu tarz prepreglerin ömrü, otoklava uygun prepreglere göre daha az olup, bazı katalizörlerin eklenmesiyle uzatılma şansı vardır. Bu yöntemde kullanılan prepreglerin reçine sistemlerindeki akış otoklav ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Otoklav torbalama işlemindeki gibi dış bir basınç ihtiyacı duymazken, torbalama işleminde yapılan vakum basıncı yeterli olmaktadır. Otoklav torbalama yönteminin sağladığı tüm avantajlar bu yöntem için de geçerlidir. Daha düşük sıcaklıklarda ve dış basınç olmadan kürlenme işlemi gerçekleştirildiği için kalıp malzemesi olarak daha ucuz malzemelerin seçimi (tahta gibi) mümkün olmakla birlikte otoklav torbalama yöntemine göre daha ucuz enerji maliyeti de sunmaktadır (Gurit Holding AG,2000)

3.6.2. Boru üretimi

Kompozit borular iki yöntem ile üretilmektedir. Birinci yöntem ön gerdirmeli ve gerdirmesiz filaman sarım yöntemidir. Reçine banyosundan geçirilmiş filaman lifler tek veya çoklu olarak deneysel çalışmalardan tespit edilen en uygun sarım açısı 55° ile bir liner (kapalı tüp veya açık tüp kalıp) üzerine belli kalınlıkta sarılarak imal edilir.

İkinci yöntem ise yine 55° sarım açısı ile veya çeşitli dokuma tipleriyle reçine emdirilmiş (pregreg) veya fırça ve püskürtme yöntemi ile reçineli kumaş fiber malzeme bir silindirik çelik bir kalıp üzerine yine ön gerdirmeli ve gerdirmesiz olarak istenilen kalınlık elde edilene kadar makine yardımıyla sarılır.

3.6.2.1.Fiber takviyeli kompozit boruların üretim teknikleri

Kompozit boruların mekanik olarak geliştirilmesi imalat sanayinde önemli bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır. Kompozit tüpler uygulama sahası genişlemektedir. Otomotiv, savunma sanayinin hava, kara, deniz unsurları için hafiflik ve dayanımlı kompozit geliştirilmesi yakıt verimliliğin artırılmasında önem arz etmektedir. Kimyasal tesislerde kullanılan borular, tank üretilmesi, LPG ve CNG tankı gibi basınçlı kaplar için uygundur. Kompozit borular dayanım, korozyon direnci, yorulma performansları, maliyet, bakım gibi üstün özellikler sebebiyle tercih edilmektedir. Füze kasası, roket motorların kasası kompozit tüplerin uygulama alanlarından birkaç tanesidir.

Kompozit tüplerin farklı sarım açılarında çeşitli üretim yöntemleri uygulanmaktadır. Kompozit tüplerin üretimi, sanayide birçok talebe karşılık verebilmektedir. Savunma, havacılık ve uçak sanayi uygulamalarında hassas üretim yöntemleri kullanılmalıdır. Fiber takviyeli kompozit boruların rulo sarım, çekme örgü ve filament sarım olmak üzere üç farklı imalat yöntemi vardır.

A. Filament sarım işlemi

Filaman sarım işlemi, havacılık ve uzay uygulamalarında, kimyasal tesislerde bulunan hareket eden silindirik millerde ve basınçlı kaplarda içi boş kompozit parçaların üretiminde kullanılır. (Harrison 2000). Filaman sarma tekniği, liflerin reçine içerisinden geçirilerek kılavuz yardımıyla döner silindir üzerine sarılarak kompozit boru üretim yöntemlerinden biridir. Filaman sarma tekniğinin avantaj ve dezavantajları vardır. Yüksek mukavemet, elastik modülü ve elyaf/reçine oranı avantajlardan önemli olanlarıdır. Ancak karmaşık bir silindir üretilmesi durumunda imalatında sıkıntı çıkmaktadır. (Aydın,2019) Bununla birlikte ön emdirilmiş (pregreg) malzemeler ile üstün özellikler elde edildiği için tercih edilmektedir. Malzemeler silindir üzerine serildikten itibaren kurlama süreci uygulanır. Bu şekilde üretim karmaşıklığı azaltır ve maliyeti önemli anlamda düşürür. (Aydın,2019)

Filaman sarım esnasında E-cam, S-cam, karbon, aramid ve hibrit elyaf gibi sürekli elyaf olan takviye malzemeleri ve kesilmiş elyaflar, epoksi, polyester, vinilester, fenolik ve poliüretan reçineler gibi matris malzemeleri kullanılmaktadır

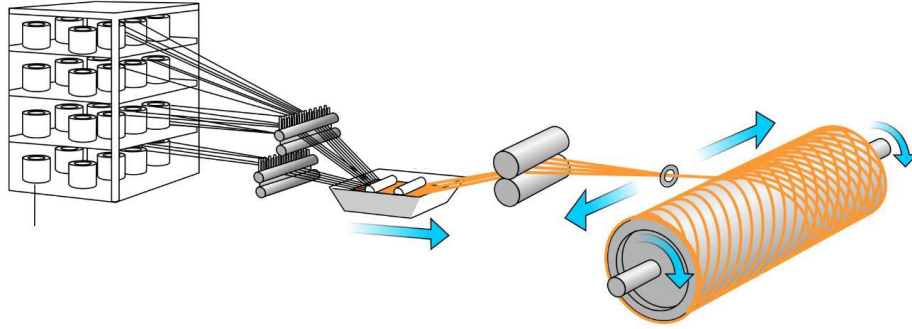
Gergi tertibatı ya da gergi düzenlemek için kullanılan bir sistem ile elyaf fitili tutularak elyaf üzerine gerdirici bir kuvvet uygulanır. Fiberlerin gerilimi, sarım aşamasında filaman sarma makinesinin kontrolü için önemlidir. Gerdirme tertibatının ideal oranda olması fiberin türü ve nasıl sarılacağı tespit edilir. Fiberler üzerindeki gerilimin düşürülmesi, fiberin istifleme sırasında açıklık ve dislokasyonlara sebebiyet verir. Bu nedenle düşük yapısal özelliklere sebep olur. Fiber geriliminin artırılması, fiber sargılı kompozit malzemenin fiber hacim kompozisyonunu önemli ölçüde iyileştirmiştir (Gonzalez Henriquez ve Mertiny 2018).

Fiber hacim kompozisyonunun artması ile kompozit malzemenin mekanik özellikleride artmaktadır. Gergi tertibatı ile hizalama düzgün bir form sağlanmaktadır. (Aydın,2019) Gergi ve reçine banyosu arasında belirtilen kasa kullanılarak liflerin iletimi kontrol edilir. Emprenye öncesi temiz üretim için liflerin bir arada kalması önemlidir. (Aydın,2019) Reçine havuzu önceden hazırlanarak reçine sistemiyle doldurulur. Reçine havuzu, elyafların reçine havuzundan reçineni emdirilmesinde kullanılır ve fiberler dönen silindir üzerinden geçer. Reçine havuzun sıcaklığı üretim tekniklerine bağlı değişebilmektedir. Reçine havuzunun sıcaklığın ayarlanabilmesi, reçine havuzunda sıcaklığın artışı matristeki vizkozitesinin değişkenliğine ve bu nedenle bölgesel reçine toplanması ve fiberler üzerindeki yapışma yeteneğinin azalmasına yol açar. Reçine havuzunun diğer bir parçası, kompozit yapıda mekanik özelliklerin artmasına sebep olacak fiber hacim kompozisyonunu sağlamasıdır. Reçine emdirme mekanizmalarında reçinenin silindir üzerinde toplanmasını ayarlayabilen sıyrıcı bıçakların kullanılması ile düzenlenir. Kompozit tüpteki kabarcık oluşumunu engelleyen ve kabarcık oluşumunu azaltan doktor bıçağı kullanılır. (Harrison 2000)

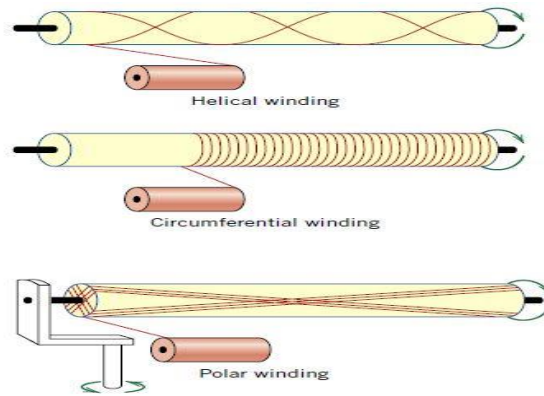
Sarım açısını ayarlayan bir robot kafası yardımıyla helisel sarım, çevresel sarım ve polar sarım gibi üç sarım modeli uygulanır. (Sofı, Neunkirchen ve Schledjewski 2018). CNC kontrol yöntemiyle filaman taşıyıcı mekanizması kullanılarak filamanların istenen açı ile tambur üzerine serilir. Sarım açıları kullanım yerine ve mekanik özelliklerin artırılmasında önemli bir özelliktir. Depolama sistemlerinde kullanılan basınçlı kaplarda, kompozit tüplerde optimum açı 54,7 olarak tespit ettiler. (Taib ve ark. 2006).

Çevresel sarım işleminde silindir üzerine liflerin yaklaşık olarak 90 derece olarak serilir. Çevresel sarımın iç basınç uygulamalarında önemli olduğu vurgulanmıştır. Helisel

ve polar daha düşük açılı sarım, yüksek eksenel boyuna gerilim değeri sağlar. Düşük açılı sarımda silindir yüzeyi ile filamanlar arasındaki sürtünmenin azalması ile kayma deformasyonu gibi kritik problem söz konusudur. Şekil 3.6.2.1.A ve Şekil 3.6.2.1.B de verilmiştir.



Şekil 3.6.2.1.A. Elyaf sarma metodu (Nuplex, 2016 a)



Şekil 3.6.2.1.B. Helisel sarım, çevresel sarım ve polar sarım gösterimi (Material textbook, 1981)

B. Rulo sarma işlemi

Rulo sarma kompozit boru üretim yöntemlerinden bir tanesidir. Kalite yüzdesi yüksek kompozit tüp üretimi için elverişlidir. Rulo sarma işleminde, ön emdirilmiş kumaş, karbon elyafı veya prepreg malzemeleri hadde makinesi yardımıyla silindir etrafına sarılır. Silindir üzerine bir prepreg veya dokuma yapılmış kumaş gerdirilerek sarılır. Silindirin dış çapı, borunun iç çapını belirler. Kürleme işlemi sona erdiği zaman silindir kompozit tüpten çıkartılır. (Kim, Yoon ve Shin 2011). Kompozit boru üretmek için dokuma yapılmış kumaşların kullanılması, yüksek reçine ve elyaf oranı ve minimum

kabarcık seviyesi sebebiyle kompozit malzemenin dayanımını önemli ölçüde artırır. Reçinenin yeterli oranda emdirilmesi malzemenin kalitesini arttırmada çok önemlidir.

C. Çekme örgü işlemi

Çekme örgü işlemi, filaman örgü ve pultrüzyon makinesinin olduğu iki farklı üretim sürecini içerir. Filaman örgü işlemi, elyafların reçine havuzundan doğrudan geçmemesi, elyafların bir silindir üzerine örülmesidir. Fiber örgü işlemi her katman için farklı sarım açıları ile uygulanır. Örgü işleminden sonra aynı şekilde işleme devam edilir. Örgülü elyaflar, emdirme, şekillendirme ve kütleme için kullanılan önceden ısı uygulanan kalıba çekilir. Yüksek mekanik özellik, mükemmel yüzey kalitesi, kesitte orantılılık ve yüksek lif hacim kompozisyonu çekme örgü işlemi kullanılarak üretilen tüp, boru gibi parçaların istenen özellikleridir. (Bezerra et al. 2015).

Üretim talebinin yüksek oranda olması, maliyetin uygun olması, yedek malzeme gereksinimi ve düşük yakıt tüketilmesi havacılık, kimya endüstrisi, savunma sanayi sektörlerinde önem arz eden koşullardır.

3.7. Kompozitlerin Mekanik Davranışlarının Belirlenmesi

3.7.1. Kompozitlerin çekme davranışlarının belirlenmesi

Kompozit malzemelerde çekme deneyi matris fiber ara yüz yapışması ve ara faz oluşumundaki mukavemetini ölçmek amacıyla kullanılır. Çekme mekanizması 5mm/dk çekme hızına kadar uygulanır. Kompozit malzemeler genellikle gevrek olduğundan metallerdeki gibi akma gözlenmez. Hasar önce matris çatlaması yoluyla başlar. Fiber matris ara yüz mukavemetinin gücüne göre yükselen çekme yükleri altında fiber matris ara yüzünün mukavemetine bağlı olarak ama sonuçta fiber kırılması yoluyla malzeme hasara uğrar. Bu şekilde özellikle çekme yönünde kompozit malzemenin dayanımının yüksek olması beklenir. Çekme işlemi ayrıca fiber matris uyumunun bir ölçüsü olarak da uygulanabilir. Eğer fiber matris ara yüzey yapışması çok iyi değil ise malzemede hasar matris çatlaması ile başlayıp fiber sıyrılması ile düşük mukavemette oluşur. Bu deney fiber göre kimyasal olarak matris seçiminin ne kadar önemli olduğunun göstermekle beraber fiber matris hacimsel konsantrasyonunu matris uygulanan fibere matrisin tamamen nüfuz edebildiğini üretim aşamasında camsı geçiş sıcaklığının önemini, matris

içerisine konulan hızlandırıcı ve sertleştirici ajanlarının proses işleminin zaman açısından önemi gibi birçok tekniğin uygulanması konusunda önemli bir ölçüm tekniğidir.

3.7.2. Kompozitlerin eğilme davranışlarının belirlenmesi

Kompozit malzemelerde eğme(bükme) işlemi ile değerlendirilir. Bu işlem özellikle tabakalı polimerik kompozit malzemelere çok önemlidir. Gerek düşük orta yüksek darbe durumlarında gerekse eğilme yükü durumlarında tabaklar arası lifler arası kısmı tabakalar arası delaminasyonu darbe deneyleri ile ölçülür. Bu deney reçinenin fibere nüfuziyeti, üretim tekniğine bağlı olarak tabakalar arası yapışmanın derecesi, matris tarafından fiberin ıslanıp ıslanmadığı ve tabaklar arası kayma gerilmesinin hangi ölçüde olduğu konusunda araştırmacılara bir fikir sunar. Eğer tabakalar arası delaminasyon yani tabaka ayrılması sonucu hasar oluşmuşa reçine seçiminde veya malzemenin üretim tekniğinde veya polimerik reçinenin kürlenme sıcaklık ve zamanında bir problem olduğu sonucunu verir. Plakadan kesilmiş numune üzerinde özellikle yükün uygulandığı noktalar kısmı delaminasyonlar ve ayrıca tabakalar arası matrisin radyal çatlamasının etkisi ile fiber kırıklarına yol açarak malzemeyi hasra uğratarlar. Tüm bu mekanizmalar eğilme deneyi ile tespit ve analiz edilebilir.

3.7.3. Kompozitlerin darbe davranışlarının belirlenmesi

Darbe testi, bir malzemenin enerji yüklemelerine karşı dayanım kabiliyetinin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Bu test yardımıyla malzemenin hasarında soğurulan enerji belirlenebilmektedir. Darbe dayanımı da malzeme tasarımında kullanım ömrünün belirlenmesinde önemli parametrelerden ve zor tespit edilebilen özelliklerdendir. Darbe testleri sonrası, kompozit tabakalar arasında darbe enerjisine bağlı olarak darbe ucu ilerlemesinin (penetration) tabakalar arası tutunma ile değiştiğini göstermektedir (Belingardi vd,2003). Darbe enerjisi malzemeye yüklenirken, hasar gelişimi seviyesinin belirlenmesinde enerji dengelerinin kullanılabildiği G. Belingardi vd tarafından belirlenmiştir (Belingardi,1998),(Belingardi vd,2002) Ayrıca darbe yüklemeleri sırasında darbe enerjisi ile soğurulan enerji arasındaki orandan saptanan hasar derecesi ile numunenin ne zaman tam delineceği konusunda, hasar derecesi oranı 1'e yaklaştıkça, yani soğurulan enerji değeri uygulanan darbe enerji seviyesine yaklaştığında numunenin tam delineceği (full penetration) önceden saptanabilir (Hebert vd,2008).

Düşük hızlı darbe testi saniyeler içinde malzemeye anlık dış bir mekanizma tarafından uygulanan kuvvet olarak tanımlanabilir. Düşük hızlı darbeler 1-10 m/s arasında değişebilir. (Mili ve Necip 2001) tez 5 Düşük hızlı darbeler aynı zamanda düşük enerjili darbe olarak da tanımlanabilir. Düşük hızlı darbelere örnek verdiğimizde, kompozit malzemelerin imali, bakım ve tamirat işlemleri yapıldığında bir aletin düşmesi ya da çarpması denilebilir. Düşme ya da çarpma durumunda kompozitin iç yapısında hasar oluşturan tabakalar arası ayrılmalara darbe denir.

Darbe test metodlarıyla malzemede ve yapıda oluşması ve gelecek darbelerin etkisiyle hasarı gelmeden önceden tahmin etmek, testini yapmak ve malzemede oluşacak hasarla ilgili dinamik özelliklerin (enerji emme kabiliyeti, kırılma ve hasar mekanizmaları, dayanım azalması) belirlenmesi gayesiyle yapılan birtakım darbe testleri söz konusudur.

3.7.3.1. Silindirik Kompozit Malzemede Darbe Sonucu Oluşan Hasarlar

Mühendislik uygulamalarında yaygın biçimde kullanılan metal malzemelerin darbe davranışları elastik, elastik/plastik ya da plastik deformasyon olarak karşımıza çıkar. Fiber takviyeli silindirik kompozit malzemelerde ise vurucunun türüne ve çarpma etkisine bağlı darbe oluşan ve oluşmayan bölgede hasarlar gözle görülebilen veya gözle görülemeyen hasarlar meydana gelebilir.

Fiber takviyeli kompozitlerde deneysel yöntemlerin gelişmesine bağlı olarak hasarın değerlendirmesinde kullanılan başlıca yöntemler hasarlı ve hasarsız muayene yöntemleri 2 şekildedir. Mesela karbon fiber veya aramid fiber 'den üretilmiş bir kompozit borunun darbe uygulamasına bakıldığında borunun iç tabakasında nasıl bir hasar oluştuğunu ancak bir cihaz ile görebiliriz. Fakat bahsettiğimiz 2 tekniğin kullanılması ile nasıl bir hasar oluştuğunu ve hangi tabakada boyutları ile görmek mümkün olur. Teknikleri şu şekilde sıralanır. (Reid ve Zhou 2000);

Hasarlı yöntemler:

- Kompozit borunun tabakalarını ayırma metodu
- Kesit fragtografisi metodu
- Kompozitin iç karakteristiğindeki hasarları görünür kılmak için iki yöntemin birlikte kullanılması

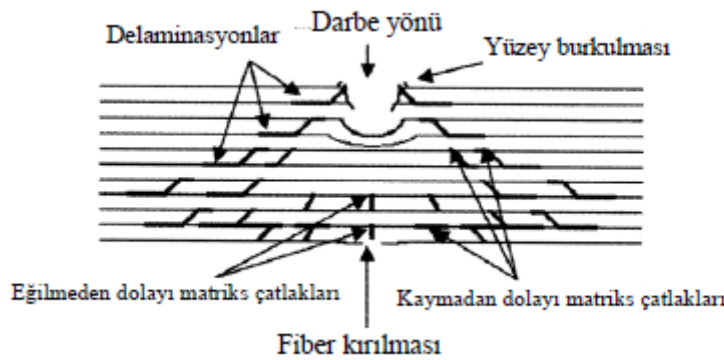
Hasarsız yöntemler:

- X-ışınları metodu ile
- Ultrasonik metot ile
- Akustik emisyon metodu ile
- Lazer optik metodu ile
- Termal cihaz metodu ile

Geleneksel metal malzemelerden farklı olarak kompozitler fiber doğrultu yönünde bir gerilmeye maruz kaldığı zaman, kompozit doğrultu yönünde dayanım ve darbe direnci gösterir. Fakat fibere dik şekilde gelen gerilmelere veya öngörülemeyen bir darbeye maruz kaldığı zaman, dayanımı zayıf ve düşük darbe direnci olarak karşımıza çıkar. Fiber takviyeli kompozitlere düşük hızlı, orta hızlı ya da yüksek hızlı darbe uygulamalarında kompozit malzemede hasar oluşumu gerçekleşir. Kompozit malzemedeki hasar çeşitleri belirli bir bölge veya tamamında görülebilir. Belirli bir bölge veya tamamında oluşan çıktılar geometri ve malzeme özelliklerinden elde edilmektedir. Matris, fiber, fiber-matris arayüzeyi, fiber istifleme düzeni, fiber yönelim açısı, ortam şartları, vurucu şekli ve boyutu gibi özellikler kompozit malzemeyi etkiler.

Genel itibari ile kompozit malzeme darbe esnasında meydana gelen hasarlar matris çatlağı, tabakalar arası ayrılma ve fiber hasarları olarak oluşur. Düşük hızlı darbe esnasında matris çatlağı ile başlamakla birlikte hasarın farklı fiber yönelim açısına sahip tabaka ara yüzeylerinde ayrılmaların meydana gelmesiyle devam eder. Kompozit malzemeye uygulanan darbe enerjisinin artmasıyla tabaklar arası ayrılma ve sonunda ise vurucu ucun numuneye girmesi ve numunenin delinmesi ile sonuçlanabilir.

Anlatılanlara ilave olarak şekilde, tabakalı bir kompozitin darbe esnasında tabakalarda ve tabaklar arasında birtakım hasarlar şematize edilerek resimde ifade edilmiştir.

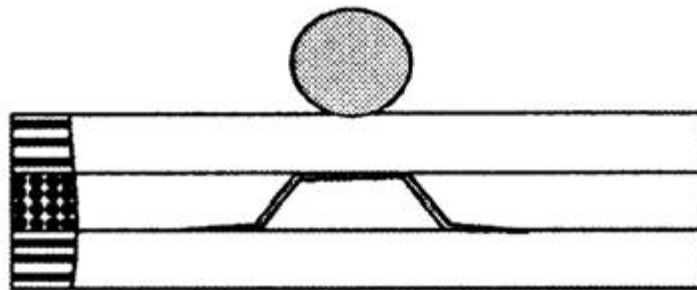


Şekil 3.7.3.1. Tabakalı kompozit malzemede meydana gelen hasarlar (Shyr ve Pan 2003)

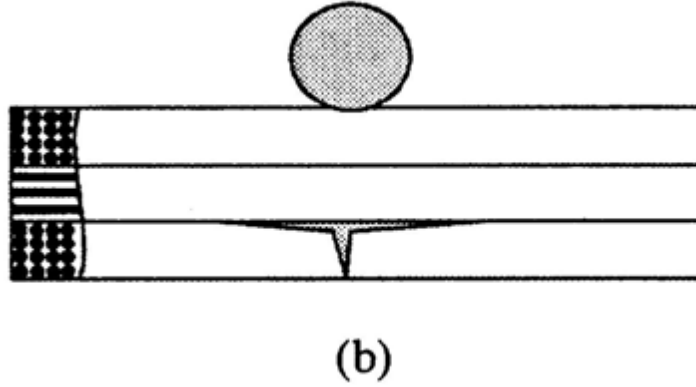
A. Matris hasarı

Polimer kompozit malzemeler üzerinde yapılan araştırmalarda darbeye maruz kaldığı zaman kompozit malzemenin darbe kabiliyeti reçine fazının tokluk özelliğinde iyileştirme sağlanmasına bağlıdır. Bu mekanik özellik bize malzemenin şekil değiştirme enerjisi, kayma sonucu oluşan çatlaklarına karşı gösterdiği kabiliyeti ve gerilme yoğunluk etkisini azaltma kabiliyetine sahip olduğunu gösterir. Dorey ve arkadaşları yaptıkları deneylere istinaden termoplastik matris kompozitlerin daha yüksek tokluk sergiledikleri bulunmuştur. Kompozit malzemelerde termoplastik olanlarda matris çatlağı daha az rastlanır ve bu nedenle hasar daha az yayılma enerji gösterir. Ayrıca kırılma esnasında yüksek şekil değiştirme enerjisine sahip bu reçineler yüksek darbe uygulamalarına karşı direnme kabiliyeti gösterir. Bunun yanında yüksek darbe yük uygulamalarına karşı tokluğa sahip reçine sistemi, delaminasyonun azalmasına sebep olduğu için yüksek bir darbe uygulamasından sonra basma mukavemetine de sahiptir. (Sierakowski ve Chaturvedi 1997).

Matris çatlağı sert olan yapılarda örnek malzemenin darbe uygulandığı yüzeyde oluşan yüksek gerilmelerden dolayı ilk olarak başlar. Darbe uygulamasından sonra numunede anlaşılması zor bir matris çatlaması meydana gelir ve tahmin etmesi zor olabilir. Ancak bu hadisenin tahmin edilmesi tabakada artık özelliklerin azalmasını çok etkisi olmadığı için zorunlu değildir. Hasar uygulamasının matris çatlaması ile başlaması kompozitin ara yüzeylerinde tabaka ayrılmalarında sebep olur. Dolayısıyla çeki ve kesme çatlakları olmak üzere 2 türlü matris çatlaması olduğu gözlenir.



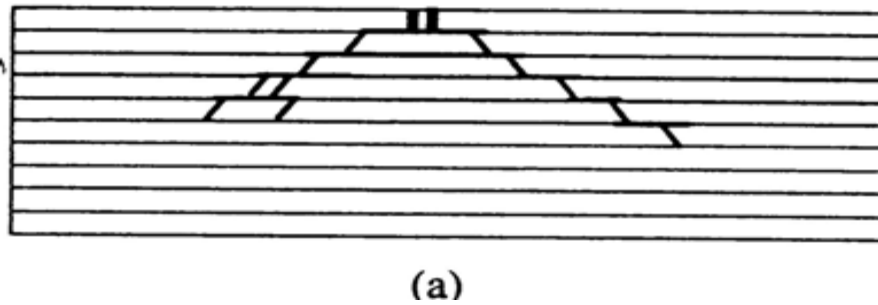
(a)

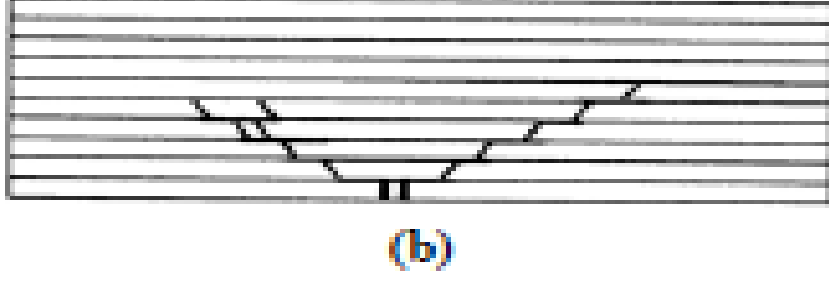


Şekil 3.7.3.1.A. Matris çatlaklarına ait iki tip çatlak oluşumu, (a) Çeki çatlağı, (b) Kayma çatlağı (Abrate 1998)

Çeki çatlaklarının oluşması düzlem içindeki normal gerilmelerin, tabakanın fibere dik doğrultudaki mukavemetinin aşılması ile birlikte oluşur. Kayma çatlaklarının oluşması orta düzlemde açı oluşturarak meydana gelir ve bu da fibere dik doğrultuda kesme gerilmelerin çatlak meydana gelmesinde önemli bir etki oluşturur. Numune kalınlığı yüksek olması durumunda, vurucu uç yoluyla numunenin üst yüzeylerinde yüksek ve lokal gerilmeler oluşması ile matris çatlakları oluşur. Hasarın ilerlemesi ile numunenin üst yüzeylerinden aşağı yönlü piramite benzer bir şekilde ilerleme kaydeder.

Numune kalınlığı düşük olması durumunda kompozitin alt yüzeyinde oluşan eğilme gerilmeleri nedeniyle aynı yüzeyde matris çatlakları oluşur. Bu tanıma göre hasarın ilerlemesi de alt yüzeyden üst yüzeye doğru ters piramit olarak ilerleme kaydeder.





Şekil 3.7.3.1.B. (a) Hasarın üst tabakadan alt tabakaya doğru çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi, (b) Hasarın alt tabakadan üst tabakaya tersine dönmüş çam ağacına benzer şekilde ilerlemesi (Abrate 1998)

Kompozit malzemeye darbe uygulamasında hasara sebep olan ilk kinetik enerji, matrisin dayanım, sertlik, tokluk gibi mekanik özellikleri etkiler, ancak genel anlamda fiberin istiflenmesi, örgü tipi gibi özelliklerine bağımlı değildir. Hasar matris çatlağı ile başlar ve matris çatlağı fiberin farklı açılı tabaka ara yüzeylerine ulaştığı zamanda da tabaklar arası ayrılma meydana gelir. (Sayer,2009)

B. Delaminasyon

Tabakalar arası ayrılmalar, birleşik tabakalar arasındaki yapışma etkisinin azalmasıyla tabakalı kompozitin mukavemetini önemli ölçüde düşüren hasar olarak bilinir. Deneysel çalışmalarda delaminasyonun yalnızca farklı fiber yönelim açılarındaki tabakalar arasında meydana geldiği bildirilmektedir. Ancak iki bitişik tabaka arasında yönlendirme açısı aynı ise tabakalar arası yüzeyde delaminasyon meydana gelmez.

Delaminasyon başlamasına sebep olan ilk kinetik enerjinin sınır değerini tespit etmek zor olmasından dolayı farklı test mekanizmalarına ihtiyaç vardır. Tabakalarda meydana gelecek delaminasyon şekilleri hem düzensiz hem de bunların yönlenmeleri karışıktır. Tabakalar arasındaki ayrılma olan bölge genel itibari ile vurucu ucun ilk darbe enerjisine karşı çizdirilir ve bundan sonra bir başlangıç değerine ulaşılmasıyla birlikte tabakalar arası ayrılma boyutu darbe enerjisinin lineer bir şekilde artmasıyla artacaktır. Delaminasyon boyutu genel anlamda C-Scan ultrasonik tarama cihazından belirlenen hasarlı olarak bulunur. Kompozit malzemeyi ele aldığımızda, malzeme içindeki hasar,

farklı arayüzeylerde meydana gelmektedir ve C-Scan yöntemi hasarlı bölgelerin tek bir düzleme yansıtılmasıyla incelenmektedir. (Sayer, 2009)

C. Fiber kopması

Kompozit malzeme imalinde kullanılan fiber, hasar engellenmesinde ve hasar tolerans yeteneğinin geliştirilmesi yönünde önemli bir rol üstlenir. Şu örneği ele aldığımızda, eşit darbe enerjilerine maruz kompozitte enerji emme kabiliyeti, daha az fiber hasarı ve yüksek artık mukavemet ile sonuçlanır. Kompozit imalinde, kırılma hasarında yüksek kırılma şekil değişimine sahip takviye fazının, tokluk özelliğe sahip matris fazının, fiberin örgü veya dikişli olması halinde matris ile uyumlu seçildiğinde kompozit malzemenin darbe direnç kabiliyeti artacaktır.

Fiberlerin elastik modül özellikleri matris fazının elastik modül özelliklerinden genel itibari ile yüksek olduğundan dolayı fiberler sert olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla fiber türünün matrisin çatlaması ve tabakalar arası ayrılmaların başlamasına bir etkisi olmadığı görülmektedir. Ancak yüksek darbe enerji uygulamalarında fiberin kabiliyetleri ve fiberin istifleniş düzeni önemli bir etki uyandırmaktadır. (Abrate,1998)

Fiber takviyeli kompozit malzemelerden cam/epoksi, karbon/epoksi ve aramid/epoksi kompozit malzemelerin darbe kabiliyetleri ile ilgili bazı bilgiler şu şekilde sıralanabilir (Sierakowski ve Chaturvedi, 1197).

- Yapılan testler sonucunda 3 farklı kompozit malzemede darbe uygulaması sonrası dayanımda azalma sertlikteki azalmadan daha büyük olduğu bulunmuştur.
- Test yapılan kompozitler için artık mukavemet faktörleri; fiber istifleniş düzeni, kompozit türü ve darbe uygulama hızı olarak söylenir.
- Fiberlerin matris fazından ayrılması, fiberlerin kırılma şekil değişimi ile gerçekleşir. Bahsedilen ayrılma, fiber-matris arasındaki yapışma dayanımı için fiber kırılma şekil değişimine bağlıdır. Bahsedilen kompozitler için sıralarsak; cam/epoksi > aramid/epoksi > karbon/epoksi olarak sıralanır.
- Aramid/epoksi ve cam/epoksi kompozit malzemelerin matris kırılma yoğunlukları üzerinde kıyas yapıldığında cam/epoksi kompozitlerin aramid/epoksi kompozitlere göre daha büyük çıkmıştır.

- Her üç kompozit malzeme türü için delinme kabiliyetlerine baktığımızda; aramid/epoksi > karbon/epoksi > cam/epoksi olarak sıralanabilir.
- Aramid/epoksi ve cam/epoksi kompozit malzemeleri için darbe uygulanması sonucunda oluşacak delaminasyon hasarına baktığımızda; aramid/epoksi kompozit malzemenin delaminasyon hasarı cam/epoksi kompozit malzeme türüne göre daha büyük çıktığı bulunmuştur.

Gevrek bir yapıda olan cam ve karbon fiber kompozitlerin darbe uygulanan nokta civarında yüksek gerilmeler oluşacağından, lokal bir hasar meydana gelecektir ve darbe enerjisi yalnızca küçük bir bölgede emilir. Ancak esnek bir yapıda olan aramid fiber kompozit malzemeye darbe uygulanması halinde ise darbe enerjisinin tabakalar arasında yayılmasıyla daha geniş bir bölgede hasar oluşacaktır. Aramid fiberlerin yüksek darbe tokluğu nedeniyle kompozitin tüm bölgesinde deformasyona neden olacaktır. Gevrek yapıdaki fiberler ile esnek yapıda olan fiberler hibrit kompozit yapıya getirilip darbe uygulanması halinde ise hibrit yapıdaki istifleniş düzenine göre mekanik özellikler değişmektedir.

Fiber kopması, genellikle matris kırılması ve delaminasyondan daha ileri olan modudur. Bu hasar numunenin darbeye uğrayan tarafında temas bölgesinde meydana gelebileceği gibi eğilmeden dolayı oluşan gerilme sebebiyle darbeye maruz kalmayan yüzde de meydana gelebilir. (Sayer,2009)

D. Fiber-matris ara yüzü hasarı

Fiber-matris ara yüzü kompozit hasar mekanizmaları ele alırken, kompozit malzemeyi meydana getiren fiber ve matris fazları önemlidir. Kısa fiber kompozit malzemeler için, matrise gömülü haldeki kritik fiber uzunluğa sahip matristen fibere yük aktarılması gerekir. Sürekli fiberler de ise bu malzeme ara yüzüne takviye uygulanması kompozitin darbe direncini artırır. Nüfuziyet kısaca çarpan parçacığın veya ucun numuneye saplanması olarak tanımlanırken delinme çarpan ucun numuneyi tamamen delip geçmesi şeklinde ortaya çıkar. Tek yönlü fiber katmanlarında matris kırılmasını tahmin etmek kolay olmasına rağmen, fiberlerin gelişigüzel bulundukları katmanlarda daha zordur.

3.8. K rleme Süreci ve süresinin Mekanik  zelliklere Etkisi

Tabakalı kompozit malzeme üretim sürecinde termoset matrisinin mukavemet ve mekanik özelliklerin bilinmesinde kürleme önemli aşamalardan biri olarak karşımıza çıkar. K rleme sürecini tamamlamış kompozit malzemeler metallere göre dayanım, tokluk, sertlik gibi özellikleri oldukça yüksektir. Tabakalı kompozit malzeme üretim sürecinde  u 4 hususa dikkat edilmesi gerekir.

- Tabakaların uygun dizilime sahip olması gerekir.
- Elyaf/Reçine kompozisyonuna dikkat edilmesi
- Boşluk hacminin düşük olması
- K rleme derecesi ve zamanına dikkat edilmesi

K rleme, reçine vizkozitesinin, sıcaklığın, zamanın ve reçinenin polimerle mesinin ba laması için gerekli olan kimyasal tepkimenin fonksiyonudur. Belirli bir zaman içerisinde ısı ile basıncın birlikte uygulanması kürleme süresini ifade eder. Sertle tirici kompozisyonu ve malzeme kalınlık ölçülerine bağlı olarak kürleme süresi belirlenir. (Kılıçtek,2020)

4. MATERYAL VE METOT

4.1. Materyal

4.1.1. Aramid elyaf kumaş

Kevlar DuPont firmasının aramid elyaflara verdiği isimdir. Kevlar fiberler çok hafif olan karbon kökene sahip sağlam liflerden meydana gelen malzemedir. Bu lifler darbe hasarına karşı yüksek dirence sahip güçlü, hafif, düşük yoğunluklu, yüksek çekme mukavemetine sahip ve sağlamdırlar. Diğer liflere göre hasar toleransları en iyi özellikleri barındırır. Kevlar UV ışınlarına karşı hassas ve nem emme gibi olumsuz özelliklere sahiptir. Bu da %7-8'lik ağırlık artışı anlamına gelir. Kevlar'ın 2 farklı çeşidi vardır. Bunlar yüksek sertliğe sahip kevlar 49 ve düşük sertliğe sahip kevlar 29 dur. Havacılıkta, askeri uygulamalarda halat yapımında kullanılır. (Kevlar,D),(Sulaiman,2017)

Çalışmada 2*2Twill 300g/m² kumaş kullanılmıştır. Kumaşa ait özellikler aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Çizelge 4.1.1. Aramid elyafa ait teknik özellikler

Fiber Malzeme	g/m ²	Dokuma	Atkı	Çözgü	Atkı Dağılımı	Çözgü Dağılımı	Genişlik (mm)
Aramid Elyaf	300	Twill	4,4 ends/cm	4,4 ends/cm	150g/m ²	150g/m ²	1000/1200

4.1.2. Vinilester reçine

Vinilester reçineler, epoksi reçinelerin avantajlarının yanı sıra doymamış polyester reçinelerin kolay işleme, hızlı sertleşebilme gibi özelliklerini bir arada bulundurmak üzere geliştirilmiştir. Epoksi reçinenin akrilik ya da meta-akrilik asidin reaksiyona girmesi ile elde edilir. Polyester reçinede olduğu gibi benzer bir sıvı faz elde etmek için üretilecek polimer, stiren içinde çözülür. Vinilesterler organik peroksitlerle sertleştirilebilir. Vinilesterlerin mekanik dayanım ve yüksek korozyon dayanımı önemli özelliklerindendir. Bu özelliklere sahip olması ile karmaşık işlem ya da özel kullanım becerisine gerektirmediği bilinmektedir. (Cam Elyaf, 2004)

Çalışmada Poliya 701 vinilester reçinesi kullanılmıştır. Reçineye ait teknik özellikler aşağıda verilmiştir.

Çizelge 4.1.2. Vinilestere ait teknik özellikler

Yoğunluk	1,044 g/cm ³
Kürleme Sıcaklığı	80 °C
Elastik Modülü	3200 MPa
Eğilme Dayanımı	160 MPa
Çekme Dayanımı	80 MPa

4.1.2.1. Reçinenin hazırlanması

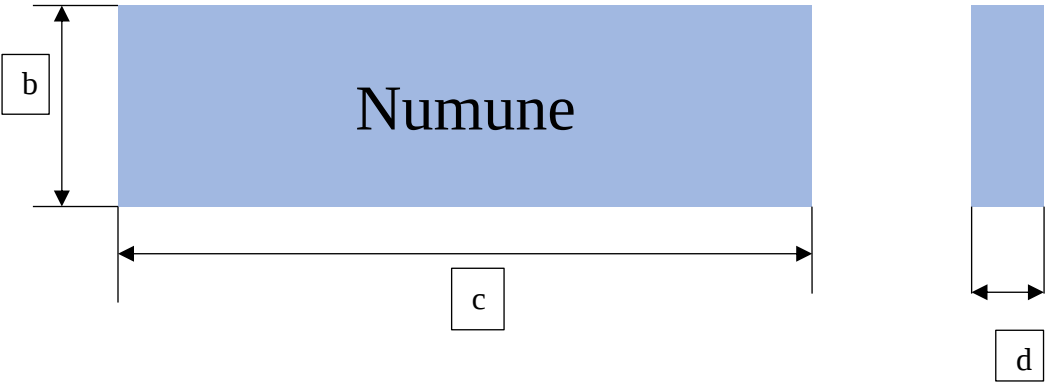
İmalat tarihine yakın olan Poliya 701 vinilester reçinesi sipariş edilmiştir. Üzerinde yazılı olan sertleştirici ve hızlandırıcı değerlerine göre ağırlıkça %2 sertleştirici ve %0,2 miktarında %6 kobalt hızlandırıcı mekanik olarak karıştırılarak maksimum 30 dk proses işlemi içerisinde fiber malzemeye uygulanmıştır. Nanolu reçine ise nanolu malzemeler mekanik ve ultrasonik karıştırıcıdan geçirilerek en son aşamada sertleştirici ve hızlandırıcı ilave edilerek hazırlanmıştır.

4.2. Metot

4.2.1. Kompozit Malzeme Üretimi

Aramid fiber kumaş özellikle atkı ve çözgü yönlerinde 55° kesilerek Aramid matris ile işlemiden geçirilerek kumaş sarım tekniğiyle tornada çelik boru kalıp üzerine kumaş sarımlı boru üretilmiştir. Üretimde kullanılacak olan vinilester reçinenin homojenliğini sağlamak için ortam sıcaklığına getirilmiş ve tornada sarım işlemi ile fiber kumaş çelik kalıp üzerine sıkı bir şekilde sarılmıştır. Sarım işlemi bittikten sonra kompozit sargılı çelik kalıp vakum torbalama metodu ile vakuma alınmış ve ön ısıtma ile 30° ısıtılmış otoklav içerisine alınmış vakum işlemi otoklav içerisinde devam etmiştir. Otoklav basıncı yavaş yavaş arttırılarak kompozit malzeme üzerine 6 bar basınç uygulanmıştır. Otoklavdaki basınç soy gaz olan azot gazı ile sağlanmıştır. Vakum torbalama işlemi de Şekil 4.2.1.A.'de gösterilmiştir.

Test Şekli	Test Standardı	En (b, mm)	Boy (c, mm)	Kalınlık (d, mm)
Çekme Testi	ASTM D3039	25	250	3
3 Nokta Eğme Testi	ASTM D7264	12,7	125	3



Şekil 4.2.1 Numune Deney Standartı

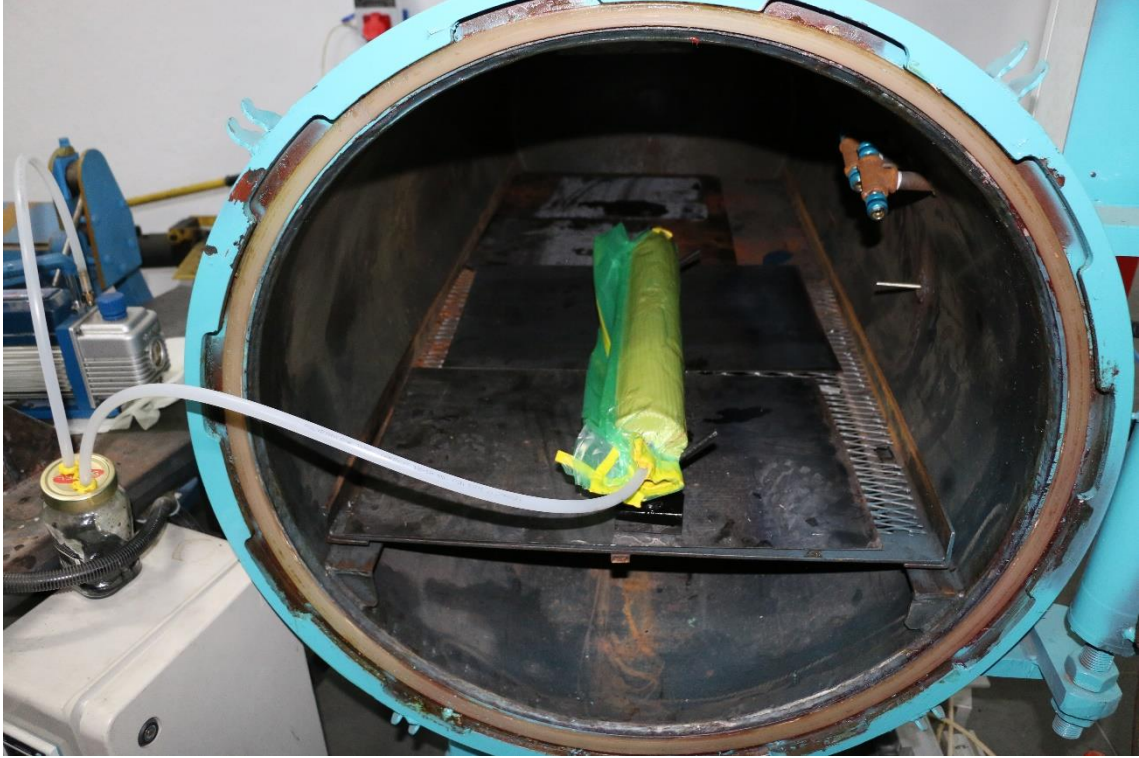
Vakum torbalama işlemide Şekil 4.2.1.A.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2.1.A. vakum torbalama işlem

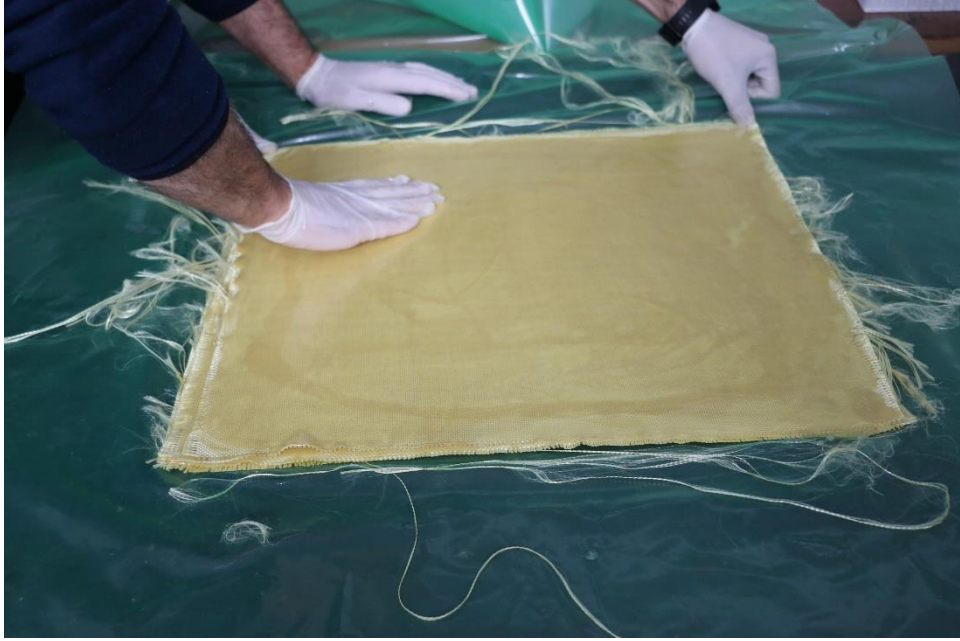
Sarılan yarı mamul vakum infüzyon torbasına yerleştirilir. Vakum infüzyon tekniğinde vakum pompası yardımıyla aramid fiber kumaş sarım aşamasındaki hava

boşlukları giderilir ve aramid fiber kumaşın düzgün dağılımı ve kalıbı tam bir şekilde sarması sağlanır. Bu işlemten sonra kürleme işlemine geçilmiştir. İç vakum ortamında malzeme otoklavda 6 bar dış basınç altında 2 saat boyunca kürlenmiştir. Şekil 4.2.1.B.'de otoklavda kürleme gösterilmiştir.

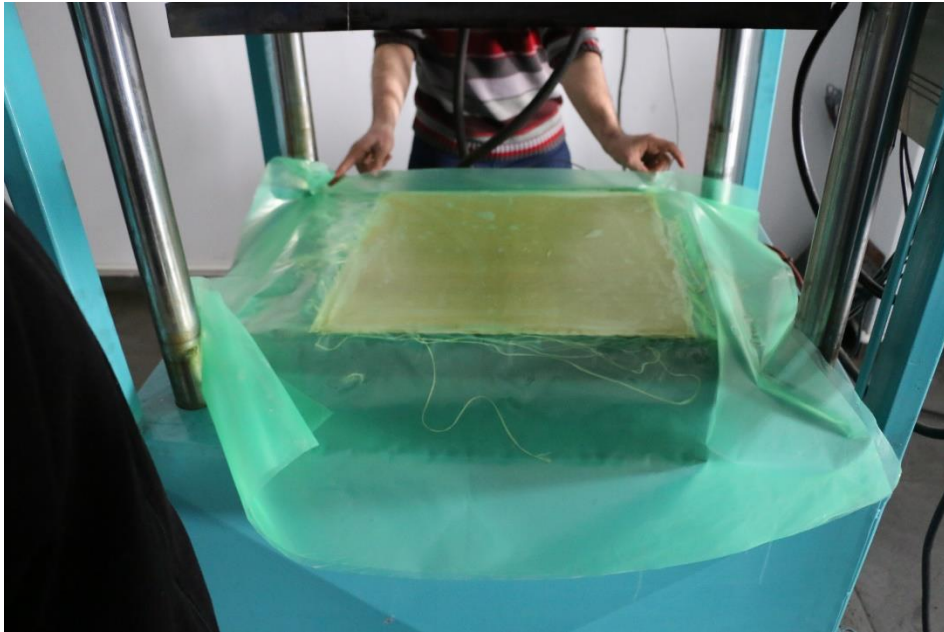


Şekil 4.2.1.B. Otoklavda kürleme

Tabakalı laminat üretiminde ise malzemeler el yatırma yöntemi ile imal edilir. Vakum torbalama işleminden sonra sıcak pres altında 5bar basınçta kürlenmeye bırakılmıştır.



Şekil 4.2.1.D. El yatırma yöntemi ile tabakalı kompozit imalatı



Şekil 4.2.1.E. Sıcak pres yöntemiyle tabakalı kompozit imalatı

Basınç adım adım yükseltilirken sıcaklıkta vinilester kürleme sıcaklığı olan 80 °C kadar yavaş yavaş yükseltilmiş ve bu 80 °C ve 6 bar basınçla otoklavda tutulmuş ve bundan sonra malzeme doğal soğumaya bırakılmıştır. Otoklavdan çıkarılan kalıplı malzeme silindirik taşlama tezgahında 3mm et kalınlığı kalacak şekilde taşlama işlemine tabi tutulmuştur. Bu şekilde parlak ve işlenmiş bir yüzey elde edilmiştir. Daha sonra pres

yardımla kalıptan çıkarılan kompozit malzeme 30 ar cm lik boylarda kesilerek darbe işlemi için hazırlanmıştır.

Tabakalı kompozit plakanın üretim aşaması 40*40 plak aramid kumaşları vakum naylonu üzerine yukarıda belirtilen vakum işlemi aynen tekrar edilerek fırça işlemi tabakalara uygulanmış ve daha sonra sıcak preste önceden 30 °C ısıtılmış kalıp içeresine konulmuş ve üzerine 5 bar basınç uygulanmıştır. Bu şekilde reçine kürlenme derecesi olan 80 °C çıkarılan pres 2 saat basılı halde tutulmuş daha sonra 24 saat doğal soğumaya bırakılarak presten çıkarılmıştır.

Presten çıkarılmış kompozit malzeme gerekli çekme ve eğme deneyleri için ASTM standartlarına göre kesim için su jeti işlemine götürülmüştür. Burada kesim yüzeyleri çok net bir şekilde pürüzsüz olarak ölçülerine göre kesilmiş malzemeler TIME WDW-200E serisi 200 kN Kapasiteli ve Crosshead hassasiyeti 0.001 mm olan çekme kopma test cihazında ASTM standartlarına göre çekme ve eğme deneylerine tabi tutulmuştur.

Çekme Testi, Üç Nokta Eğme Testi ve Darbe Testi için aramid kumaş 350 mm x 350 mm plaka standartlara uygun ölçülerde kesilmiştir. Çekme Testi için 25 mm x 250 mm boyutlarında, Üç Nokta Eğme Testi için 12,5 mm x 125 mm boyutlarında, Ağırlık Düşürme ile Darbe Testi için 100 mm x 150 mm boyutlarında kesim işlemi yapılmıştır. Kesme işlemi Mustafa Yıldırım Lazer Metal ve Makine San. ve Tic. Ltd. Şti.'nde su jeti ile yapılmıştır.

A. Kompozit üretiminde kullanılan malzemeler

Hibrit kompozit boru üretiminde ısıtıcı, vakum pompası, boru kalıbı kullanılmıştır.

B. Vakum infüzyon malzemeleri

Vakum infüzyon tekniği gerekli olan malzemeler ve araçlar; vakum naylonu, vakum hortumu, sıyırma kumaşı (peelply), macun bant, kalıp ayırıcı, pnömatik bağlantı, perde geçiş nipelî araçlarıdır. Bu malzemelere ek olarak boru üretiminde kalıba uygun kapak imal edilmiştir. Kullanılan malzemeler şekilde teknik özellikleri ise şemada ifade edilmektedir.

Vakum naylonu; hazırlanan kompozit borunun en alt ve en üstüne, arasına macun bant yerleştirilmek suretiyle içerideki atmosfer gazlarının boşaltılması için kullanılmaktadır. Isıya ve vakum esnasında dayanıklı olması istenen özelliktir. Tekrar kullanımı yoktur.

Vakum hortumu; vakuma altına alma esnasında sistemde bir ucundan havayı ve diğer ucundan ise reçinenin aktığı malzemedir. Tekrar kullanımı yoktur.

Sıyırma kumaşı (peelply); reçinenin sertleşme işlemi olduktan sonra kompozit malzemenin imal edildiği kalıptan kolay bir şekilde ayrılması amacıyla kullanılan kumaştır.

Macun bant; macun gibi yapışkan olup yapıştırıldığı bölgede sızdırmazlık özelliği olması, vakum esnasında bozulmasını ve hava kaçışını engeller. Isı ve vakum gücüne dayanıklı olması gerekmektedir. Tekrar kullanımı yoktur.

Pnömatik T bağlantı; vakum hortumu ve çoklu bağlantılar için kullanılır. Tekrar kullanımı vardır.

Perde geçiş nipel; Delik açılmış kapağa takılır ve vakum hortumu bağlanarak içerideki havayı tahliye etmek için kullanılır.

Kalıp ayırıcı; Kalıp üzerine polivinilalkol (PVA) sürülerek ve üzerine vakum naylonu sararak kompozit malzemeyi kalıptan düzgün bir şekilde çıkartmada kolaylık sağlar.

Kalıp kapağı; Borunun her iki tarafına geçirilerek içerideki hava kabarcıklarının çıkartılmasında önemli rol üstlenir.

Anlatılan araç ve malzemelere ek olarak üretimde kullanılması gerekli olan bir ekipman vakum pompasıdır. Vakum oluşturabilecek farklı bir mekanizmada kullanılabilir. Üretimde kullanılan vakum pompası şekilde verilmektedir. Vakum pompası kompozit malzemenin büyüklüğüne, parçanın şekline ve kalıbın nasıl olduğuna göre farklılık gösterebilir.

4.2.2.Çekme ve eğme cihazı ve deney özellikleri

Eğme ve basma deneyleri için TIME WDW-200E serisi 200 kN Kapasiteli ve Crosshead hassasiyeti 0.001 mm olan çekme kopma test cihazı kullanılmıştır. Eğilme deneyi için çekme cihazının alt kısmına standartlarda belirtildiği gibi mesnet açıklığı ayarlanabilir destek ve yükleme burnu sabitlenmiştir. Basma deneyi için yine standartlara uygun deney aparatları sabitlenmiştir. Cihaz tamamen bilgisayar kontrollü olup bilgisayara takılı olan PCI kart vasıtasıyla güvenilir veri aktarımı ve kontrol sağlanmaktadır. İhtiyaç durumunda ayrılmış kontrol kumandası ile cihaz kirişi aşağı yukarı hareketini bilgisayardan bağımsız olaraktan gerçekleştirebilir. Geniş raporlama

özelliği sayesinde hem deney grafikleri hazır olarak alınabilmekte hem de anlık olarak tüm değerler veri olarak alınabilmektedir.

4.2.3. Darbe Cihazı ve Deney Özellikleri

Darbe testleri, düşey ağırlık test cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Test makinesi, düşük ile orta darbe enerjileri gerektiren testler için uygundur. Çarpma tertibatının kütlesi 5.6 kg olup ve çarpma burnunun çapı 12.7 mm idi. Çarpma testleri sırasında, hedef üzerinde birden fazla etkiyi önlemek için bir geri tepme önleyici cihaz kullanıldı. Testler, üç farklı darbe enerjisi seviyesinde (5, 10 ve 15 J) gerçekleştirildi. Kompozit numunelere 5J-10J-15J enerji değerlerinde en az 3 er defa silindirik burun geometrisine sahip cihaz ile darbe uygulanmıştır. 5'er cm ara ile darbe vurulan numuneler darbe hasar bölgesinden şerit testere ile kesilerek hasar bölgeleri dijital mikroskop ile incelenmiştir. Yapılan inceleme sonuçları ilgili bölüm de verilmiştir. Çalışmamızda kullanmış olduğumuz düşük hızlı darbe deneyi test cihazı Şekil 4.2.3 2'te verilmiştir.

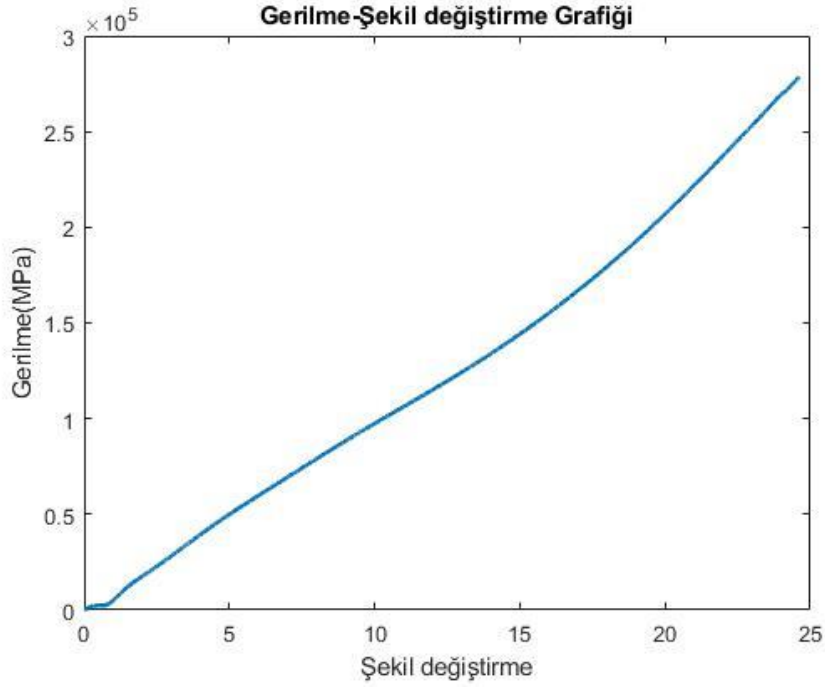


Şekil 4.2.3 3 Darbe test cihazı

5.ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

5.1.Çekme deneyi grafik analizi

5.1.1 Gerilme-Şekil değiştirme grafiği

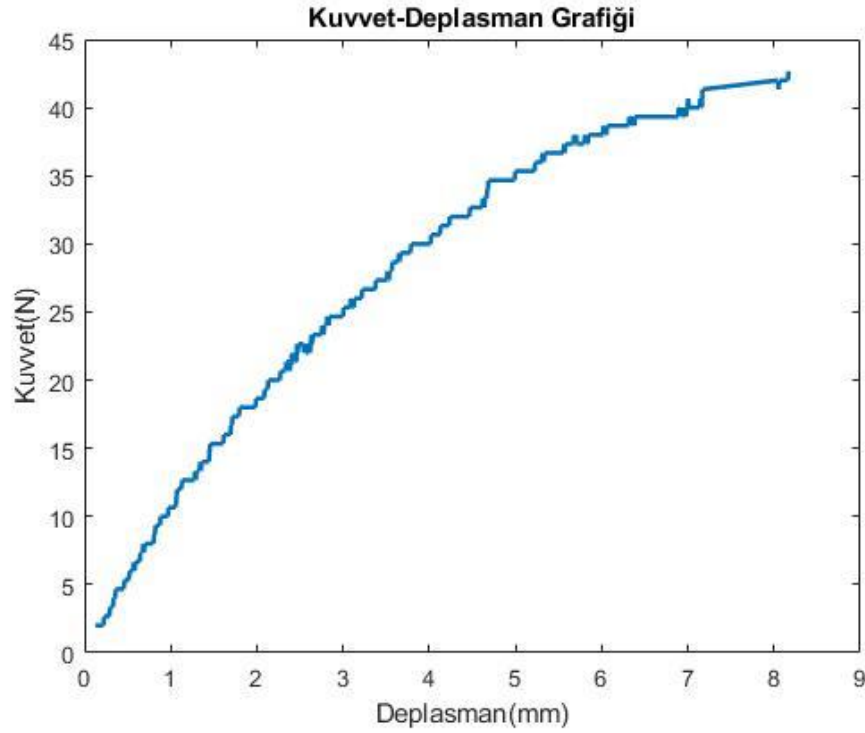


Şekil 5.1.1. Kompozit plaka gerilme-şekil değiştirme grafiği

Aramid fiber kompozit plakanın çekme dayanımı grafiğinden de görüleceği üzere malzemede yüksek şekil değiştirme oranına karşılık yüksek çekme dayanımı değeri oluşmuştur.

5.2. Eğilme deneyi grafik analizi

5.2.1. Kuvvet – Deplasman grafiği



Şekil 5.2.1. Kompozit plaka kuvvet- deplasman grafiği

Kompozit plakanın eğme kuvvet deplasman grafiğinde lamineler arası kayma gerilmesinin yüksek olmasından dolayı malzemede yüksek eğilme kuvveti düşük deplasman elde edilmiştir. Ancak deplasman artışı ile eğilme kuvveti düşmeye başlamıştır.

5.3. Darbe deneyi grafik analizleri

Darbe testi malzemelerin enerji yüküne maruz bırakılmasına karşın dayanım kabiliyetinin ölçülmesinde kullanılır. Bu enerji yükü malzemenin hasarında absorbe ettiği enerjidir. Malzemelerin darbelere dayanımı ve kullanım ömürlerinin bilinmesini tespit etmek zordur. Numune üzerinde darbe enerjisinin artmasıyla birlikte uygulanması darbe cihazından kompozit boruların darbeye gösterdiği davranışları belirten farklı grafik ve sonuçlar elde edilir. Belirtilen grafikler, kompozit boruların darbe davranışında vurucu nesnenin numunenin yüzeyinden geri tepmesi (rebounding), vurucu ucun numunenin

içerisine girmesi (penetration), vurucu ucun malzemeyi delip geçmesi (perforation) gibi üç özel durumun açıklamasını yapmaktadır. Grafikler ise kuvvet-çökme (F-d), kuvvet-zaman (F-t), absorbe edilen enerji-zaman (E_a -t) ve hız-zaman (V-t) eğrileri kompozit borularda darbe karakteristiğini açıklamada kullanılır[Sayer,2009]. Hasar sonrası kompozit tabakalar arasında darbeye bağlı penetrasyonun, tabakaların birbirine tutunma isteği ile değiştiği belirlenmektedir. Malzemeye darbe enerjisi uygulanırken, hasarın ilerleme durumunun belirlenmesinde enerji grafiklerinin kullanıldığı G. Belingardi ve arkadaşları tarafından bulunmuştur. Bununla birlikte absorbe edilen enerji değeri malzemeye uygulanan darbe enerji seviyesi birbirine yakın olduğu zaman malzemenin tam delineceği belirlenmiştir. (Sayer,2009)

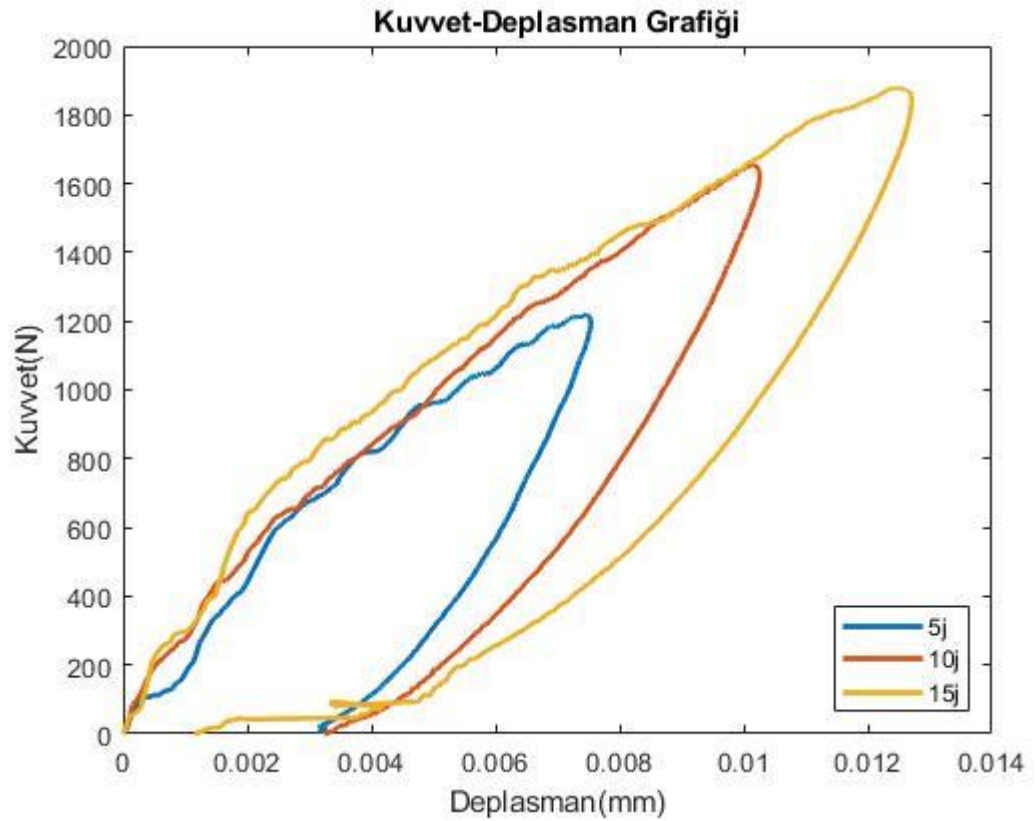
5.3.1. Kuvvet- Deplasman grafikleri

Kuvvet-çökme (F-d) eğrileri darbe uygulanması durumundaki kompozit borulara mahsus darbe davranışlarını ifade etmede kullanılan grafiklerden bir tanesi olarak bilinir. Şekil de gösterilen eğriler artan darbe enerjileri altında, kuvvetin çökmeye karşı değişimini ifade eden kuvvet-çökme grafiği görülmektedir. Her bir eğride yüklemesinde bir artış kısmı, en yüksek kuvvet değerine ulaşma ve yük boşalımı durumunda bir azalış kısmı vardır. Kuvvet-çökme grafiğinde artış kısmı darbe yüküne numunenin gösterdiği dirençle birlikte eğilme rijitliği olarak ifade edilir. Artan darbe enerjisi altında oluşmuş bu eğrilerin kapalı ve açık tip olarak iki kısımda incelenir. Kapalı tip eğride vurucu nesneni numuneye temas etmesinin ardından vurucu nesnenin numune yüzeyinden geri tepmesi sonucu oluşan eğrilerdir. Açıklayacak olursak numuneye uygulanan darbe enerjisinin büyük bir kısmı numune tarafından emilmiş ve emilemeyen enerjide vurucu nesnenin geri tepmesinde kullanılmıştır. Şekilde de görüleceği üzere ilk 3 numunenin oluşturduğu eğriler kapalı tip eğrilerdir.

Darbe enerjisi arttırıldığı zamanda, geri tepme kısmı azalır dolayısıyla kapalı tip eğri genişlediği ve çökmenin de arttığı gözlenir. Şekilden de anlaşılabacağı üzere numune 4'e ait eğri, kapalı bir eğri olmasına karşın geçiş noktasında bulunur ve darbe enerji değerinin biraz daha artmasıyla eğri tipinin kapalı tip eğriden açık tip eğriye dönüştüğünü görürüz. Açık tip eğri 2 şekilde gerçekleşir. Vurucu nesnenin numuneye saplanması ya da numuneyi delmiştir. Numuneye giren vurucu numune kalınlığı doğrultusunda hareket

eder ve numunenin yüzeyinden geri tepme olayı yaşanmaz. Şekilde görülen numune 5 etrafında saplanma veya delinme durumu meydana gelmiştir.

Darbe enerjisi biraz daha arttırıldığı zaman vurucu nesne numuneye saplanır (penetration), numune kalınlık doğrultusunda hareket eder ve sonra numuneyi delerek diğer taraftan çıkması sonucunda delinme (perforation) gerçekleşir. Kuvvet-çökme eğrisinde 6.7.8 ve 9 numunelerinin vurucu nesne tarafından delinmiştir. Eğrilerin uç kısımlarında, yatay eksenin sonuna doğru kapanma numune ve vurucu nesne arasında yalnızca sürtünme meydana gelmesi dolayısıyla oluşan sürtünme kısmı ifade edilmektedir. Belli bir seviyeye getirilen darbe enerjisi, darbe enerjisinin daha fazla arttırılmasıyla numunenin daha fazla darbe enerjisi emme yapamayacağı anlaşılır. (Sayer,2009)

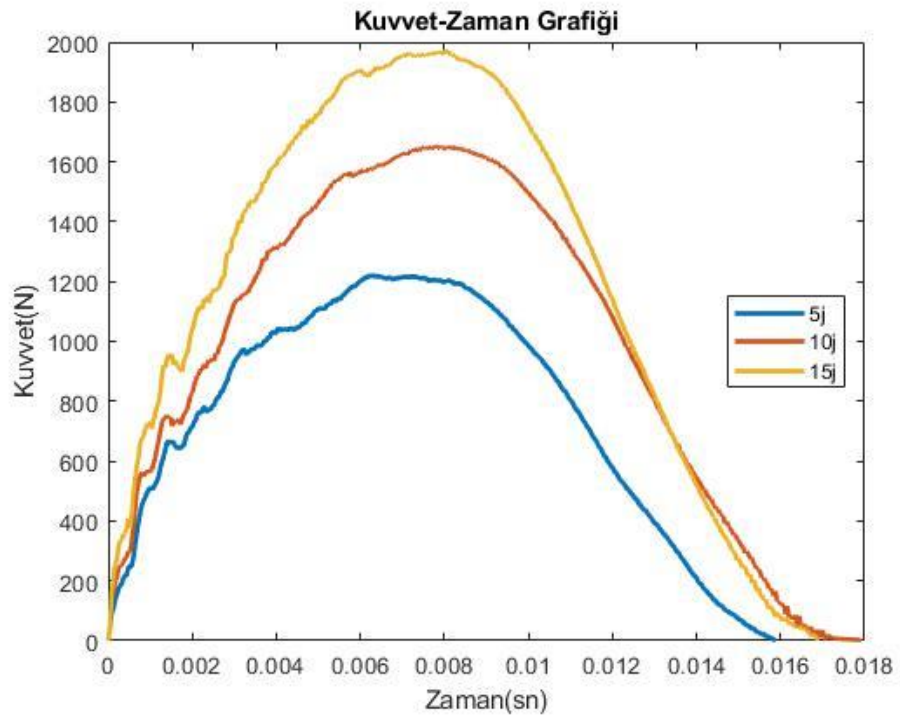


Şekil 5.3.1. 5- 10- 15 J enerji seviyelerinde kompozit boru kuvvet-deplasman grafikleri

Kompozit boruda darbe enerjileri yükseltildiğinde uygulanan kuvvetin ve deplasmanın oldukça yükseldiği açık bir şekilde görülmektedir. Rebound enerjisi malzemenin dayanımının yüksek olmasından dolayı ani bir şekilde düşerek boşalmıştır. Uygulanan enerjiler yükseldikçe kalıcı deformasyon artmıştır.

5.3.2. Kuvvet- Zaman grafikleri

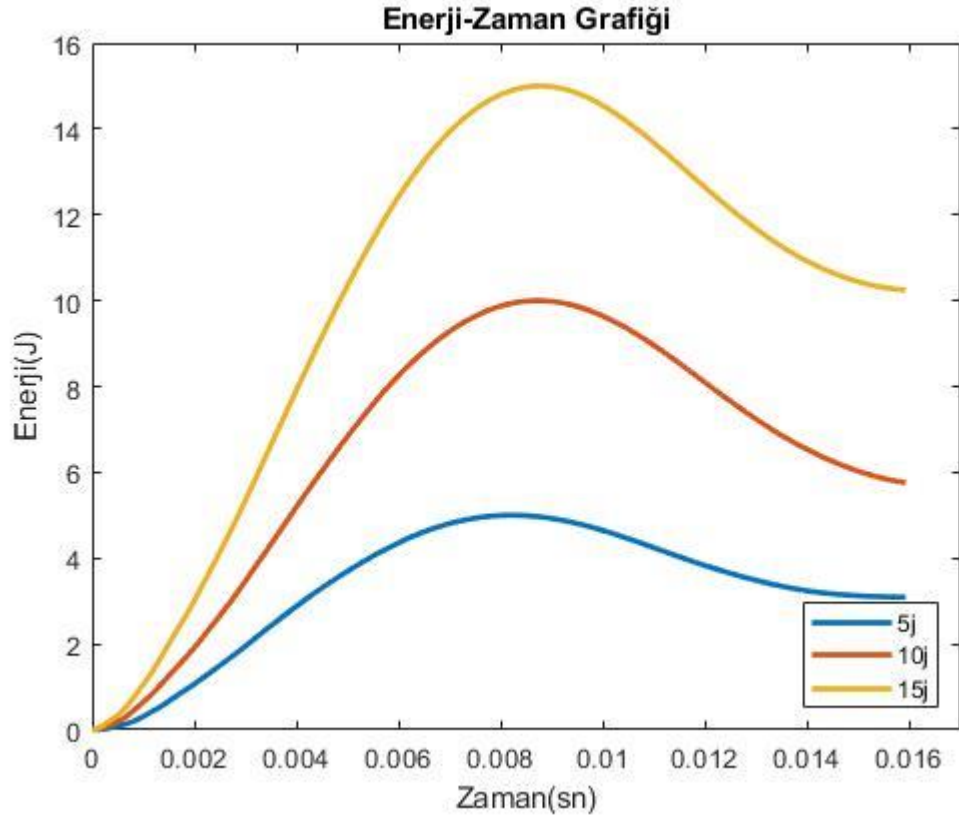
Şekilde numune yüzeyinden geri tepme (rebounding), vurucu nesnenin numuneye girmesi (penetration) ve vurucu nesnenin numuneyi delip geçmesi (perforation) gibi üç mahsus durumdaki kuvvet-zaman (F-t) grafiği gösterilmektedir. Şekilden anlaşılabacağı üzere düşük enerjili darbe uygulamalarında (geri tepme eğrisi gibi), eğri parabolik şekilde çizilmiştir. Numuneye uygulanan darbe enerjisinde artmayla birlikte kuvvette artar ve saplanma, delinme eğrilerinde de görüleceği en yüksek kuvvet değerinin de neredeyse sabit bir değer olduğu görülür. Numunede delinme esnasında kuvvetin sıfır olması gerektiği ancak şekilde vurucu nesne ve numune arasında sürtünme durumu yaşandığından eğrinin uç kısmı yatay eksen paralel olarak çizilmiştir. (Sayer,2009)



Şekil 5.3.2. 5- 10- 15 J enerji seviyelerinde kompozit boru kuvvet- zaman grafikleri

Kompozit borudaki kuvvet beklendiği şekilde darbe enerjisi yükseldikçe artmış, hemen hemen kuvvet temas zamanı darbe enerjisi yükseldikçe beklendiği şekilde azalmıştır. Bu da yüksek enerjili darbelerde malzemenin ani tepki vermesi ile açıklanabilir.

5.3.3. Enerji – Zaman grafikleri



Şekil 5.3.3. 5- 10- 15 J enerji seviyelerinde kompozit boru enerji- zaman grafikleri

Kompozit boruda beklendiği şekilde enerji hemen hemen aynı zaman aralığında fakat yükselerek uygulanmaya devam etmiştir. Bu da enerji sönümleme kabiliyetinin yüksek enerjili darbelerde yükseldiği anlamına gelir.

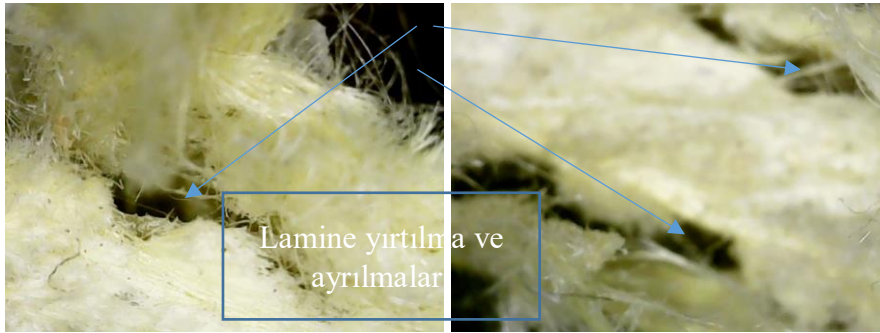
5.4. Optik mikroskop görüntü analizleri

5.4.1. Çekme deneyi görüntü analizleri

Malzemeler üretildikten sonra 250*25 mm ebatlarında ASTM D3039, D3039M standardına göre sulu kesim yapılarak kesilmiştir.



Şekil 5.4.1.A. Kompozit plaka çekme görüntüsü

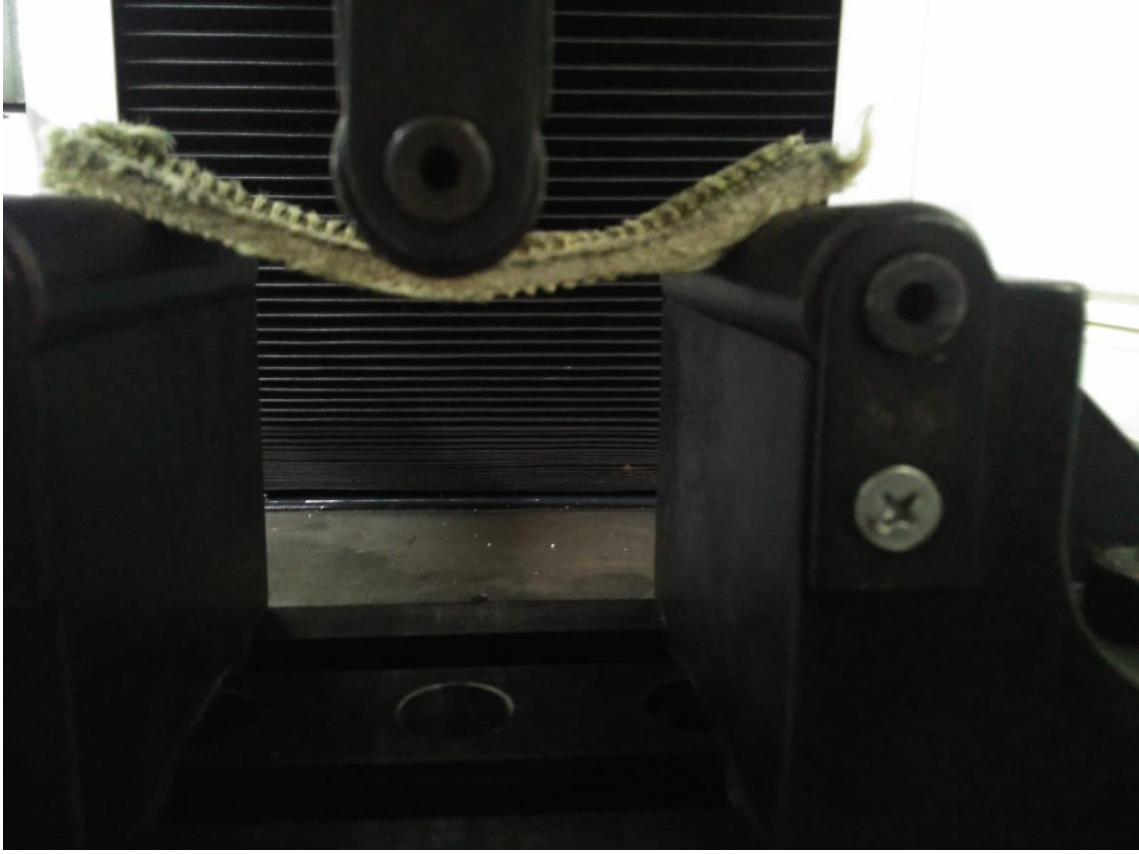


Şekil 5.4.1.B. Kompozit plaka çekme hasar yüzeyi mikroskop görüntüleri

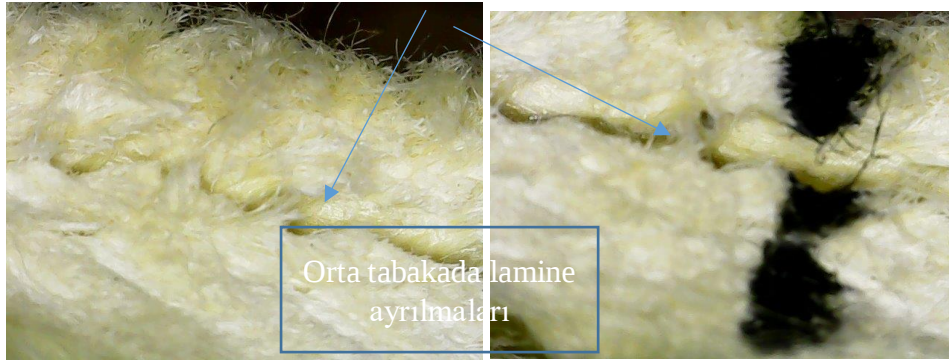
Kompozit plaka çekme deneyi esnasında çekme cihazı çene etkisine maruz kalmış önce matris çatlaması ve kırılması lif kırılması fiber kırılmaları beklendiği şekilde hasar uğramıştır. Bununla birlikte tabakalı polimer malzemenin en alt ve en üst tabakaları kuvvet uygulanan tabakalar olduğundan bu tabakalarda yırtılma ve ayrılma daha erken oluşmaktadır. Sonuçta numune fiber ayrılmaları ve kopmaları hasara uğramıştır.

5.4.2. Eğme deneyi görüntü analizleri

Malzemeler üretildikten sonra 127*12.7 mm ebatlarında ASTM D7264/D7264M, standardına göre sulu kesim yapılarak kesilmiştir.



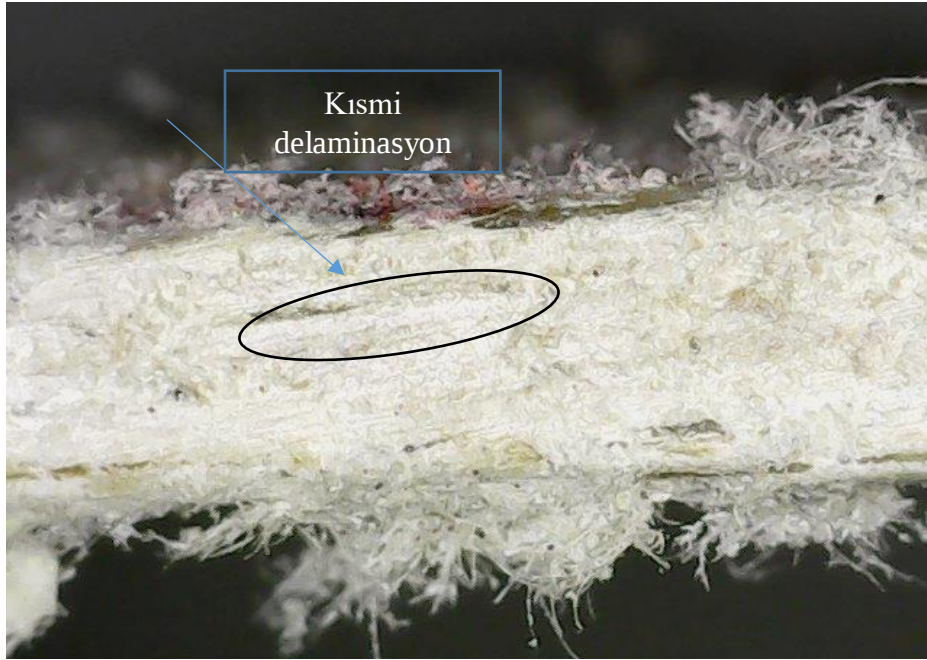
Şekil 5.4.2.A. Eğme Numune Görüntüsü



Şekil 5.4.2.B Kompozit plaka eğme hasar mikroskop görüntüsü

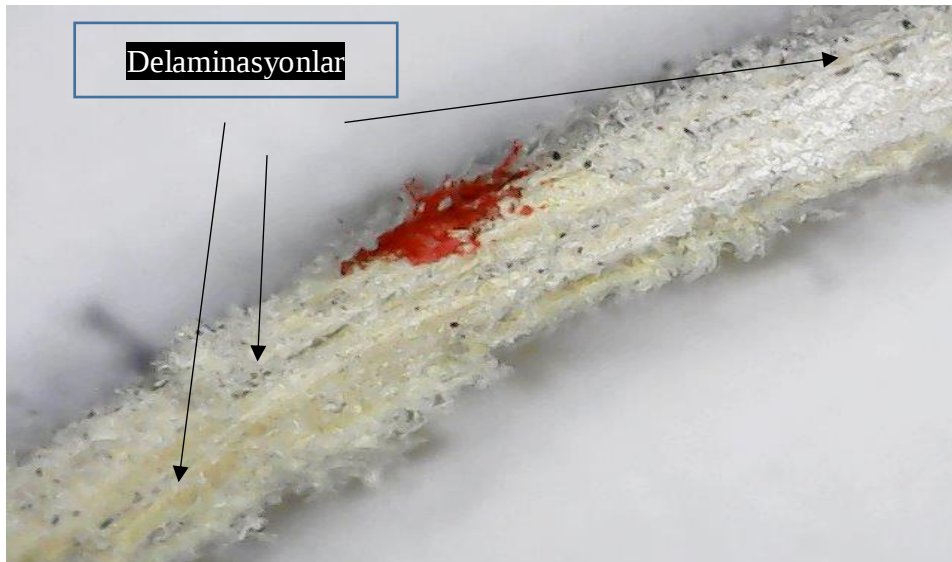
Kompozit plakada eğme deneyi sonucu orta tabakada ciddi oranda lamine ayrılmaları meydana gelmiştir. Aynı kesitteki çekme ve eğme gerilmeleri muhtemelen kompozit kumaşın reçine ile ıslatılmasında en zayıf bölge olan orta tabakada hasara yol açmıştır. Ancak bununla birlikte malzeme yüksek eğilme gerilmelerine dayanmıştır. Tabakalar arası kayma gerilmesi oldukça yüksektir.

5.4.3. Darbe deneyi görüntü analizleri



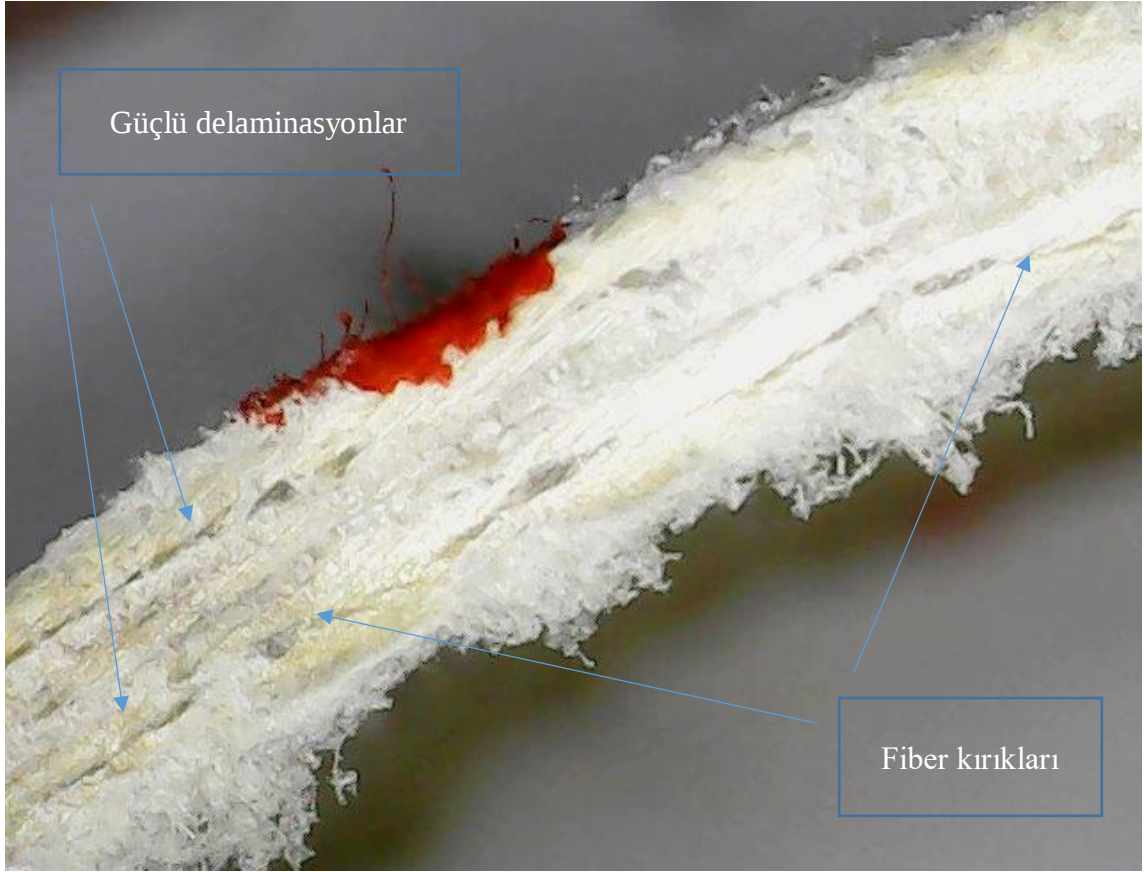
Şekil 5.4.3.A Kompozit boru 5 J darbe hasar mikroskop görüntüsü

5J enerji seviyesinde malzeme geometrisinden dolayı çok küçük delaminasyon başlangıçları görülmüş. Rebound enerjisinden de anlaşılacağı üzere malzeme darbeye kuvvetli bir şekilde cevap vermiştir.



Şekil 5.4.3.B Kompozit boru 10 J darbe hasar mikroskop görüntüsü

Enerji seviyesi yükseltildikçe delaminasyon miktarı yoğunlukça artmış ve boyları uzamıştır. Malzeme geometrisinden dolayı bu seviyedeki darbelere güçlü bir şekilde cevap vermektedir.



Şekil 5.4.3.C Kompozit boru 15 J darbe hasar mikroskop görüntüsü

15J enerji seviyesinde malzemede yüksek miktarda enerji absorbesi sonucu malzemede tabak ayrılmasına varabilecek delaminasyon aralığı, yoğunluğu ve uzunluğu ayrıca malzeme orta fiberlerinde kısmi fiber kırıkları oluşmuş. Boru darbe yüzeyinde küçük oranlı deplasman sonucu krater oluşmuştur.

6. SONUÇLAR

Kompozit plaka çekme deneyi açısından yüksek şekil değiştirme oranlarında yüksek çekme oranlarına sahiptir.

Eğilme gerilmesinde ise malzeme tabakalar arası kayma gerilmesinin yüksek olmasından dolayı düşük deplasman oranlarında yüksek eğilme mukavemeti göstermektedir. Ancak deplasman arttıkça reçinece zayıf orta bölgelerde lamine tabak ayrılmaları bariz bir şekilde kendini göstermektedir.

Kompozit boruda darbe enerjileri yükseltildiğinde uygulanan kuvvet, dolayısıyla numuneye boşaltılan enerji, bu enerjinin boşaltılma zamanı ve miktarı beklendiği şekilde Artmış ve malzemede kalıcı deformasyon alanı da buna paralel genişlemiştir.

Kumaş sarım tekniğinin kompozit silindirik geometrilerde önemli bir üretim metodu olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır.

KAYNAKÇA

- Abrate S.,1991, “Impact on laminated composite materials”, “Appl Mech Rev”, 44(4):155– 90.
- Abrate S.,1994, Impact on laminated composites: recent advances. Appl Mech Rev; V47:517-43.
- Abrate S.,1998, Impact on Composite Structures. Cambridge Press University;
- Aktas_ M, Atas C, _İçten BM, Karakuzu R.,2009, An experimental investigation of the impact response of composite laminates. Compos Struct ; 87:307–13.
- Anderson KL, Evans KE.,1992, Low velocity transverse impact of filament-wound pipes- Part 1- Damage due to static and impact loads. Compos Struct ; 20:37-45.
- Arikan, V., Sayman O.,2015, Comparative study on repeated impact response of E-glass fiber reinforced polypropylene & epoxy matrix composites. Composites Part B 83 1-6
- Aslan Z, Karakuzu R, Okutan B.,2003, The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading. Compos Struct ; 59:119-27.
- Al-Hassani STS, Kaddour AS.,1998, Strain rate effects on GRP, KRP and CFRP composite laminates. In: Key Engineering Materials, vol. 141e143. Switzerland: Trans Tech Publications; . 427-452.
- Asopa,V.Suresh,S. Khandelwal,M., Sharma,V.Asopa,S.S., Kaira,L.S.,2015, A comparative evaluation of properties of zirconia reinforced high impact acrylic resin with that of high impact acrylic resin. The Saudi Journal for Dental Research 6, 146–151
- Ayad NM, Badawi MF, Fatah AA.,2008, Effect of reinforcement of high-impact acrylic resin with zirconia on some physical and mechanical properties. Rev Cl’n Pesq Odontol (Impr) 4(3):145–51.
- Aydın, M., 2019, Development Of Fiber Reinforced Cylindrical Composite Structures ByFilament Winding Technique, M.S. Thesis, University of İzmir Institute of Technology *İzmir*,İzmir.
- Açar, S.B.,2021, “Stiren-Bütadien Kauçuğun Özelliklerinin Farklı Nanodolgularla Geliştirilmesi” Doktora Tezi, *Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Yalova*
- Asi, D., 2018, Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel Ve Mekaniksel

- Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uşak, 174s.
- Arslan, İ.,2016, POSS esaslı nanokompozitlerin foto-"click" tepkimesiyle hazırlanması ve endüstriyel uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, *Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yalova.
- Arabli V, Aghili A.,2013, Effect of silica nanocomposites on the curing kinetics of epoxy vinyl ester resin. *Proceeding Int Conf Nanomater Appl Prop* 2(3): 1-4.
- Brunnner AJ, Necala A, Rees M, Gasser PH, Karnmann X, Thomann R, et al.,2006, The influence of silicate-based nano-filler on the fracture toughness of epoxy resin. *Eng Fract Mech* 73:2336-45.
- Bayraktar, Ö., 2018, Polimer Matrisli Kompozit Malzemelerde İlave Olarak Kullanılan Parçacıkların Geometrisinin Kompozit Malzemelerin Fiziksel Ve Mekaniksel Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek lisans Tezi, *Uşak Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Uşak, 174s.
- Bezerra, Renato, Frederik Wilhelm, Sebastian Straus, and Holger Ahlborn. 2015. "Manufacturing of Complex Shape Composite Parts through the Combination of Pull-Braiding and Blow Moulding." *ICCM International Conferences on Composite Materials*-July (July): 19–24.
- Belingardi G., Grasso F., Vadori R., 1998, "Proceedings of the international conference experimental mechanics" (XI ICEM), Oxford, UK; 279.
- Belingardi, G. ve Vadori, R., 2002, "Low Velocity Impact Tests of Laminate Glass-Fiber-Epoxy Matrix Composite Material Plates", *International Journal of Impact Engineering*, 27:213-229.
- Belingardi, G. ve Vadori, R., (2003). "Influence of Laminate Thickness in Low Velocity Impact Behavior of Composite Material Plate", *Composite Structures*, 61:27-38.
- Bakkal M., 2011, "Kompozitler", *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği*, Sekizinci baskıdan çeviri, Kenan Genel, *Nobel Yayınevi*, Türkiye, 629-655.
- Biron, M.,2013, Thermosets and Composites, Second Edition. *Elsevier*, 187-685.
- Bibo GA, Hogg PJ. Review – the role of reinforcement architecture on impact damage mechanisms and post-impact compression behavior. *J Mater Sci* 1996; 31:1115–37.

- Bandaru,A.K., Ahmad,S.,Bhatnagar,N.,2017, Ballistic performance of hybrid thermoplastic composite armors reinforced with Kevlar and basalt fabrics. *Composites: Part A* 97 ,151–165
- Bocanegra-Bernal, M.H., Echeberria, J., Ollo, J., Garcia-Reyes,A., Domínguez Rios,C., Reyes-Rojas,A., Aguilar-Elguezabal,A.,2011,A comparison of the effects of multi wall and single-wall carbon nanotube additions on the properties of zirconia toughened alumina composites. *Carbon* 49, 1599 –1607
- Bouvet C, Rivallant S.,2016, Dynamic deformation, damage and fracture in composite materials and structures, chapter 4: damage tolerance of composite structures under low-velocity impact. Silberschmidt V.: Woodhead Publishing, Elsevier;
- Cho JU.,2006, Dynamic fracture analysis at strip with composite materials. *J Korea Academia-Industrial Coop Soc* ;7(3):265-70.
- Corbett GG, Reid SR.,1994, Failure of composite pipes under local loading with a hemispherically tipped indenter. *Int J Impact Eng* 1994; 15:465-90.
- Ceyhun, V., Turan, M., 2003, Tabakalı kompozit malzemelerin darbe davranışı. *Mühendis ve Makine*, 516, 35-41.
- Choi HY, Chang FK.,1990, Impact damage threshold of Laminated composites. In: Failure criteria and analysis in dynamic response, AMD, vol. 107. Dallas, TX: ASME Applied Mechanics Division; November . p. 31-5.
- Cantwell WJ, Morton J.1991, The impact resistance of composite materials — a review. *Composites* ; 22:347–62.
- Can, G., 2019, Fonksiyonellendirilmiş Alümina Ve Silika Katkılı Cam kevlar Elyaf /Epoksi Hibrit Kompozitlerin Darbe Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Isparta, 116s.
- Carrillo, J.G., Gamboa, R.A., Flores-Johnson, E.A., Gonzalez-Chi, P.I.,2012, Ballistic performance of thermoplastic composite laminates made from woven fabric and polypropylene matrix, *Polymer Testing* 31 512–519
- Choi HY, Chang FK.,1990, Impact damage threshold of Laminated composites. In: Failure criteria and analysis in dynamic response, AMD, vol. 107. Dallas, TX: ASME Applied Mechanics Division; November p. 31-5.
- Chen P, Shen Z, Wang JY.,2002, A new method for compression after impact strength prediction of composite laminates. *J Compos Mater* 36(5):589–610.

- Cantwell WJ, Morton J.,1991, The impact resistance of composite materials – a review. *Composites* ; 22:347–62
- Chawla, K.K., 2011, “Composite Materials Science and Engineering, Third Edition” *Springer* , New York, USA, 11-140.
- Cam Elyaf Sanayii A.Ş. 2004, *CTP Teknolojisi*. 15-47.
- Chung, D. ,1994, Carbon Fiber Composites. *Elsevier*, 65-78.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G.,2013, Fundamentals of materials science and engineering, *Wiley*, (471660817), 164-185.
- Carrillo, J.G., Gamboa, R.A., Flores-Johnson, E.A., Gonzalez-Chi, P.I.,2012, Ballistic performance of thermoplastic composite laminates made from aramid woven fabric and polypropylene matrix. *Polymer Testing* 31 512–519
- Drobny, J.G.,2014, Handbook of thermoplastic elastomers. Elsevier (2014).
- Davies GAO, Zhang X.,1995, Impact damage prediction in carbon composite structures. *Int J Impact Eng* ; 16:149-70.
- David NV, Gao XL, Zheng JQ.,2009, Ballistic resistant body armor: contemporary and prospective materials and related protection mechanisms. *App Mech Rev* ;62. 050802 (1–20).
- Demczyk, B.G., Wang, Y.M., Cumings, J., Hetman, M., Han, W., Zettl, A. Ritchie, R.O.,2002,Direct mechanical measurement of the tensile strength and elastic modulus of multiwalled carbon nanotubes. *Materials Science and Engineering A*334 173–178
- Deniz ME, Ozdemir, O., Ozen, M., Karakuzu R.,2013, Failure pressure and impact response of glass–epoxy pipes exposed to seawater. *Composites: Part B* 53 355–361
- Davies GAO, Zhang X.,1995, Impact damage prediction in carbon composite structures. *Int J Impact Eng* ; 16:149-70.
- Deniz ME, Karakuzu R.,2012, Seawater effect on impact behavior of glass–epoxy composite pipes. *Composites: Part B* 43 1130–1138
- D.P.N. Vlasveld, P.P. Parlevliet, H.E.N. Bersee, S.J. Picken,2005, Fibre–matrix adhesionin glass-fibre reinforced polyamide-6 silicate nano composites, *Composites A: Appl. Sci. Manuf.* 36 1–11.
- Demirci MT.,2015, The effects of SiO₂ nanoparticle addition on the fatigue behaviors of surface cracked and uncracked basalt fiber reinforced composite pipes. Ph.

- D. Thesis. Konya, S-179
- Deng S, Ye L, Friedrich K.,2007, Fracture behaviours of epoxy nanocomposites with nano-silica at low and elevated temperatures. *J Mater Sci*; 42:2766-74.
- Dresselhaus M., 2004, Unusual Properties And Structure Of Carbon Nanotubes. *Annual Review Of Materials Research*, Vol. 34: 247-278.
- D. C. Phillips,1974, "Interfacial Bonding and the Toughness of Carbon Fiber Reinforced Glass and Glass-Ceramics," *Journal of Materials Science*, Vol.9, No. 11, pp.1847-1854,
- Ertürk, S.,2012, “Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi İle Volfram Çekirdekli Bor Fiber Üretiminde Sistem Tasarımı” Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- Evcı, M., Gülgeç, M.,2012, The response of laminated composite plates under low-velocity impact loading *International Journal of Impact Engineering* 43 40-51
- Freitas M, Reis L.,1998, Failure mechanisms on composite specimens subjected to compression after impact. *Compos Struct*; 42:365-73.
- Fon Yen, C.,2012, A ballistic material model for continuous-fiber reinforced composites. *International Journal of Impact Engineering* 46 (2012) 11-22
- Freitas M, Reis L.,1998, Failure mechanisms on composite specimens subjected to compression after impact. *Compos Struct* ; 42:365-73.
- Gemi L., Şahin Ö.S., Akdemir A., 2017,, Experimental Investigation Of Fatigue Damage Formation Of Hybrid Pipes Subjected To Impact Loading Under Internal Pre-stress, *Composites Part B* 119, 196-205.
- Gonzalez Henriquez, Raelvim, and Pierre Mertiny. 2018. “3.21 Filament Winding Applications.” *Comprehensive Composite Materials II*, January, 556–77.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10313-3>.
- Gomez-del RT, Zaera R, Barbero E, Navarro C. Damage in CFRPs due to low velocity impact at low temperature. *Compos Part B* 2005; 36:41-50
- Gemi, L., Kara, M., Avcı, A. Low velocity impact response of prestressed functionally graded hybrid pipes. *Composites Part B* 106 (2016) 154-163
- Gleiter H. Mechanical Properties and Deformation Behavior of Materials Having Ultra-fine Microstructures. Netherlands: Kluwer Academic; 1993.
- Gurit Holding AG. (2000). Guide to Composites. In Available in URL: <http://www.netcomposites.com/> <http://www.gurit.com/guide-to-composites.aspx>

- Han JT, Cho K. Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range. *J Mater Sci* 2006; 41:4239-45.
- Hosur MV, Adbullah M, Jeelani S. Studies on the low-velocity impact response of woven hybrid composites. *Compos Struct* 2005; 67:253–62.
- Hammel E, Tang X, Trampert M, Schmit T, Mauthner K, Eder A, et al. Carbon nanofibers for composite applications. *Carbon* 2004;42(5–6):1153–8.
- Hull D, Shi YB. Damage mechanism characterization in composite damage tolerance investigations. *Compos Struct* 1993;23(2):99–120.
- Harding J, Ruiz C. The mechanical behaviour of composite materials under impact loading. In: *Key Engineering Materials*, vol. 141e143. Switzerland: Trans Tech Publications; 1998. 403-426
- Harding J. The high-Speed punching of woven-Roving glass-reinforced composites. In: *Inst Phys Conf Ser No. 47 [Chapter 3]*. Bristol and New York: The Institute of Physics; 1979. pp. 318-330.
- Hosur MV, Abdullah M, Jeelani S. Manufacturing and low velocity impact characterization of foam filled 3-D integrated core sandwich composites with hybrid face sheets. *Compos Struct* 2005; 69:167-81.
- Hancox NL. An overview of the impact behaviour of fiber-reinforced composites. In: Reid S, Zhou G, editors. *Chapter 1 of Impact Behavior of Fiber- Reinforced Composite Materials and Structures*. Florida: CRC Press LLC; 2000. p. 1-8.
- HARRISON, A R. 2000. *A Low-Investment Cost Composites High Roof for the Ford Transit van 1999 Ford Motor Co. Integrated Design and Manufacture Using Fibre-Reinforced Polymeric Composites*. Woodhead Publishing Ltd.
<https://doi.org/10.1533/9781855738874.207>.
- Hebert M., Rousseau C.E., Shuka A., (2008), “Shock loading and drop weight impact response of glass reinforced polymer composites”, “*Composite Structures*”, 84(3):199-208.
- Ibekwe SI, Mensah PF, Li G, Pang SS, Stubblefield MA. Impact and post impact response of laminated beams at low temperatures. *Compos Struct* 2007;79: 12-7.
- Icten, B. M., Atas,C., Aktas,M.,Karakuzu,R. Low temperature effect on impact response of quasi-isotropic glass/epoxy laminated plates *Composite Structures* 91 (2009) 318–323

- Internet: Netcomposites. Wet/Hand Lay-up. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.netcomposites.com%2Fguide-tools%2Fguide%2Fmanufacturing%2Fwethand-lay-up%2F&date=2016-05-18>, Son Erişim Tarihi: 03.05.2016b.
- Iannucci L, Pope D. High velocity impact and armour design. eXPRESS. Polym Lett 2011;5(3):262–72.
- Iijima S. Helical microtubules of graphitic carbon. Nature 1991;354(6348):56–8.
- Jang BZ, Chen LC, Wang CZ, et al. Impact resistance and energy absorption mechanisms in hybrid composites. Compos Sci Technol 1989; 34:305–35.
- J.T. Han, K. Cho, Nanoparticle-induced enhancement in fracture toughness of highly loaded epoxy composites over a wide temperature range, J. Mater. Sci. 41 (2006) 4239–4245.
- Kang KW, Lee SP, Lee JS, Koh BK. Statistical evaluation for residual strength of impacted composite materials. J Korea Academia-Industrial Coop Soc 2010;11(2):426-34.
- Kara, M., 2004, Düşük Hızlı Darbe Sonrası Yama ile Tamir Edilmiş Filaman Sarım Ctp Boruların İç Basınç Altındaki Hasar Davranışı, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 141s.
- Kılıçtek, S., 2020, Farklı Tabakalarda Nanoalümina Katkılı Karbon Kevlar Hibrit Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin ve Darbe Tokluğunun Araştırılması, Yüksek lisans Tezi, *İstanbul Aydın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 98s.
- Kis A, Csa'nyi G, Salvetat J-P, Lee T-N, Couteau E, Kulik AJ, et al. Reinforcement of single-walled carbon nanotube bundles by intertube bridging. Nature 2004;3(3):153–7.
- Kausar, A.: Polyamide 1010/polythioamide blend reinforced with graphene nanoplatelet for automotive part application. Advances in Materials Science 17 (2017) 24-36.
- Katunin, A., Krukiewicz, K., Herega, A. and Catalanotti, G.: 2016. Concept of a conducting composite material for lightning strike protection. Advances in Materials Science 16 (2016) 32-46.
- Kim, S., Lee, J., Roh, C., Eun, J. and Kang, C.: Evaluation of carbon fiber and p-aramid composite for industrial helmet using simple cross-ply for protecting human heads. Mechanics of Materials, 139 (2019) 103203.
- K.T. Faber, A.G. Evans, Crack deflection processes – I. Theory, Acta. Metall. 31(1983) 565–576.

- K.T. Faber, A.G. Evans, Crack deflection processes – II. Experiment, *Acta. Metall.* 31 (1983) 577–584.
- Kotil, T., 1991, Ceramic Composites: Experimental And Analytical Study Of SiC /Si₃N₄ Composites, Doctor of Philosophy, The University of Michigan, Michigan.
- Kurtuluş, C. (2016). “Karbon Elyaf Takviyeli Epoksi Matrisli Kompozitlerin Özelliklerine Poss Nano dolgusunun Etkileri”. Yüksek Lisans Tezi, *Yalova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yalova.
- Kim, Jung-Seok, Hyuk-Jin Yoon, and Kwang-Bok Shin. 2011. “A Study on Crushing Behaviors of Composite Circular Tubes with Different Reinforcing Fibers.” *International Journal of Impact Engineering* 38 (4): 198–207.
<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2010.11.007>.
- Kuchibhatla V.N.T., Karakoti A.S., Bera S. And Seal S. 2007, One Dimensional Nanostructured Materials. *Progress in Materials Science* 52: 699–913.
- Kevlar, D. Technical guide DuPont advanced fiber systems
- Kingery, W.D., Bowen, H.K., Uhlmann, D.R., 1960, *Introduction To Ceramics*, 2nd Ed., John Wiley & Sons, New York.
- L. Sun, R.F. Gibson, F. Gordaninejad, J. Suhr, Energy absorption capability of nanocomposites: a review, *Compos. Sci. Technol.* 69 (2009) 2392–2409.
- L.Q. Liu, H.D. Wagner, Rubbery and glassy epoxy resins reinforced with carbon nanotubes, *Compos. Sci. Technol.* 65 (2005) 1861–1868.
- Lee J, Kong C, Soutis C. Modelling of low velocity impact damage in laminated composites. *J Mech Sci Technol* 2005;19(4):947-57.
- Li N, Chen PH. Experimental investigation on edge impact damage and compression-after-impact behavior of stiffened composite panels. *Compos Struct* 2016; 138:134–50.
- Luo, J.J., Daniel, I.M. (2003). Characterization and modeling of mechanical behavior of polymer/clay nanocomposites, *Composite Science and Technology*, 63(11), 1607–1616
- Mazumdar, S. K. (2001). Composites manufacturing: Materials, product, and process engineering. In *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*.
- Mazumdar, S. K., 2002, “Composites Manufacturing Materials, Product, and Process Engineering”, *CRC Press*, London, 20-39.
- M.G. Dobb, R.M. Robson, A.H. Roberts, The ultraviolet sensitivity of

- Kevlar 149 and Technora fibres, *J. Mater. Sci.* 28 (3) (1993) 785.
- M.M.J. Treacy, T.W. Ebbesen, J.M. Gibson, Exceptionally high Young's modulus observed for individual carbon nanotubes, *Nature* 381 (1996) 678–680.
- Moura MFSF, Gonc Alves JPM. Modelling the interaction between matrix cracking and delamination in carbon-epoxy laminates under low velocity impact. *Compos Sci Technol* 2004; 64:1021-7.
- Mayo MJ. Mechanical properties and deformation behavior of materials having ultra-fine microstructures. Netherlands: Kluwer Academic; 1993.
- Njguna, J., Pielichowski, K., Desai, S. (2008). Nanofiller-reinforced polymer nanocomposites, *Polymer for Advanced Technologies*, 19, 947-959.
- Ostré, B., Bouvet, C., Minot, C., Aboissiére, J. Finite element analysis of CFRP laminates subjected to compression after edge impact. *Composite Structures* 153 (2016) 478–489
- Peigney A, Laurent CH, Flahaut E, Rousset A. Carbon nanotubes in novel ceramic matrix nanocomposites. *Ceram Int* 2000;26(6):677–83. R. A. Sam bell, A. Briggs, D. C. Phillips, and D. H. Bowen, "Carbon Fiber Komposites with Ceramic and Glass Matrices, Part 2 Continuous Fibers," *Journal of Materials Science*. Vol.7, No. 6, pp. 676-681, 1972.
- P. Kere, Design with Composites, *Encyclopedia of Composites*, pp. 725{737, Wiley & Sons, Inc., 2012.
- Phonthammacha N, Chia H, He C. One-Step synthesis of oval shaped silica/epoxy nanocomposite: process, formation mechanism and properties. *Deliv Nanocomposites* 2012; 23:497-508.
- P. Kim, L. Shi, A. Majumdar, P.L. McEuen, Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes, *Phys. Rev. Lett.* 87 (2001) 215502.
- Peigney A, Legorreta García F, Estourne's C, Weibel A, Laurent C. Toughening and hardening in double-walled carbon nanotube/nanostructured magnesia composites. *Carbon* 2010;48(7):1952–60.
- Richarson MOW, Wisheart MJ. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites* 1996;27A:1123-31.
- R. Dagani, Rheology and processing experience of new metallocene polyolefins, *Cd EN* 77 (1999) 25.

- Ravikant B Mulage, Alok Kumar G, Low Velocity Impact Analysis Of Composite Laminates And Shell Structures By Finite Element Method *International Journal of Advanced Trends in Engineering and Technology* Volume 2, Issue 2, 2017.
- Reid, S.R., and Zhou, G. (2000) Impact behaviour of fibre-reinforced composite materials and structures. *CRC Press, Woodhead Pub.*, United States of America, 303 s.
- Rafiee, R. On the mechanical performance of glass-fibre-reinforced thermosetting-resin pipes: A review. *Composite Structures* 143 (2016) 151–164
- Richardson MOW, Wisheart MJ. Review of low-velocity impact properties of composite materials. *Composites* 1996;27A:1123-31.
- Reid SR, Peng C, Ashton JN. Tolerance of composite pipes to local impact damage. *Proc Instn Mech Engrs, Part E; J Process Eng* 1996;210(3):181-92.
- Ramadhan, A.A., Abu Talib, A.R., Mohd Rafie, A.S., Zahari, R. High velocity impact response of Kevlar-29/epoxy and 6061-T6 aluminum laminated panels. *Materials and Design* 43 (2013) 307–321
- Rouchon J. Fatigue and damage tolerance aspects for composite aircraft structures. In: *Proceedings of ICAF symposium, Delft.*
- Santiago.R, Cantwell,W. , Alves.M. Impact on thermoplastic fibre-metal laminates: Experimental observations. *Composite Structures* 159 (2017) 800–817
- Sutherland LS, Soares CG. Impact characterization of low fibre volume glass reinforced polyester circular laminated plates. *Int J Impact Eng* 2005; 31:1-23.
- Semerciöz, S.M. (2021). “Bor Fiber Takviyeli Polimer Matrisli Kompozitlerin Mekanik ve Termal Özelliklerinin İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Soliman, E. M., Sheyka, M. P., Taha, M. R. Low-velocity impact of thin woven carbon fabric composites incorporating multi-walled carbon nanotubes *International Journal of Impact Engineering* 47 (2012) 39-47
- Samal SS, Bal S. Carbon nanotube reinforced ceramic matrix composite-a review. *J Min Mater Char Eng* 2008;7(4):355–70.
- Sutherland LS, Soares CG. Impact on low fibre-volume, glass polyester rectangular plates. *Compos Struct* 2005; 68:13-22
- Sutherland LS, Soares CG. Impact characterization of low fibre volume glass

- reinforced polyester circular laminated plates. *Int J Impact Eng* 2005; 31:1-23.
- Sorrentino, L., Bellinia, C., Corrado, A., Polinia, W., Aricò, R. Ballistic performance evaluation of composite laminates in kevlar 29. *Procedia Engineering* 88 (2015) 255 – 262
- S. Berber, Y.K. Kwon, D. Tomanek, Unusually high thermal conductivity of carbon nanotubes, *Phys. Rev. Lett.* 84 (2000) 4613–4616.
- S. Bazhenov, Dissipation of energy by bulletproof aramid fabric, *J. Mater. Sci.* 32 (15) (1997) 4167.
- Sofi, Tasdeeq, Stefan Neunkirchen, and Ralf Schledjewski. 2018. “Path Calculation, Technology and Opportunities in Dry Fiber Winding: A Review.” *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science* 4 (3): 57–72.
<https://doi.org/10.1080/20550340.2018.1500099>.
- Shyr, T.W., and Pan, Y. H. (2003) Impact resistance and damage characteristics of composite laminates. *Composite Structures*, 62: 193–203.
- Sierakowski, R. L., and Chaturvedi, S. K. (1997) Dynamic loading and characterization of fiber-reinforced composites. *John Wiley & Sons, Inc.*, United States of America, 252 s.
- Sulaiman, B.H., 2019, Vibration Damping Property, Tensile And Flexural Behaviour Of Kevlar-Carbon/Epoxy/Nanographene Composite, M.S. Thesis, University of Gaziantep, *Gaziantep*
- Sümer, G., 1992, Endüstriyel Seramikler, C.2, Anadolu Üniv. Yayınları, Eskişehir.
- Sofi, Tasdeeq, Stefan Neunkirchen, and Ralf Schledjewski. 2018. “Path Calculation, Technology and Opportunities in Dry Fiber Winding: A Review.” *Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science* 4 (3): 57–72.
<https://doi.org/10.1080/20550340.2018.1500099>.
- Sayman, O., Arıkan, V., Dogan, A., Soykok, İ.F. Dogan, T. Failure analysis of adhesively bonded composite joints under transverse impact and different temperatures. *Composites: Part B* 54 (2013) 409–414
- Suemasu H, Sasaki W, Ishikawa T, Aoki Y. A numerical study on compressive behavior of composite plates with multiple circular delaminations considering delamination propagation. *Compos Sci Technol* 2008;68(12):2562–7.

- Sinnott, S. B. Andrews, R. Carbon Nanotubes: Synthesis, Properties, and Applications. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 26(3):145–249 (2001)
- Samal SS, Bal S. Carbon nanotube reinforced ceramic matrix composite-a review. *J Min Mater Char Eng* 2008;7(4):355–70.
- Sun J, Iwasa M, Nakayama T, Niihara K, Gao L, Jin X. Pressureless sintering of alumina carbon nanotubes composites in air atmosphere furnace and their mechanical properties. *J Ceram Soc Jpn Supplement* 2004;112(5): S403–6
- Taib, Abdelaziz A., Rachid Boukhili, Said Achiou, Sebastien Gordon, and Hychem Boukehili. 2006. “Bonded Joints with Composite Adherends. Part I. Effect of Specimen Configuration, Adhesive Thickness, Spew Fillet and Adherend Stiffness on Fracture.” *International Journal of Adhesion and Adhesives* 26 (4): 226–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2005.03.015>.
- Tirillò, J., Ferrante, L., Sarasini, F., Lampani, L., Barbero, E., Sánchez-Sáez, S., Valente, T., Gaudenzi, P. High velocity impact behaviour of hybrid basalt-carbon/epoxy composites. *Composite Structures* 168 (2017) 305–312
- T.J. Kang, C. Kim, Energy-absorption mechanisms in Kevlar multi-axial warp-knit fabric composites under impact loading, *Composites Science and Technology* 60 (2000) 773–784.
- Tzetzis D, Mansour G, Tsiafis I, Pavlidou E. Nanoidentation measurements of fumed silica epoxy reinforced nanocomposites. *J Reinf Plastics Compos* 2012: 0-14.
- Vasylykiv O, Sakka Y, Skorokhod VV. Low-temperature processing and mechanical properties of zirconia and zirconia-alumina nanoceramics. *J Am Ceram Soc* 2003;86(2):299–304.
- Yu M, Files BS, Arepali S, Ruoff RS. Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties. *Phys Rev Lett* 2000;84(24):5552–5.
- Yu M, Lourie O, Dyer MJ, Moloni K, Kelly TF, Ruoff RS. Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load. *Science* 2000;287(5453):637–40.
- Yang, L., Yan, Y., Kuang, N. Experimental and numerical investigation of aramid fibre reinforced laminates subjected to low velocity impact. *Polymer Testing* 32 (2013) 1163–1173

- Yanen, C., 2016, Tabakalı hibrit kompozitlerin bireysel zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâzığ, 150s.
- Yöney, H.2007 El Yatırma Yöntemi ile Elyaf Takviyeli Kompozit Yapıların Üretilmesi Ve Özellikleri, Yüksek lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 197s.
- Yırtımcı, A.Y.O. (2011). “Kompozit Levhalarda Yüzey Formunun Ve Çevresel Aşınmanın Darbe Performansına Etkisi”. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Yavaş, M.O. (2009). “Hafif Silahlara Karşı Bireysel Savunma Amaçlı Kompozit Malzeme Tasarımı ve Balistik Dayanımı”. Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Yalçın, E.B., Günay, V., Marşoğlu, M., “Cam Dokuma Kumaşla Üretilmiş Kompozitlerin Darbe Özelliklerinin Araştırılması”, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma* 5,116-128, 2013.
- Zou Z, Reid SR, Li S, Soden PD. Application of a delamination model to laminated composite structures. *Compos Struct* 2002; 56:375-89.
- Zhu Y-F, Shi L, Liang J, Hui D, Lau K-t. Synthesis of zirconia nanoparticles on carbon nanotubes and their potential for enhancing the fracture toughness of alumina ceramics. *Compos. Part B* 2008;39(7–8):1136–41.
- Zuccari AG, Oshida Y, Moore BK. Reinforcement of acrylic resins for provisional fixed restorations. (Part I): Mechanical properties. *Biomed Mater Eng* 1997;7:327–43.
- Zettl,A. Presented at the Adsorbent Carbon Workshop and Science of CarbonNanotubes Workshop, Lexington, KY, July 10-11, 1997.
- Wang J, Waas AM, Wang H. Experimental and numerical study on the lowvelocity impact behavior of foam-core sandwich panels. *Compos Struct* 2013; 96:298–311.
- Wong EW, Sheehan PE, Lieber CM. Nanobeam mechanics: elasticity, strength, and toughness of nanorods and nanotubes. *Science* 1997;277(5334):1971–5.
- Welsh LM, Harding J. Effect of strain rate on the tensile failure of woven reinforced polyester resin composite; 1985. *Proc. DYMAT 85, Int. Conf. On Mech. And Physical Behaviour of Materials Under Dynamic Loading, Jour de Physique, Colloque C5*, pp. 405-414.
- X. Liu, W. Yu, N. Pan, Evaluation of high performance fabric under

light irradiation, J. Appl. Polym. Sci. 120 (1) (2011) 552.

