T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV SEKTÖRÜNE YÖNELİK BİYOESASLI KALSİYUM KARBONAT VE ALÜMİNYUM TRİHİDRAT İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ CAM ELYAF/POLYESTER KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Miray ÖZBAKIŞ

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

TEMMUZ 2025

T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV SEKTÖRÜNE YÖNELİK BİYOESASLI KALSİYUM KARBONAT VE ALÜMİNYUM TRİHİDRAT İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ CAM ELYAF/POLYESTER KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Miray ÖZBAKIŞ
(22435016008)
ORCID: 0009-0009-3128-3289

Polimer Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Polimer Malzeme Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışman: Doç.Dr. Pınar TERZİOĞLU
ORCID: 0000-0003-4114-7044

TEMMUZ 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 22435016008 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Miray ÖZBAKIŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "OTOMOTİV SEKTÖRÜNE YÖNELİK BİYOESASLI KALSİYUM KARBONAT VE ALÜMİNYUM TRİHİDRAT İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ CAM ELYAF/POLYESTER KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Doç. Dr. Pınar TERZİOĞLU** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Doç. Dr. Meral AKKOYUN KURTLU** Bursa Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Mehmet ORHAN Bursa Uludağ Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 17 Temmuz 2025

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 240Y019 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Miray ÖZBAKIŞ

İmzası:

Aileme ve sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam ve eğitim yolculuğumda, akademik bilgi birikimi ve mesleki tecrübeleriyle ihtiyaç duyduğum her zaman özveri ile destek sunan değerli danışmanım Doç. Dr. Pınar TERZİOĞLU'na tüm emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans eğitimim sürecinde ve çalışmalarımın yürütülmesi konusunda imkan sağlayan Sazcılar Otomotiv A.Ş'ye teşekkür etmek isterim.

Tez çalışmamda sağladıkları teknik destekler için Ermetal Otomotiv A.Ş ve Plasmot Mobilya ve Otomotiv Plastikleri San. Tic. A.Ş.'ye teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, hayatımın her alanında beni destekleyen sevgili aileme içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Temmuz 2025

Miray ÖZBAKIŞ
Polimer Malzeme Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa
ÖNSÖZ ... **vii**
İÇİNDEKİLER ... **viii**
KISALTMALAR ... **x**
SEMBOLLER ... **xii**
ÇİZELGE LİSTESİ ... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ... **xiv**
ÖZET ... **xv**
SUMMARY ... **xvi**
1. GİRİŞ ... **1**
1.1 Tezin Amacı ... 3
2. KOMPOZİT MALZEMELER ... **5**
2.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi ... 5
2.2 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri ve Sınıflandırılması ... 6
2.2.1 Matris malzemesi ... 7
2.2.1.1 Seramik matrisli kompozitler ... 7
2.2.1.2 Metal matrisli kompozitler ... 7
2.2.1.3 Polimer matrisli kompozitler ... 8
2.2.2 Takviye elemanları ... 8
2.2.2.1 Fiber takviyeli kompozitler ... 9
2.2.2.2 Partikül takviyeli kompozitler ... 9
2.2.2.3 Tabakalı kompozitler ... 10
2.2.2.4 Hibrit kompozitler ... 10
2.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları ... 11
2.4 Cam Elyaf Takviyeli Kompozitler ... 12
2.5 Yumurta Kabuğu ... 13
2.5.1 Yumurta kabuğunun yapısal özellikleri ... 14
2.5.2 Literatürde yumurta kabuğu katkılı cam elyaf takviyeli kompozitler ... 15
2.6 Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri ... 17
2.6.1 Açık kalıplama ... 17
2.6.1.1 El yatırması yöntemi ... 18
2.6.1.2 Püskürtme yöntemi ... 18
2.6.1.3 Filament sarma yöntemi ... 19
2.6.2 Kapalı kalıplama ... 20
2.6.2.1 Vakum torbalama yöntemi ... 20
2.6.2.2 Vakum infüzyon yöntemi ... 21
2.6.2.3 Reçine transfer yöntemi ... 22
2.6.2.4 Basınçla kalıplama yöntemi ... 22
2.6.2.5 Pultrüzyon yöntemi ... 23
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR ... **25**
3.1 Malzemeler ... 25

3.2 Biyodolgunun Kompozit Üretimi İçin Uygun Parçacık Boyutunun Belirlenmesi 26
3.3 Yumurta Kabuğu ve ATH Katkılı Cam Elyaf Takviyeli Kompozitin Üretimi 29
3.4 Karakterizasyon Çalışmaları 29
3.4.1 Yapısal karakterizasyon 30
3.4.2 Mikroyapısal karakterizasyon 30
3.4.3 Mekanik özelliklerin tayini 30
3.4.3.1 Çekme testi 30
3.4.3.2 Eğme testi 31
3.4.3.3 Darbe testi 31
3.4.4 Yanmazlık tayini 31
4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 33
4.1 FT-IR Analizi 33
4.2 SEM Analizi 35
4.3 Çekme Özellikleri 36
4.4 Eğme Özellikleri 38
4.5 Darbe Özellikleri 39
4.6 Yanmazlık UL94 41
5. DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER 43
5.1 Çalışmanın Uygulama Alanı 44
KAYNAKLAR 46
ÖZGEÇMİŞ 55

KISALTMALAR

Al_2O_3	**:** Alüminyum Oksit
Cl_2O_3	**:** Diklor Trioksit
K_2O	**:** Potasyum Oksit
P_2O_5	**:** Fosfor Pentoksit
Al	**:** Alüminyum
ATH	**:** Alüminyum Trihidrat
C=O	**:** Karbonil Grubu
$Ca(OH)_2$	**:** Kalsiyum Hidroksit
$CaCO_3$	**:** Kalsiyum Karbonat
CFRP	**:** Karbon Elyaf Takviyeli Polimer
CMC	**:** Seramik Matrisli Kompozitler
CTP	**:** Cam Elyaf Takviyeli Polyester
Cu	**:** Bakır
FRP	**:** Fiber Takviyeli Kompozitler
FRP	**:** Fiber Takviyeli Polimer
FT-IR	**:** Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrofotometresi
GFRP	**:** Cam Elyaf Takviyeli Polimer
gsm	**:** gram / metrekare
MekP	**:** Metil etil keton peroksit
Mg	**:** Magnezyum
MgO	**:** Magnezyum oksit
MMC	**:** Metal Matrisli Kompozitler
MÖ	**:** Milattan Önce
MPa	**:** Megapascal
NFRP	**:** Doğal Elyaf Takviyeli Polimer
OH	**:** Hidroksil Grubu
OPK	**:** Odun Plastik Kompozit
PMC	**:** Polimer Matrisli Kompozitler
RTM	**:** Reçine Transfer Kalıplama Metodu
SO_3	**:** Kükürt trioksit

SEM **:** Taramalı Elektron Mikroskobu

SiO_2 **:** Silisyum Dioksit

SiC **:** Silisyum Karbür

SiN **:** Silisyum Nitrit

SrO **:** Stronsiyum Oksit

Ti **:** Titanyum

UV **:** Ultraviyole

SEMBOLLER

%	**:** Yüzde Sembolü
ρ	**:** Yoğunluk Sembolü
°C	**:** Santigrat Derece
µm	**:** Mikrometre
mm	**:** Milimetre

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1: Termoset ve termoplastik kompozitlerin özelliklerinin kıyaslanması. ... **8**
Çizelge 2.2: Çeşitli cam elyaf sınıflarının fiziksel özellikleri. **13**
Çizelge 2.3: Yumurta kabuğunun içerdiği bileşikler. **15**
Çizelge 3.1: Kompozit plakaların kompozisyonları. **27**
Çizelge 3.2: Yumurta kabuğu katkılı kompozit plakaların kompozisyonları. **29**
Çizelge 4.1: Kompozit plakaların çekme değerleri. **37**
Çizelge 4.2: Kompozitlerin eğme değerleri. **39**
Çizelge 4.3: Kompozit plakaların darbe değerleri. **40**
Çizelge 4.4: Kompozit numunelerinin ortalama yanma süreleri. **41**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin bileşenleri. **6**
Şekil 2.2: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması. **6**
Şekil 2.3: (a) Süreksiz (kesikli) ve (b) sürekli elyaf takviyeli kompozitler. **9**
Şekil 2.4: Partikül takviyeli kompozitler. **10**
Şekil 2.5: Cam elyafın sınıflandırması. **13**
Şekil 2.6: Yumurta kabuğu. **15**
Şekil 2.7: Kompozit üretim teknikleri. **17**
Şekil 2.8: El yatırması yöntemi. **18**
Şekil 2.9: Püskürtme yöntemi. **19**
Şekil 2.10: Filament sarma yöntemi. **20**
Şekil 2.11: Vakum torbalama yöntemi. **21**
Şekil 2.12: Vakum infüzyon yöntemi. **21**
Şekil 2.13: RTM yöntemi. **22**
Şekil 2.14: Basınçla kalıplama yöntemi. **23**
Şekil 2.15: Pultrüzyon yöntemi [91]. **24**
Şekil 3.1: Keçe ve dokuma formundaki cam elyaflar. **25**
Şekil 3.2: Üretim ekipmanları (a) roller (b) fırça (c) katkı (d) kalıp. **27**
Şekil 3.3: Farklı parçacık boyutlarında yumurta kabuğu katkısı içeren reçineler. **27**
Şekil 3.4: Katkılı reçinenin kalıp yüzeyine uygulanması. **28**
Şekil 3.5: Katkılı reçinenin elyaf yüzeyine uygulanması. **28**
Şekil 3.6 : Kürlenmiş kompozit plakalar. **28**
Şekil 3.7: Çekme testi. **31**
Şekil 3.8: Eğme testi. **31**
Şekil 3.9: UL94 yanmazlık testi. **32**
Şekil 4.1: Yumurta kabuğu FT-IR spektrumu. **33**
Şekil 4.2: Kompozitlerin FT-IR spektrumları. **35**
Şekil 4.3: Kompozit numunelerinin kesit SEM mikrogramları. **36**
Şekil 4.4: Kompozit numunelerinin yüzey SEM mikrogramları. **36**
Şekil 4.5: Kompozit plakaların çekme testi grafikleri. **38**
Şekil 4.6: Kompozitlerin (a) eğme modülü ve (b) eğme mukavemeti değerleri. **39**
Şekil 4.7: Kompozitlerin darbe değerleri. **40**
Şekil 4.8: Yanmazlık testi uygulanan kompozitlerin yanma öncesi ve sonrası. **42**

OTOMOTİV SEKTÖRÜNE YÖNELİK BİYOESASLI KALSİYUM KARBONAT VE ALÜMİNYUM TRİHİDRAT İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ CAM ELYAF/POLYESTER KOMPOZİTLERİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Günümüzde doğal atıkların yüksek katma değerli malzemelere dönüştürülmesi, sürdürülebilir malzeme geliştirme yaklaşımlarında önemli bir yer tutmaktadır. Bu bağlamda, kalsiyum karbonat açısından zengin olan yumurta kabuğu atıkları, polimer esaslı kompozitlerin çevre dostu ve maliyet etkin şekilde güçlendirilmesi amacıyla umut vadeden bir biyodolgu alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Bu çalışmada, atık yumurta kabuğu ve alüminyum trihidrat (ATH) ile güçlendirilmiş cam elyaf takviyeli polyester kompozitler el yatırması yöntemi ile üretilerek katkıların kompozit performansına etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, toplam reçine ağırlığının %10'u olacak şekilde yalnızca yumurta kabuğu ve yalnızca ATH içeren kompozitlerin yanı sıra, yumurta kabuğu:ATH oranı 5:5, 2,5:7,5 ve 7,5:2,5 olan hibrit kompozitler hazırlanmıştır. Laminasyon sürecinde keçe ve bezayağı dokuma cam elyaf (300 gr/m^2) takviyeleri sırasıyla toplamda 7 tabakadan oluşan kompozit eldesi için kullanılmıştır. Kompozitlerin yapısal özellikleri Fourier dönüşümlü kızılötesi (FT-IR) spektrofotometresi ve morfolojik özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak belirlenmiştir. Kompozitlerin mekanik özelliklerinin incelenmesi için çekme testi, üç nokta eğme testi ve darbe testleri yapılmıştır. Kompozitlere UL94 yatay yanmazlık testi uygulanmıştır. Sonuç olarak cam elyaf takviyeli polyester esaslı kompozite yalnızca yumurta kabuğu ilavesi ile eğme modülünde, çekme ve darbe dayanımında artış meydana gelmiştir. Yumurta kabuğu ve ATH'nın bir arada kullanımı ile kompozitlerin çekme mukavemetinde az bir miktarda artış meydana gelirken kopma uzaması değerlerinde yaklaşık %45'lik bir azalma tespit edilmiştir. Yanma özellikleri incelendiğinde katkı ilavesi ile kompozitlerin yanma süreleri uzamıştır. Tüm kompozitler yavaş yanan (HB) malzeme olarak sınıflandırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Alüminyum trihidrat, Yumurta kabuğu, Cam elyaf, Polimer kompozit, El yatırması, Sürdürülebilirlik.

DEVELOPMENT OF GLASS FIBER/POLYESTER COMPOSITES REINFORCED WITH BIO-BASED CALCIUM CARBONATE AND ALUMINUM TRIHYDRATE FOR THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

SUMMARY

Nowadays, the transformation of natural wastes into high value-added materials has an important place in sustainable material development approaches. In this context, eggshell wastes, which are rich in calcium carbonate, are evaluated as a promising biofiller alternative for the purpose of reinforcing polymer-based composites in an environmentally friendly and cost-effective manner. In this study, glass fiber reinforced polyester composites reinforced with waste eggshell and aluminum trihydrate (ATH) were produced by hand lay-up method and the effects of additives on composite performance were investigated. For this purpose, in addition to composites containing only eggshell and only ATH as 10% of the total resin weight; hybrid composites with eggshell:ATH ratios of 5:5, 2.5:7.5 and 7.5:2.5 were prepared. In the lamination process, felt and plain woven glass fiber (300 gr/m²) reinforcements were used to obtain a composite consisting of a total of 7 layers, respectively. The structural properties of the composites were determined using Fourier transform infrared (FT-IR) spectrophotometer and the morphological properties were determined using scanning electron microscope (SEM). Tensile test, three-point bending test and impact tests were performed to examine the mechanical properties of the composites. UL94 horizontal fire resistance test was applied to the composites. As a result, only the addition of eggshell to the glass fiber reinforced polyester based composite increased the bending modulus, tensile and impact strength. While the tensile strength of the composites slightly increased with the combined use of eggshell and ATH, a decrease of approximately 45% was detected in the elongation values. When the combustion properties were examined, the combustion times of the composites were extended with the addition of additives. All composites were classified as slow burning (HB) materials.

Keywords: Aluminum trihydrate, Eggshell, Glass fiber, Polymer composite, Hand lay-up, Sustainability

1. GİRİŞ

Son yıllarda hızla gelişen malzeme bilimi ve araştırmaları doğrultusunda saf malzemeler, otomotiv, havacılık, denizcilik gibi sektörlerde beklenen özellikleri tek başına karşılayamamakta ve kompozit malzemelerin geliştirilmesine önayak sağlamaktadır. Kompozit malzemeler, farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin belirli bir yöntem veya uygulama ile birleştirilmesi suretiyle elde edilen yeni malzeme türleridir. Bu malzemeler, genellikle bir matris materyali ve bir veya birden fazla takviye edici bileşenden oluşmaktadır. Matris, kompozit malzemenin ana yapısal çerçevesini sağlayarak, takviye edici malzemeleri bir arada tutar ve malzemenin genel davranışını yönlendirir. Takviye edici malzemeler ise kompozitin mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin tasarımındaki temel avantajlar, özellikle hafiflik, yüksek mukavemet, düşük yoğunluk, korozyon direnci ve çevresel koşullara karşı üstün dayanım gibi özelliklerin bir arada bulunabilmesidir. Bu malzemeler, aynı zamanda özel mühendislik gereksinimlerine göre özelleştirilebilecek yapısal ve fonksiyonel özellikler sunmaktadır. Dolayısıyla kompozitler, havacılık, otomotiv, inşaat, raylı sistemler, enerji sektörleri ve spor ekipmanları gibi alanlarda üstün performans sergileyerek geleneksel malzemelere kıyasla önemli avantajlar sağlamaktadır.

Kompozit malzemelerin üretim süreçleri, kullanılan malzemelere ve arzu edilen özelliklere bağlı olarak çeşitlenmektedir. Bu süreçlerde, malzeme birleşim şekli, yüzey hazırlığı ve takviye malzemesinin dizilimi gibi faktörler, nihai kompozitin mekanik ve termal özelliklerini doğrudan etkilemektedir [1]. Bu nedenle kompozitlerin tasarımı ve üretimi, malzeme bilimi, mühendislik ve üretim teknolojileri alanlarında derin bir uzmanlık gerektirmektedir.

Polimer matrisli kompozitlerin yapısı, çeşitli dolgu maddeleri, sürekli veya kısa elyaf takviyeleri ve farklı tipte polimer reçinelerden meydana gelmektedir. Kompozitlerde kullanılan reçineler, termoset ve termoplastik olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Matris malzemesi olarak hem termoplastik reçinelerin hem de

termoset reçine matrisli kompozitlerin belirli avantaj ve dezavantajları vardır [2,3]. Termoplastik reçine sınıfı incelendiğinde polipropilen (PP), polikarbonat (PC), polistiren (PS), polietilen (PE) ve polivinil klorür (PVC) ile yapılan çalışmalar yoğunluk kazanırken, termoset reçine matrisli kompozitlerde fenolik, epoksi ve polyester reçine sıklıkla çalışılmaktadır. Termoset reçineler, sertleşme işlemi sonrasında geri dönüşümsüz bir şekilde sertleşir ve yüksek ısıl dayanım, kimyasal direnç gibi avantajlar sunmaktadır. Bu tür reçineler, genellikle havacılık, otomotiv ve inşaat gibi yüksek dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Termoplastik reçineler ise ısıtıldığında yumuşar ve şekil alabilir özelliktedir. Bu özellik termoplastik reçineleri kolay işlenebilir hale getirir ve geri dönüşüm avantajları sağlamaktadır. Kompozit malzemelerin tasarımında polyester reçine, korozyon direnci yüksek ve viskozitesi düşük olduğu için ıslatma kabiliyeti yüksek olan ekonomik bir reçine olarak avantajlarıyla ön plana çıkmaktadır [4-6].

Reçine seçiminde, matris malzemesinin takviye malzemesiyle uyumu da kritik bir faktör oluşturmaktadır. Takviye malzemeleri ile iyi bir bağlanma sağlanmadığı takdirde, kompozitin mekanik özellikleri negatif yönde etkilenmektedir. Bu nedenle, reçine seçiminde kompozit malzemenin son kullanacağı ortam, mekanik gereksinimler ve üretim süreçleri dikkate alınmaktadır.

Polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak doğal ya da sentetik yapılı elyaf takviyeleri kullanılabilmektedir. Bitkisel lifler; odunsu (keten, kenevir, jüt, kenaf, rami), yaprak (muz, sisal), tohum (pamuk, kapok, lif kabağı), meyve (Hindistancevizi lifi, palmiye yağı), sap (arpa, mısır, yulaf, pirinç, buğday) ve çim (bambu, bagasse, mısır) lifleri gibi alt sınıflarda incelenebilir [7-9]. Sentetik elyaf takviyelerinde ise cam elyaf ve karbon elyaf sıklıkla tercih edilmektedir.

Cam elyafı, ülkemizde cam elyaf sektörünün gelişmiş olması sebebiyle erişimi kolay ve ekonomik bir takviyedir. Yüksek çekme mukavemeti göstermesinin yanı sıra kimyasal dayanımı iyi olması nedeniyle polimer matrisli kompozitlerde tercih edilen bir takviye elemanıdır. Cam elyaf takviyeli polyester (CTP), cam elyaf ile taşıyıcı bir matris reçinenin birleşimi ile oluşturulan kompozit malzemenin genel adıdır. Kompozit üretiminde kullanılan çeşitli elyaf/reçine birleşimleri kıyaslandığında CTP kompozitlerin diğer kompozit birleşimlerine göre daha ekonomik olması sebebiyle ön plana çıkmaktadır [10].

Kompozit sektöründeki gelişmelerle beraber günümüzde birçok katkı maddesi sınıfı arasında dolgu maddeleri, kompozitlerin yapısına katıldığında boşlukları doldurarak ürünü çok daha mukavemetli hale getirerek ön plana çıkmaktadır. Hem maliyet hem de ulaşılabilirlik unsurları göz önünde bulundurularak atık malzemelerin yeniden değerlendirilmesi üzerine yapılan araştırmalar hızla artmaktadır. Doğal atıkların kompozit malzemelere katkı olarak kullanılması hem çevresel sürdürülebilirlik hem de malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemli bir araştırma alanı oluşturmaktadır. Bu hedefe yönelik kullanılan biyo-katkı malzemeleri kırmızı çamur tozu, hindistan cevizi kabuğu tozu, yer fıstığı kabuğu, demirhindi özü tozları ve yumurta kabuğu tozları olarak sayılabilir.

Bu doğal atıkların kompozit malzemelere dahil edilerek atığın geri kazanımı sağlanabilir ve çevre üzerindeki olumsuz etkiler azaltılabilmektedir. Bu tür doğal atıkların kompozit malzemelere eklenmesi, özellikle mekanik özelliklerin iyileştirilmesine, hafifliğe ve dayanıklılığa katkı sağlarken, aynı zamanda malzemenin biyolojik olarak parçalanabilirliğini artırarak çevre dostu özellikler sunmaktadır. Ayrıca doğal atıkların kullanılması, petrol bazlı polimerlere alternatifler sunarak kompozitlerin üretiminde kullanılan ham maddelerin çevresel etkilerini azaltmaktadır. Bu bağlamda, doğal atıkların kompozit malzemelerde kullanılması hem çevresel hem de ekonomik açıdan faydalı bir çözüm olarak dikkat çekmektedir [11,12].

Alüminyum Trihidrat (ATH), lif takviyeli polimer kompozit yapılarında yanmazlık özelliği çalışmalarında sıklıkla tercih edilen, çok yönlü bir metalik hidroksittir. Sıcaklık 200 °C'ye ulaştığında ATH ayrışarak suyu serbest bırakır ve alüminyum oksit açığa çıkarır. Açığa çıkan su buharı, yanmadan kaynaklanan ısıyı sönümleyerek alevi verimli bir şekilde geciktirir. Ortaya çıkan buhar, yanma süreçlerini geciktirmeye yardımcı olmak için yanıcı uçucu maddeleri seyreltir, yalıtkan bir kömür oluşumuna da yardımcı olur [13,14].

1.1 Tezin Amacı

Literatür incelendiğinde, cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerin performansının artırılmasında biyo-esaslı dolguların katkısına yönelik çalışmaların sınırlı olduğu ve bu alanda kapsamlı araştırmalara ihtiyaç duyulduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasının amacı, kompozit sektöründe özellikle alev geciktirici özellik kazandırmak amacıyla yaygın olarak kullanılan konvansiyonel bir dolgu maddesi olan

alüminyum trihidrat (ATH) ile, biyobozunur ve çevre dostu bir kaynak olan yumurta kabuğu tozunun birlikte kullanılmasının cam elyaf/polyester kompozit malzemelerin özellikleri üzerindeki sinerjik etkisini araştırmaktır. ATH ve yumurta kabuğunu kullanımı ile elde edilen kompozit malzemelerin yapısal, termal veya fonksiyonel performanslarının iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Bu hedefe ulaşmak amacıyla, cam elyaf takviyeli polyester matrise farklı oranlarda ATH: yumurta kabuğu tozu (100:0, 25:75, 50:50, 75:25, 0:100) ilave edilerek kompozit malzemeler geliştirilmiş, ardından elde edilen numunelerin yapısal, morfolojik, mekanik (çekme, eğme, Izod darbe dayanımı) ve yanmazlık özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler ışığında, geliştirilen kompozitlerin özellikle otomotiv sektörü gibi yüksek performans gerektiren alanlardaki potansiyel kullanım olanaklarının analiz edilmesi hedeflenmiştir.

2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler, iki veya daha fazla malzemenin üstün özelliklerini bir araya getirerek, tek başına malzemelerden daha iyi performans gösteren yeni bir malzeme elde edilmesini sağlayan, makro seviyede birleştirilmiş malzemelerdir [15].

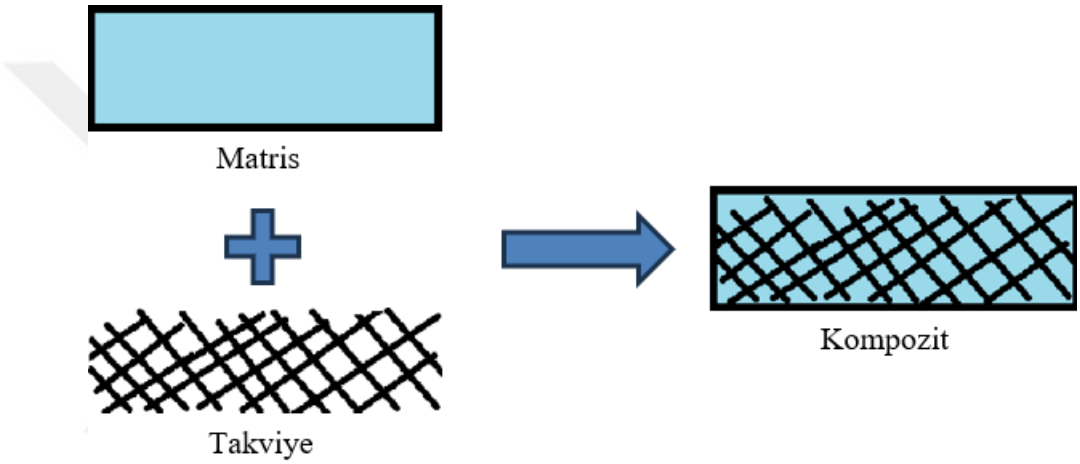
2.1 Kompozit Malzemelerin Tarihçesi

İnsan yapımı kompozit malzemelerin tarihte ilk kez ortaya çıkışından itibaren günümüze kadar gelişimini izlediğimizde sayısız örnek karşımıza çıkmaktadır. Tarihteki ilk kompozit uygulamaları, MÖ 1500 civarında Mısırlılar ve Mezopotamyalılar tarafından çamur ve saman gibi malzemelerin karıştırılarak kullanılmasıyla görülmektedir. İlerleyen dönemde 1200'lü yıllarda Moğollar tarafından yay yapımında rastlanmaktadır. Bu durum, kompozit malzemelerin yüksek performans gerektiren askeri uygulamalarda kullanılmaya başlandığını göstermektedir [16]. Kompozit malzemelerin modern dönemi, 1900'lü yıllarda plastiklerin geliştirilmesiyle başlamış olup, 1935 yılında daha yüksek dayanım ve daha düşük ağırlık özellikleri nedeniyle ilk fiber takviyeli kompozitler tanıtılmıştır [17]. Reçine takviyeli cam liflerinin (fiberglas) kullanımıyla havacılık ve denizcilik endüstrilerinde yapısal bileşenlerin üretiminde kompozit malzemeler devrim yaratmıştır. Fiber takviyeli kompozitlerin gelişimi ise II. Dünya Savaşı sırasında önemli bir aşama kaydetmiştir. 1970 ile 1990'lı yıllar arasında, metal ve seramikten elde edilen matrisler ve yeni liflerin (karbon, bor, aramid gibi) kullanımı yeni bir araştırma alanı oluşturmasına bağlı olarak kompozit uygulamaları oldukça genişlemiştir [18-20]. 1974'te Japonya, yüksek yakıt tüketimini azaltmak amacıyla araçların ağırlığını hafifletmeye yönelik çözümler üzerinde çalışmaya başlamıştır. Bu dönemde, otomobil gövdesinde kompozit malzemelerin kullanımı daha fazla önem kazanmıştır [21]. İngiltere'de faaliyet gösteren Rolls Royce, gaz türbini motorlarının fanlarında cam elyafı takviyeli termoset polimerler üzerinde denemeler yapmış ancak bu çalışmalar beklenen başarıyı elde edememiştir [22]. 1990 yılında ise McLaren, dünyada ilk karbon fiber yol aracı olan modelini tanıtarak önemli bir adım atmıştır [23].

Günümüzdeki çalışmalara baktığımızda küresel çevre sorunları ve buna karşılık gelişen çevre bilinci doğrultusunda doğa dostu teknolojiler ile çevre dostu katkılar üzerine yapılan araştırmalar ön plana çıkmaktadır [24].

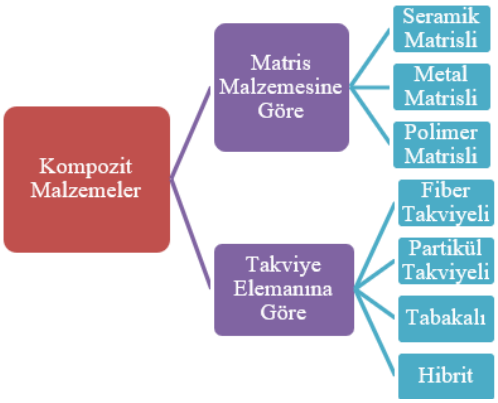
2.2 Kompozit Malzemelerin Bileşenleri ve Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler, matris ve partikül ya da elyaf formunda bulunan takviye bileşenlerinin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır [25]. Bu iki bileşenin seçimi, kompozit malzemelerin farklı mekanik ve fiziksel özelliklerini özelleştirmeye olanak tanımaktadır. Şekil 2.1'de kompozit malzemelerin bileşenleri gösterilmektedir.



Şekil 2.1: Kompozit malzemelerin bileşenleri.

Kompozitleri genel olarak içeriğini oluşturan matris malzemesi ve takviye elemanına göre sınıflandırılmak mümkündür. Yapılan sınıflandırma Şekil 2.2'de verilmiştir.



Şekil 2.2: Kompozit malzemelerin sınıflandırılması.

2.2.1 Matris malzemesi

Kompozit bileşenlerinden matris fazı, takviye elemanlarını bir arada tutarak bağlayıcı görev yapan yapıdır. Takviye elemanlarını desteklemek, dış etkilerden korumak ve gerilmeyi transfer etmek matrisin görevleri arasında sayılmaktadır. Matris yapısı, takviye elemanına kıyasla daha düşük rijitlik, yoğunluk ve mukavemet göstermektedir [26].

2.2.1.1 Seramik matrisli kompozitler

Seramik matrisli kompozitler (CMC), seramik partikülleri ve elyafların başka bir seramik matrisle karışımından oluşan katı malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Seramik matrisi güçlendirmek amacıyla seramikler, metaller, camlar ve polimerler kullanılmaktadır. Genellikle, seramik matris yapısına gömülü karbon, silisyum karbür (SiC), alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum nitrit (SiN) elyaflarından oluşmaktadır. Seramik temelli matris malzemeleri, olağanüstü korozyon direnci, yüksek erime noktaları, üstün basınç dayanımı ve yüksek sıcaklıklarda dayanım gibi özellikler göstermektedir. Üretiminde, monolitik seramiklerin kırılganlık gibi dezavantajlarını aşmak hedeflenmektedir. Matrisin kopma gerilmesi, elyafların kopma gerilmesinden daha düşük olduğu için, CMC'ler "ters kompozitler" olarak adlandırılmaktadır. Çoğu polimer veya metal matris kompozitlerinde ise durum tam tersidir; matris yük altında öncelikli olarak başarısız olur ve böylece kırılgan elyafların erken kırılmasını engeller [27,28].

2.2.1.2 Metal matrisli kompozitler

Metal matrisli kompozitlerin (MMC) yapısında matris malzemesi olarak genellikle alüminyum (Al), magnezyum (Mg), bakır (Cu) ve titanyum (Ti) gibi metaller tercih edilmektedir. Matris malzemesi alternatifleri arasından en çok kullanılan alüminyum ve alaşımlarıdır. Takviye elemanı olarak seramikler (oksitler ve karbürler gibi) veya metaller (örneğin tungsten, molibden, kurşun) kullanılmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin işleme prosesi sırasında yüksek sertlik ve aşındırıcı özelliklerinden dolayı alet aşınması gözlenmektedir. Bu nedenle, MMC'lerle çalışmalarında takım ve malzeme arasında doğrudan temasın olmadığı özel işleme yöntemleri tercih edilmektedir [29-31].

2.2.1.3 Polimer matrisli kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMC), kompozit sınıfları arasında en çok tercih edilen türlerden biridir. Matris malzemesi olarak termoset ya da termoplastik polimer reçine kullanılmaktadır. Termoset reçineler, yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri üstün dirençleri nedeniyle termoplastiklere göre daha yaygın çalışılmaktadır [32]. Takviye bileşeni olarak çoğunlukla karbon, cam, kevlar veya metal elyafları gibi malzemeler olarak tercih edilmektedir [33-36]. Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemlerinin, diğer kompozit sınıflarına göre basit olması ve kolay işleme teknikleri sebebiyle düşük maliyetli olarak ön plana çıkmaktadır [37]. Üretilen kompozitlerin özellikleri matris yapısı, takviye malzemeleri, üretim süreci, mikro yapı, bileşim ve arayüz özelliklerine bağlı olarak değişmektedir. PMC'ler, yüksek kimyasal dayanım, korozyon direnci, mükemmel darbe, basınç ve yorulma direnci gibi özelliklerin yanı sıra iyi mekanik özellikler sunmaktadır [38,39]. Kompozit üretiminde matris malzemesi olarak kullanılan termoset ve termoplastik reçinelerin çeşitli karakteristik özelliklere göre kıyaslanması Çizelge 2.1'de gösterilmiştir [40].

Çizelge 2.1: Termoset ve termoplastik kompozitlerin özelliklerinin kıyaslanması.

Karakteristik Özellik	Termoset	Termoplastik
Çekme	Mükemmel	Mükemmel
Kırılganlık	Mükemmel	Mükemmel
Sıkıştırma	Mükemmel	İyi
Darbe sonrası sıkıştırma mukavemeti	Orta-iyi	İyi
Cıvatayla bağlantı	İyi	Orta
Aşınma direnci	Mükemmel	İyi
Hasar toleransı	Orta-iyi	İyi
Kararlılık	Orta-iyi	Mükemmel
Bakım kolaylığı	İyi	Orta-kötü
Çalışma sıcaklığı	İyi	İyi
Dielektrik özelliği	Orta-iyi	İyi
Çevresel zayıflık	Nem	Yok, hidrolik sıvı
İşleme sıcaklığı, °C	121-315	343-425
İşleme basıncı, MPa (psi)	0.59-0.69	1.38-2.07
Katmanlama özelliği	Kolay	Zor
Prepreg yapma kolaylığı	Mükemmel	Zayıf
Sağlık / güvenlik	Mükemmel	Mükemmel

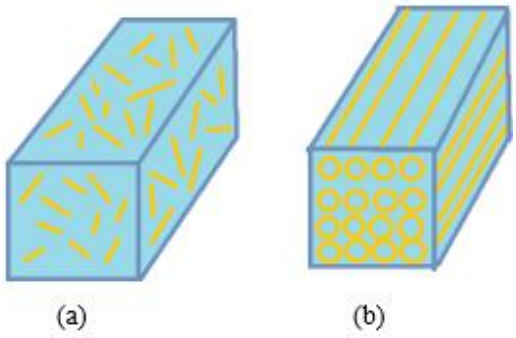
2.2.2 Takviye elemanları

Kompozit malzemelerde takviye elemanlarının nihai ürünün mekanik özelliklerini iyileştirmesi ve yapısal bütünlüğünü artırması beklenmektedir. Takviye elemanları,

kompozit malzemenin geometrik stabilitesini korumaktadır ve böylece malzemenin şekil bozulmalarına karşı direnç göstermesine yardımcı olur. Bu durum, özellikle yüksek sıcaklık ve nem gibi değişken çevresel koşullarda önemlidir. Takviye elemanının, malzemeye uygulanan yükü taşıma görevini gerçekleştirebilmesi için matris ile takviye elemanı arasındaki arayüzey bağının iyi olması gerekir. Katkının türü, içeriği, biçimi, boyutu, doğrultusu, uygulanan metot gibi faktörlerin mekanik özellikler üzerine etkisi olmaktadır [41].

2.2.2.1 Fiber takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozit malzemeler (FRP), matris malzeme içine gömülü liflerden meydana gelir. Fiber takviyeli kompozitlerin kompozisyonunda çoğunlukla cam, karbon ve kevlar gibi sentetik fiberler kullanılmaktadır. Bu fiberlerin kompozit yapı içinde dağılması, malzemenin mukavemet, sertlik ve kimyasal, termal ve aşınma direnci gibi önemli özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır. Bu sentetik lifler, kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde güçlendirerek, malzemenin daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını mümkün kılmaktadır [42-45]. Fiber takviyeli kompozitler dayanım, sertlik ve hafiflik gibi özellikleri üstün bir şekilde birleştirmeleriyle otomotiv endüstrisi için benzersiz bir malzeme kaynağıdır. Bu kompozitler, otomotivde kullanılan diğer kompozit türlerine kıyasla daha üstün performans göstermektedir [46]. Fiber takviyeli kompozitlerin, içerdiği liflerin yapısına bağlı olarak süreksiz (kesikli) ve sürekli elyaf takviyeli olmak üzere iki ana kategoride sınıflandırması Şekil 2.3'te verilmiştir [47].

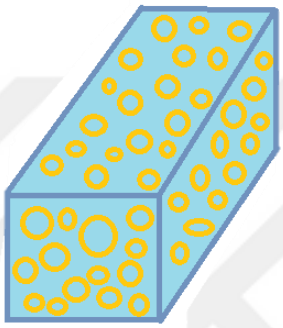


Şekil 2.3: (a) Süreksiz (kesikli) ve (b) sürekli elyaf takviyeli kompozitler.

2.2.2.2 Partikül takviyeli kompozitler

Fiber takviyeli kompozitler ile partikül takviyeli kompozitler karşılaştırıldığında partikül takviyesi kompozitin yapısında güçlendirme açısından daha az etki oluşturur.

Çimentoya çakıl katılması ya da yol yüzeyleri gibi yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalarda partikül takviyeli kompozitlerin kullanımı tercih edilmektedir. Düşük maliyet, üretim ve şekillendirme kolaylıkları partikül takviyeli kompozitlerin avantajlarını oluşturmaktadır [48]. Matris malzemeye metal veya seramik gibi partiküllerin eklenmesi belirli özelliklerin geliştirilmesine olanak tanımaktadır. Güç, sertlik ve aşınma direnci gibi mekanik ve termal özellikleri iyileştirmek amacıyla partikül takviyeli kompozitler otomotiv sektöründe farklı uygulamalarda kullanım alanı bulmaktadır [49]. Partikül takviyeli kompozitler için şematik bir gösterim Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4: Partikül takviyeli kompozitler.

2.2.2.3 Tabakalı kompozitler

Tabakalı kompozit yapıları, farklı malzemelerden oluşan birden fazla katman bir araya getirilerek elde edilmektedir. Kompozit sınıfları arasında kullanımı en yaygın olan ve tarihi en eskiye dayanan kompozit türüdür. Bu yapılar, metallere göre hafif ve aynı zamanda mukavemetli olmaları nedeniyle tercih edilen malzemelerdir. Ayrıca ısıya ve neme karşı dayanıklıdırlar. Kompozit yapısı tasarlanırken farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakaların uygun şekilde bir araya getirilmesiyle yüksek mukavemetli ürünler elde edilebilmektedir. Tabakalı kompozitler, otomotiv sektörünün özel performans gereksinimlerine uygun olarak tasarlanabilmektedir. Daha fazla dayanıklılık, darbe direnci ve güvenlik sağlamak amacıyla otomotiv sektöründe gövde panelleri, çamurluklar, kapılar ve motor kapakları gibi parçaların üretiminde katmanlı kompozitler kullanılmaktadır [50-52].

2.2.2.4 Hibrit kompozitler

Hibrit kompozitler, iki veya daha fazla takviye malzemesinin ortak bir matrise katılması ile meydana gelmektedir. Hibrit kompozitlerde, benzer veya daha iyi

özelliklere sahip olan katkı malzemesi, yapıdaki diğer katkının eksikliklerini gidererek matrisin sınırlamalarını aşmak amacıyla ortak bir matrise entegre edilir. Bu hedef doğrultusunda hibritleşme çalışmaları yapılmaktadır. Matris malzeme olarak seramik, metal veya polimer kullanılabilir. Hibrit bir kompozit olarak polimer matrisli kompozitleri incelediğimizde, bir veya daha fazla takviye malzemesiyle güçlendirilmiş, iki veya daha fazla polimerin karışımı ile ortaya çıkan bir yapı olarak tanımlanabilir [53]. Kompozit geliştirmede hibridizasyon yöntemi, kompozit malzemelerin uygulama alanlarını arttırmak için yeni fırsatlar sunmaktadır [54-61]. Yaygın olarak bilinen elyaf takviyeli polyester matris içeren polimer kompozit yapıları; doğal elyaf takviyeli polimer kompozitler (NFRP), cam elyaf takviyeli polimer kompozitler (GFRP) ve karbon elyaf takviyeli polimer kompozitler (CFRP) olarak sıralanmaktadır [62].

Hibrit kompozit malzemelerin özellikleri üzerinde belirgin etkiler yaratan üç ana faktör tespit edilmiştir. Birinci faktör, kullanılan matris ve takviye malzemelerinin türüdür. Bu seçim, büyük ölçüde uygulamanın amacına dayanır; çünkü her uygulama belirli özellikler gerektirir ve bu özellikler istenen sonucun elde edilmesine yardımcı olur. İkinci faktör, araştırılan takviye malzemesi ve matris türüne bağlı olan kompozitlerin hazırlanma yöntemi olarak sayılmaktadır. En önemli etkiyi oluşturan üçüncü faktör, dolgu malzemeleri ve matris arasındaki etkileşimi içermektedir. Bu bileşenler arasındaki arayüzey yapışma/bağlanmanın artması, doğrudan hibrit kompozitin genel özelliklerini doğrudan etkileyerek iyileşmelerini sağlamaktadır [63-65]. Takviye malzemeleri ile matris arasındaki zayıf bir ara yüzey yapışması, iki bileşen arasında yeterli etkileşimin sağlanamamasına neden olur ve kompozit malzemenin mekanik ve kimyasal özelliklerinin olumsuz etkilenmesine yol açarak verimini düşürmektedir. Bu durum özellikle dayanıklılık, sertlik ve çekme mukavemeti gibi kritik özelliklerde düşüşlere yol açabilmektedir. Bu durumda kompozit malzemenin beklenen performansı karşılayamadığı bir sonuç ortaya çıkmaktadır [66,67].

2.3 Kompozit Malzemelerin Avantajları ve Dezavantajları

Geleneksel malzemeler ile kompozit malzemelerin özellikleri kıyaslandığında kompozitler pek çok üstün özelliğiyle avantaj oluşturmaktadır.

Kompozit malzemelerin avantajları şunlardır:

1. Hafiflik
2. Korozyona karşı üstün direnç
3. Gelişmiş yorulma ömrü
4. İşlenebilirlik
5. Boyutsal stabilite
6. Yüksek kimyasal stabilite
7. Yüksek aşınma dayanımı
8. Yüksek sıcaklık ve hava şartlarına dayanım
9. UV (ultraviyole) ışınlarına karşı dayanım
10. Düşük yanıcılık
11. Düşük toksisite
12. Titreşim yalıtımı
13. Radar sinyallerine karşı geçirgenlik
14. Parça konsolidasyonu
15. Bileşen boyutları ve şekil sınırları konusunda tasarımda özgürlük [47].

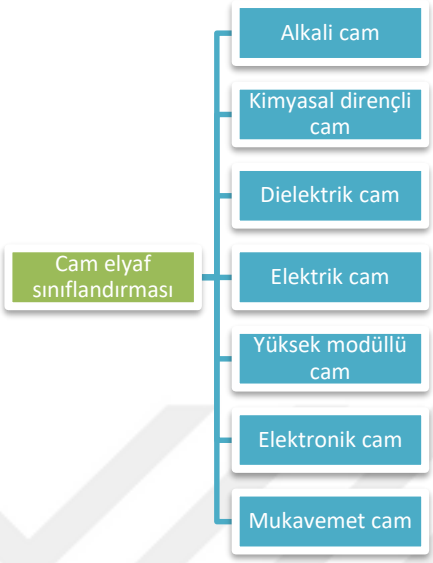
Avantajlarına karşılık dezavantajları şunlardır:

1. Onarım zorluğu
2. Üretim maliyetinin yüksek olması
3. Geri dönüşüm kısıtı [68].

2.4 Cam Elyaf Takviyeli Kompozitler

Elyaf takviyeli kompozitlerin stres iletim kapasitesi, bu kompozitlerin mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu iletim kapasitesi ise, kullanılan fiberin dayanımı, matrisin gücü ve fiber ile matris arasındaki bağın kalitesiyle şekillenmektedir [69]. Cam elyaflar, elyaf takviyeli kompozitlerin mekanik ve tribolojik özelliklerini iyileştirmek için yaygın olarak kullanılan takviye malzemeleridir. Diğer takviye elyafları ile kıyaslandığında en kolay uyarlanabilir ve en yaygın kullanılan imalat malzemesi olarak tanımlanmaktadır. Kolaylıkla temin edilebilen ham madde sayesinde üretimi rahatlıkla yapılmaktadır. Genellikle polyester ya da epoksi reçine ile oluşturulmuş matrise takviye olarak kullanılır. Cam elyaf katkılı kompozitlerin özellikleri, kompozit hazırlama aşamasında kullanılan elyaf tipi ve yönüne bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [70]. Cam elyaf türleri arasında en eski ve en yaygın kullanılan tür, elektriksel cam (E-glass) olarak bilinmektedir. Diğer

cam elyaf türleri arasında alkali cam, kimyasal dirençli cam, yüksek modüllü cam elyaf ve daha yüksek mukavemet gösteren farklı cam türleri yer almaktadır [71,72]. Yaygın olarak kullanılan cam elyaf türlerinin sınıflandırması Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5: Cam elyafın sınıflandırması.

Kompozit yapılarında takviye elemanı olarak kullanılan cam elyaflar, kendi sınıflarına göre belirli fiziksel özellikler sergilemektedir. Çeşitli cam elyaf sınıflarına ait malzemelerin fiziksel özellik kıyaslamaları Çizelge 2.2'de gösterildiği gibidir [73].

Çizelge 2.2: Çeşitli cam elyaf sınıflarının fiziksel özellikleri.

Cam elyaf sınıfı	Fiziksel özellik
A-cam	Yüksek kararlılık
C-cam	Yüksek korozyon dayanımı
D-cam	Düşük dielektrik sabiti
E-cam	Yüksek elektriksel direnç
M-cam	Yüksek modül
R-cam	Yüksek asit korozyon direnci
S-cam	Yüksek çekme mukavemeti
AR-cam	Alkali direnci

2.5 Yumurta Kabuğu

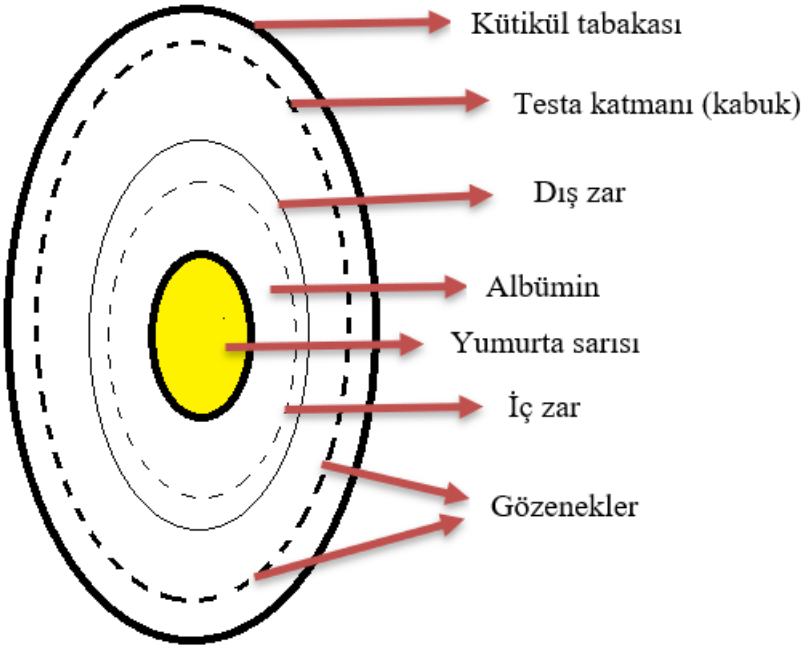
Kompozit malzemelerin çeşitli özelliklerini iyileştirmeye yönelik katkı sınıflarından birini dolgu maddeleri oluşturmaktadır. Bu katkılar arasında, özellikle doğal dolgu maddeleri, çevre dostu olmalarının yanı sıra kompozitlerin yapısına eklendiğinde boşlukları doldurarak ürünü çok daha dayanıklı hale getirmesiyle dikkat çekmektedir. Doğal dolgu maddeleri, sürdürülebilirlik açısından da önemli avantajlar sunarak,

çevreye zarar vermeden yüksek performanslı malzemelerin üretilmesini mümkün kılmaktadır. Bu hedefe yönelik biyo-katkı malzemeleri olarak kırmızı çamur tozu, hindistan cevizi kabuğu tozu ve yumurta kabuğu tozu kullanılmaktadır.

Yumurta kabukları, her yıl büyük miktarda atık oluşturarak erişim kolaylığı sağlamaktadır. Yumurta kabuğu atığının aşırı miktarda birikmesi, çevresel açıdan olumsuz etkiler yaratma potansiyeline sahiptir. Örneğin, bu atıkların çöplüklere taşınması ek maliyetler doğurur ve lojistik anlamda ekstra yük oluşturmaktadır. Ayrıca, bu tür atıkların doğada parçalanması uzun zaman alarak çevre kirliliğini artırabilir ve biyolojik çeşitliliği tehdit edebilmektedir. Bu sebeplerle, yumurta kabuğu atığının yönetimi ve yeniden değerlendirilmesi sürdürülebilirlik açısından büyük önem taşımaktadır [74].

2.5.1 Yumurta kabuğunun yapısal özellikleri

Yumurta kabuğu yapısı üç ana katmandan oluşmaktadır. En dışta bulunan, yumurta kabuğunu çevreleyen katman kütikül olarak adlandırılmaktadır. Kütikül, kabuğu çevreleyen ince bir koruyucu tabaka olarak, kabuğun iç kısmındaki zararlı maddelerin dışarıya çıkmasını engellemektedir. Bunun altındaki katman ise "testa" yani kabuk olarak bilinmektedir. Yumurta kabuğu, dışarıdan gelen zararlılara ve çevresel etkilere karşı koruma sağlamak için oldukça güçlü bir yapıya sahiptir. Testa, kabuğun esas dayanıklılığını sağlayan ana katman olup, kalsiyum karbonat kristallerinden oluşmaktadır. Bu yapı, kabuğun kırılmadan uzun süre dayanmasını sağlamaktadır. Üçüncü katman ise, yumurtanın içini koruyan ve besleyici değerini taşıyan membranlar ve hücre yapılarından oluşan iç katmandan oluşmaktadır. Bu katmanlar, yumurtanın iç kısmını hem fiziksel hem de kimyasal zararlardan koruyarak yumurtanın raf ömrünü uzatmaktadır. Şekil 2.6’da yumurta kabuğu katmanlarının şematik gösterimi verilmiştir [75].



Şekil 2.6: Yumurta kabuğu.

Tavuk yumurtasının içeriğinin %30'unu yumurta sarısı, %60'ını albümin adı verilen beyaz madde ve geri kalan %10'unu ise dolgu malzemesi olarak kullanılmak üzere çeşitli araştırmalara konu olan kabuğu oluşturmaktadır. Yumurta kabuğunun yapısı, dayanıklılık veren madde olan %95 kalsiyum karbonattan ve %5'lik kısmı ise bazı organik proteinler ve nemden oluşmaktadır. İçerdiği diğer bileşikler, Çizelge 2.3'te sıralandırılmaktadır [76].

Çizelge 2.3: Yumurta kabuğunun içerdiği bileşikler.

Bileşik	İçerik (%)
$CaCO_3$	95,00
MgO	0,83
SO_3	0,66
P_2O_5	0,43
Al_2O_3	0,15
K_2O	0,08
SiO_2	0,07
Cl_2O_3	0,06
SrO	0,04

2.5.2 Literatürde yumurta kabuğu katkılı cam elyaf takviyeli kompozitler

Literatürdeki güncel çalışmalar incelendiğinde, cam elyaf takviyeli kompozit yapılarında yumurta kabuğunun dolgu maddesi olarak kullanımında avantajlar sunan çalışmalar bulunmaktadır.

Nayak ve ark. [77] gerçekleştirdikleri çalışmada, ağırlıkça %3 ve 6 yumurta kabuğu katkısı içeren cam elyaf takviyeli kompozitler el yatırması yöntemiyle üretilmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi tercih edilmiştir. 11 kat 128 gsm cam elyaf kullanılmıştır. Parçacık boyutu 150 μm olan yumurta kabuğu katkıları kullanılmıştır. Çalışma kapsamında çekme ve Izod darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucu olarak en yüksek çekme dayanımı yumurta kabuğu katkısı içermeyen numunede gözlenirken, ağırlıkça %6 yumurta kabuğu katkılı numunede en yüksek modül elde edilmiştir. Sonuç olarak, yumurta kabuğu dolgularının eklenmesi, çekme dayanımını düşürürken, çekme modülünü ve darbe dayanımını arttırmıştır.

Muhammad ve ark. [78] yaptıkları çalışmada, 800 gsm'lik 4 katmanlı cam elyaf düz dokuma kumaş kullanılarak epoksi kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Ağırlıkça %0, 10, 25 ve 40 yumurta kabuğu tozu dolgusu ile el yatırması tekniğiyle üretim yapılmıştır. 53 ve 150 μm dolgu boyutlarına sahip tavuk yumurtası tozuyla çalışılmıştır. Üretilen kompozitlere çekme ve eğme testleri uygulanmıştır. Test sonuçları kıyaslandığında katkılı kompozitlerinin çekme dayanımı ve modülünün, dolgu yüklemesi %10'dan %40'a çıktıkça azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun, matris ile takviye arasındaki zayıf bir dayanımdan kaynaklandığı yorumlanmıştır. Buna paralel olarak kompozitlerinin eğme dayanımı ve modülü de dolgu yüklemesi arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Yumurta kabuğu içeren matrisin ve laminalar arasındaki zayıf ara yüzey bağlarının düşük eğme dayanımı oluşturması olarak açıklanmıştır. Genel olarak, kompozit yapısında yumurta kabuğu eklenmesinin mekanik özelliklerini azalttığı sonucuna varılmıştır. Hem çekme hem de eğme özellikleri için en uygun dolgu oranının ağırlıkça %10 olduğu sonucuna varılmıştır.

Attallah [79] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, ağırlıkça %2, 4, 6 ve 8 oranında yumurta kabuğu ve kalsiyum karbonat tozu dolgu malzemeleri olarak kullanılmıştır. Yumurta kabuğu dolgusunun boyutu 12,6 μm olarak belirlenmiştir. Matris malzemesi olarak epoksi seçilmiş olup, cam elyaf takviyeli kompozitler el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen kompozitler için çekme ve darbe testleri gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları karşılaştırıldığında en yüksek çekme dayanımı, Epoksi + Cam Elyaf + %8 $CaCO_3$, %8 Yumurta Kabuğu içeren numunede gözlenmiştir. Bu numunede polimer matrisle birlikte fiber ve parçacıkların varlığı, kompozitlere yükü polimer matristen dolgu malzemelerine taşıma yeteneği kazandırmış ve bu da kompozitin dayanımını arttırmıştır. Numunelerin elastikiyet modülü (%8 $CaCO_3$, %8 yumurta kabuğu)

eklenmesiyle önemli ölçüde iyileşmiştir. Bunun nedeni, takviye ile matris arasındaki yüzey temas alanının artmasıyla birlikte deformasyonun azalması olarak açıklanmıştır. Kompozit içerisindeki dolgu malzemesi ağırlığı arttıkça, kopma uzaması değerinin azalmasına neden olmuştur. Bu sonuç, yapıya dolgu ($CaCO_3$ ve yumurta kabuğu) eklenmesinin kompozit malzemenin sertliğini artırması sertlik yüzeylerini arttırması ve kopma anındaki uzama yüzdesini azaltması olarak açıklanmıştır.

2.6 Cam Elyaf Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Kompozitler, farklı üretim yöntemleriyle imal edilir ve bazen birden fazla işlemin bir arada kullanılması söz konusu olabilmektedir. Hangi üretim tekniğinin seçileceği, son ürünün kullanım alanı, kullanılan matris ya da elyaf malzemesinin türüne göre belirlenir. Kompozit üretimi için temel olarak açık kalıplama yöntemi ve kapalı kalıplama yöntemi olmak üzere iki ana yöntem bulunmaktadır. Açık kalıplama yönteminde takviye malzemesi, matris ve jel kaplama dış ortamla doğrudan temas etmektedir. Buna karşılık, kapalı kalıplama yönteminde ise tüm işlemler iki parçalı bir kalıp seti veya vakum torbası içinde gerçekleştirilir [80]. Açık kalıplama yöntemi ve kapalı kalıplama yönteminin içerdiği yöntemler, Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7: Kompozit üretim teknikleri.

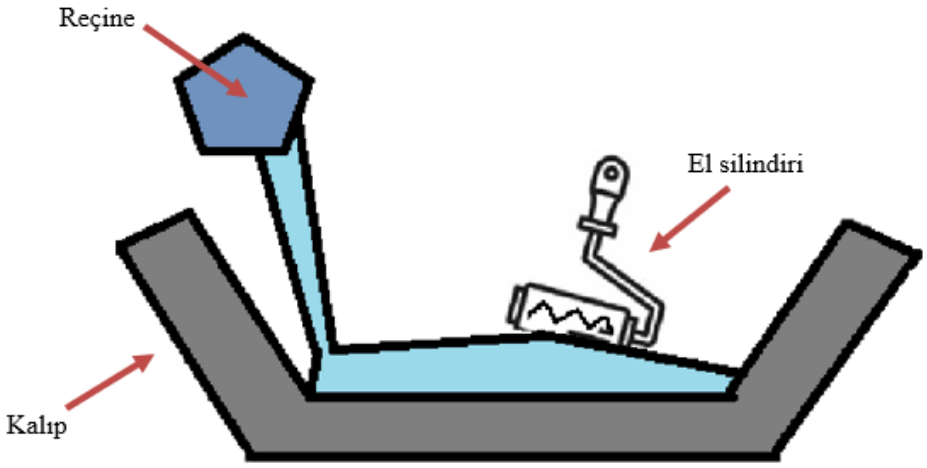
2.6.1 Açık kalıplama

Açık kalıplama tekniklerine dair üretim sürecinde malzemeler doğrudan atmosferle temas etmektedir. Takviye malzemesi ve reçine kalıp içine yerleştirildikten sonra oda koşullarında kürlenmeye bırakılmaktadır. Açık kalıplama, basit kalıplama

gereksinimleriyle genellikle daha büyük parçalarda ve daha düşük maliyetli üretim talepleri doğrultusunda tercih edilmektedir.

2.6.1.1 El yatırması yöntemi

Kompozit üretim süreçleri arasında en az ekipman gerektirmesiyle en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu üretim yönteminde, açık bir kalıba jel kaplama uygulanır ve ardından reçine (matris/taşıyıcı malzeme) ve takviye malzemeleri manuel olarak uygulanmaktadır. Çalışmayı kolaylaştırmak ve düzgün bir yüzey elde etmek için üretimden önce kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı ajan kullanılmaktadır. Üretim sonucunda fiber takviyeli polimer (FRP) kompozit yapı oluşturulmaktadır. Reçinenin, takviye malzemelerine nüfuz etmesini sağlamak için fırçalar ve makaralar kullanılarak hava kabarcıkları giderilmektedir. Kürleme işlemi için ısıya gerek duyulmamaktadır. Numuneler, oda sıcaklığında bekletilerek kürlenmesi sağlanmaktadır [81]. El yatırması yöntemi, Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında da el yatırması yöntemi kullanılarak kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir.

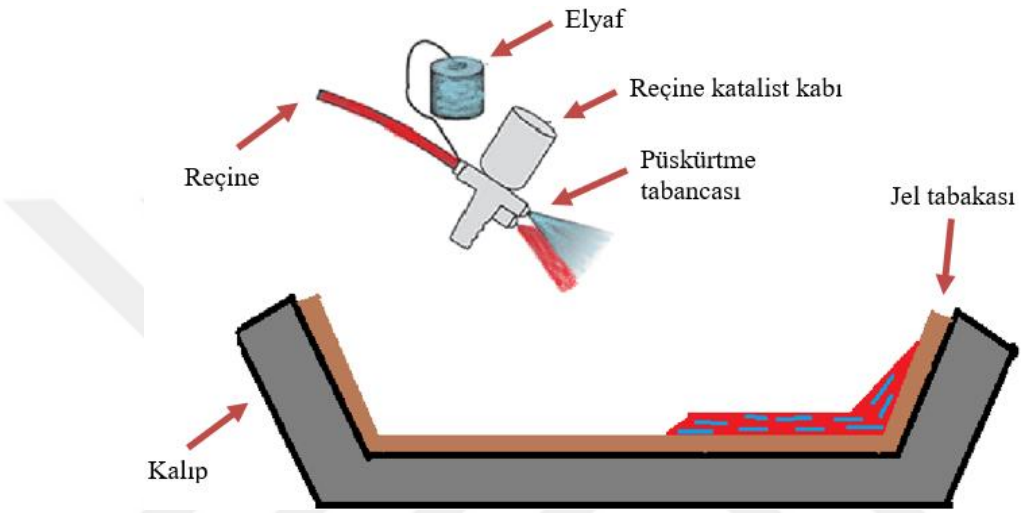


Şekil 2.8: El yatırması yöntemi.

2.6.1.2 Püskürtme yöntemi

Püskürtme yönteminde takviye malzemesi olarak kullanılacak kırpılmış elyaflar ve reçine, özel bir el tabancasına yerleştirilir ve malzemeler aynı anda kalıba püskürtülmektedir. Uygulama sürecinde bir makaralı alet, reçine ve takviyenin birleşmesini sağlar. Yüzeyi düzgünleştirmek ve reçine içinde kalan havayı çıkarmak için elle yatırma yöntemindeki gibi rulo uygulanmaktadır. Açık kalıplama uygulaması

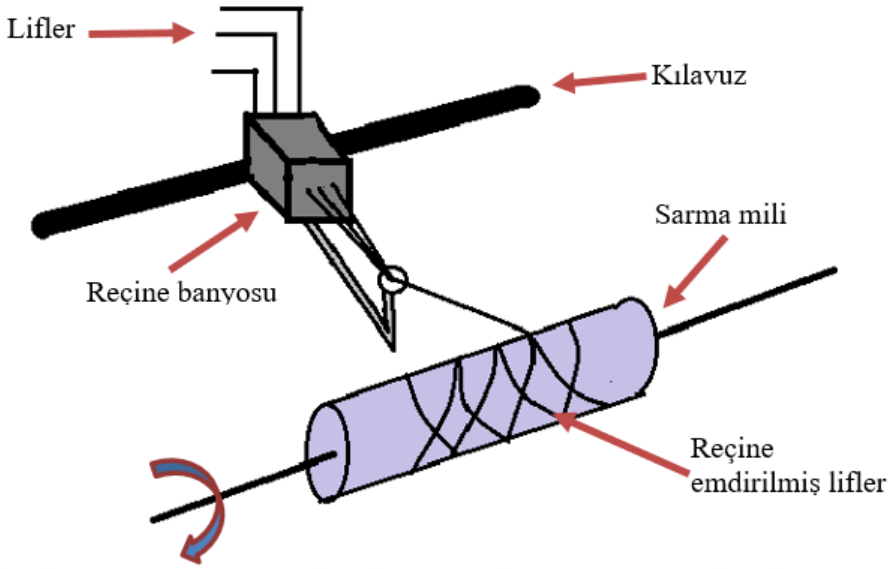
olan bu teknikte, uygulanan malzemenin kürlenmesi oda koşullarında gerçekleştirilmektedir. El yatırması yöntemi ile karşılaştırıldığında, kalıbın karmaşıklığı arttığında püskürtme yöntemi daha hızlı uygulama olanağı sunar. Uygulamayı gerçekleştiren operatör, kaplamanın kalınlığını ve tutarlılığını kontrol etmektedir. Taşınabilir ekipman kullanılması ve her ortamda üretime olanak sağlaması bakımından avantajları bulunmaktadır [82]. Püskürtme yönteminin şematik gösterimi, Şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9: Püskürtme yöntemi.

2.6.1.3 Filament sarma yöntemi

Filament sarma, dönen bir mandrel kullanarak otomatik bir açık kalıp kompozit üretim sürecinden oluşmaktadır. Bu yöntemde takviye elyafları, sıcak reçine banyosundan geçirilir ve reçine ile doygunlaşmış elyaflar, ürünün istenen iç şekline sahip dönen mandrel etrafına sarılmaktadır. Mandrel etrafında eşit bir dağılım sağlanarak halka, helisel ve polar olmak üzere farklı sarma desenleri uygulanabilir. Yeterli katmanlar eklendikten sonra üretilen kompozit numunesi kürlenmeye bırakılmaktadır. Filament sarma, özellikle silindirik veya tüp şeklindeki kompozit ürünler, örneğin tahrik milleri ve basınç tankları gibi eksenel simetrik bileşenlerin üretimi için ideal bir yöntem oluşturmaktadır. Yüksek çekme dayanımı, iyi ağırlık/kuvvet oranı ve ürünlerde uniformluk gibi avantajlar sunmaktadır. Otomatik bilgisayar kontrollü bir işlem olması, üretimin daha hızlı ve hassas bir şekilde yapılmasına olanak tanımaktadır [83]. Filament sarma yöntemine dair şematik gösterim, Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10: Filament sarma yöntemi.

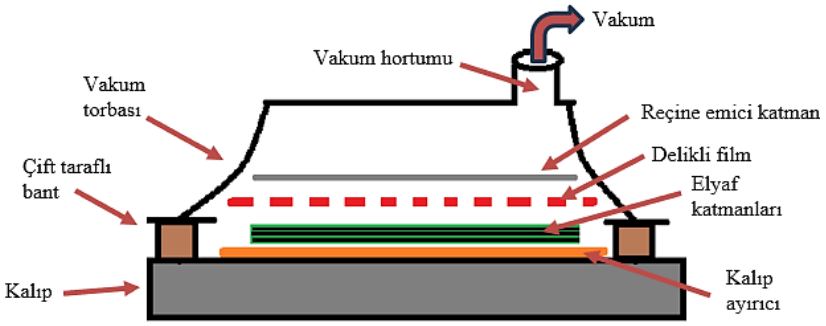
2.6.2 Kapalı kalıplama

Kapalı kalıplama kompozit üretim yöntemlerinden biridir ve genellikle daha yüksek kalitede yüzey bitişleri, hassas şekillere ve düşük toleranslara sahip ürünlerin üretimi için kullanılmaktadır. Kapalı kalıplama yöntemi, malzemenin şekillendirilmesi için iki yarım kalıp arasında reçine ve fiberler yerleştirilip sıkıştırılarak sertleştirilmesinden meydana gelmektedir. Bu yöntem çoğunlukla otomatikleştirilmiş olup, büyük hacimli üretim için kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık, denizcilik ve inşaat gibi endüstrilerde yaygın olarak tercih edilmektedir.

2.6.2.1 Vakum torbalama yöntemi

Vakum torbalama tekniğinde ilk olarak üretilecek parçanın kalıbı oluşturulmaktadır. Kalıp yüzeyine kalıp ayırıcı uygulanmaktadır. Hazırlanan reçine karışımı kullanılacak kalıbın yüzeyine sürülmektedir. Ardından belirlenen katman kadar elyaf ve reçine el ile uygulanmaktadır. Kalıbın kenarlarına çift taraflı bantlar yapıştırılmaktadır. Kompozit üretimi için kalıptaki lamine alanı kaplamak amacıyla bir plastik torba kullanılmaktadır. El yatırması tekniğinin devamı olarak görülmektedir. El yatırması yönteminden farklı olarak, kompozit üretimi esnasında vakumdan faydalanılarak fazla reçinenin ve hapsolmuş havanın dışarıya atılması sağlanmaktadır. Oluşturulan kapalı devre sistemde, vakum pompası reçine jel haline gelene kadar çalıştırılmaktadır. Kompozit kürlenene kadar 24 saat boyunca vakum altında bekletilmektedir. Düşük

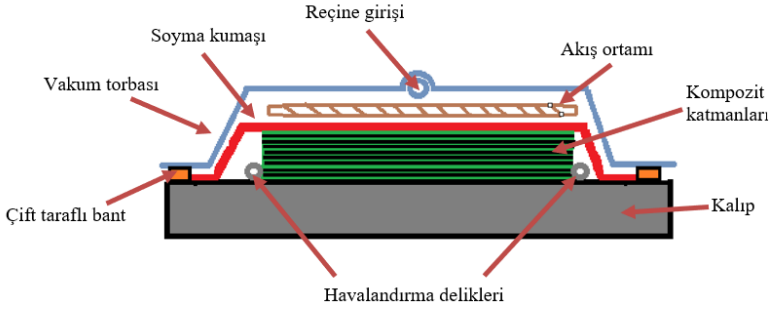
maliyetli olması ve uygulama kolaylığının olması avantaj sağlamaktadır [84]. Vakum torbalama yönteminin şematik gösterimi, Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 2.11: Vakum torbalama yöntemi.

2.6.2.2 Vakum infüzyon yöntemi

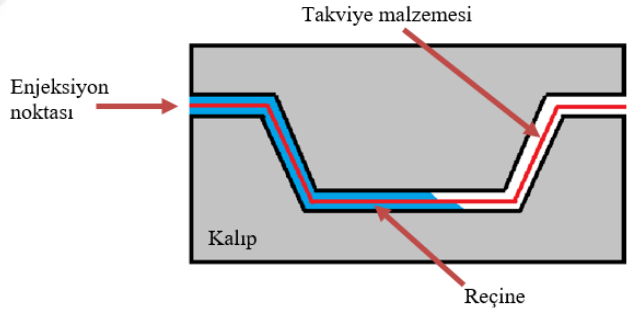
Vakum infüzyon yöntemi, reçine film infüzyon işlemi olarak da adlandırılmaktadır. Vakum infüzyonunun temel prensibi, reçineyi elyaf tabakalarına vakumla çektirerek yerleştirmektir. Bunun için vakum pompasından gelen vakum basıncından faydalanılmaktadır. Bu kompozit üretim yönteminin uygulanmasında vakum, reçine sistemin içine sokulmadan önce uygulandığı için vakum torbalama yönteminden ayrılmaktadır. Reçine, vakumla çekildiği için elyaf katmanlarına eşit olarak dağılmaktadır [85]. Uygulanan vakum sayesinde laminasyon sırasında hapsolmuş hava kabarcıkları giderilmektedir. Bu da kompozitin daha sağlam ve dayanıklı olmasını sağlamaktadır. Vakum infüzyon yöntemi, reçinenin gerektiğinden fazla kullanılmasını engelleyerek daha verimli ve ekonomik bir üretim sağlamaktadır. Üretim sonucunda genellikle daha pürüzsüz yüzeyler ve yüksek kaliteli son ürünler elde edilmektedir. Özellikle büyük ve karmaşık kompozit parçaların üretimi için sıklıkla tercih edilmektedir. Vakum infüzyon yöntemine dair şematik gösterim Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12: Vakum infüzyon yöntemi.

2.6.2.3 Reçine transfer yöntemi

Reçine Transfer Kalıplama (RTM) süreci, otomotiv ve uçak bileşenleri gibi kompozit parçaların üretimi için son derece uygun bir tekniktir. RTM süreci takviye malzemesinin yerleştirilmesi, kalıp dolumu, polimerizasyon veya sertleşme, soğutma ve son kürleme olmak üzere temelde beş aşamayı takip etmektedir. Proses, reçine matrisinin basınç altında kalıba enjeksiyonuyla başlamaktadır. Kalıp, nihai ürünün şekline göre tek veya birden fazla giriş portu kullanılarak reçineyle doldurulmaktadır. Reçine, kalıp içinde yerleştirilen kuru fiberlerin arasından akar ve sertleştikten sonra kompozit parça elde edilmektedir. Bu yöntem, parça kalınlığı ve reçine içeriği üzerinde hassas kontrol imkanı sunmaktadır. Bu sayede orta ölçekli üretim için uygun hale gelmektedir. Ayrıca, malzeme kombinasyonu ve fiber yönelimi üzerinde esneklik sunarak, karmaşık geometrilerin ve yüksek güç-ağırlık oranlarına sahip parçaların üretilmesine olanak tanımaktadır. RTM yöntemi, otomasyon potansiyeli, yüksek üretim hızları, düşük maliyet ve parça tekrar edebilirliği nedeniyle cazip bir seçenek oluşturmaktadır [86]. Reçine transfer metoduna yönelik şematik gösterim, Şekil 2.13'te verilmiştir.



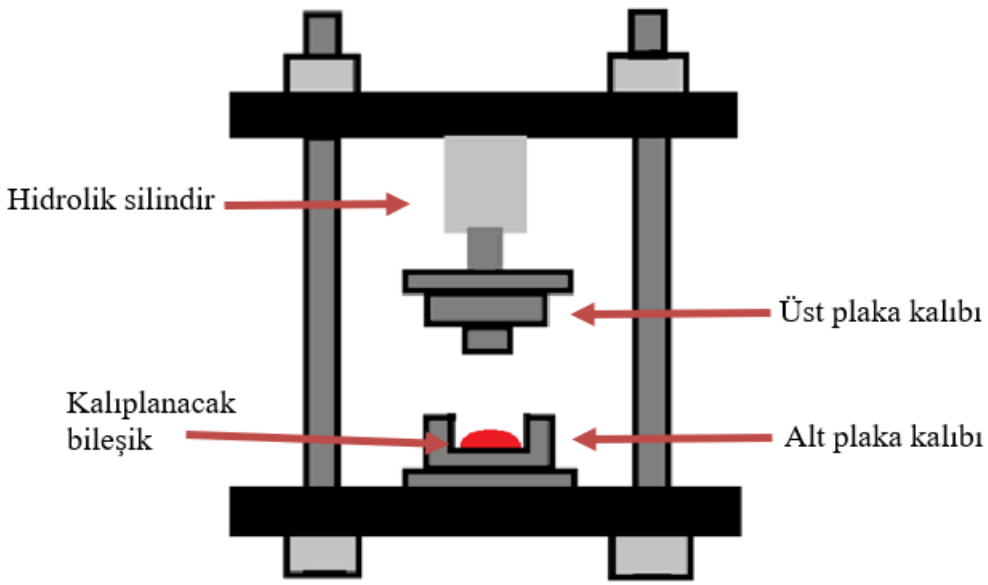
Şekil 2.13: RTM yöntemi.

2.6.2.4 Basınçla kalıplama yöntemi

Sıkıştırma kalıplama işlemi, hammadde formundaki malzemenin veya kompozit bileşiğin bir kalıp boşluğuna yerleştirilerek ısı ve basınç uygulanmasıyla gerçekleştirilmektedir. Kalıplama süreci, kalıplama öncesi hazırlık ve sıkıştırma kalıplama işlemi olmak üzere iki aşamaya ayrılmaktadır. Kısa doğal elyaf içeren kompozitlerin basınçla kalıplama işlemi için hazırlık süreci, hammadde neminin giderilmesi ve matris ile elyafın karıştırılması ya da bileşik hâline getirilmesi işlemlerini kapsamaktadır. Bu karışımın ardından, bileşik sıkıştırma kalıplama işlemine tabi tutulmaktadır. Bu süreçte sıcaklık, basınç ve süre gibi parametreler büyük

önem taşımaktadır. Basınçla kalıplama sürecindeki tüm işlemler, kompozitlerin performansı üzerinde oldukça etkili bir rol oynamaktadır [87].

Liu ve ark. [88] tarafından yapılan önceki çalışmalar, sıkıştırma kalıplama yöntemiyle üretilen numunelerin, enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilenlere kıyasla üstün mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. Ku ve ark. [89] tarafından yapılan bir önceki derleme çalışması da sıkıştırma kalıplama yöntemiyle üretilen numunelerin daha yüksek özgül yoğunluğa sahip olduğunu göstermiştir. Basınçla kalıplama prosesi, yapı içerisinde daha az boşluk oluşmasını sağlamakta ve böylece enjeksiyon kalıplama yöntemiyle üretilen kompozitlere kıyasla elde edilen üründe daha yüksek dayanım gözlenmektedir. Şekil 2.14'te basınçla kalıplama yöntemi şematize edilmiştir.

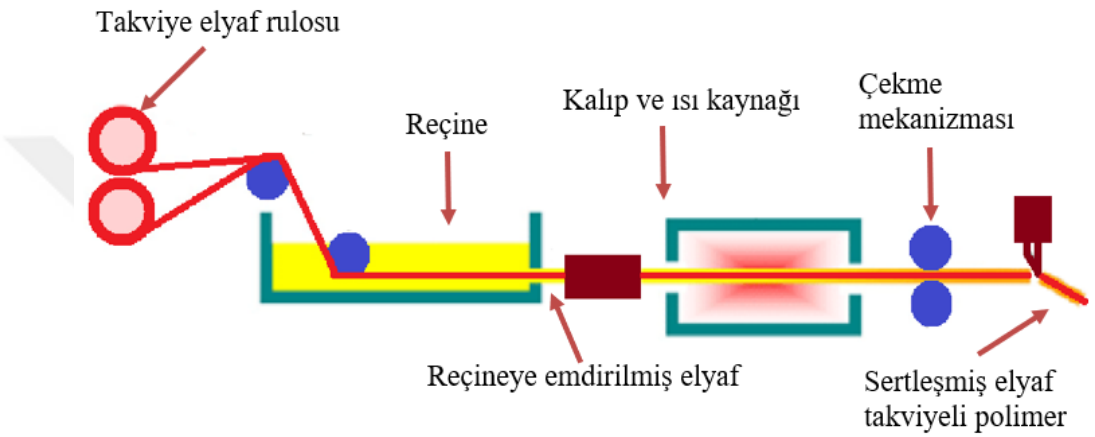


Şekil 2.14: Basınçla kalıplama yöntemi.

2.6.2.5 Pultrüzyon yöntemi

Pultrüzyon yöntemi, sürekli elyaf takviyeli polimer (FRP) kompozitlerin üretiminde yaygın olarak tercih edilen otomasyona uygun bir imalat tekniğidir. Bu yöntem yüksek dayanımlı elyafların termoset reçinelerle emprenye edilip hizalanarak, ısıtılmış bir kalıptan sürekli şekilde çekilmesi ve burada polimerizasyon reaksiyonuyla sertleşmesi esasına dayanmaktadır. Sürecin başarısı; reçinenin viskozitesi, kalıp sıcaklığı ve çekme hızı gibi parametrelerin hassas kontrolüyle doğrudan ilişkilendirilmektedir. Elde edilen kompozit profiller, yüksek çekme ve eğme dayanımı, düşük özgül ağırlık, mükemmel korozyon direnci ve uzun ömürlülük gibi özellikleriyle öne çıkar. Ayrıca bu yöntem, yüksek otomasyon seviyesine sahip sürekli üretime uygun bir üretim hızı

sunarak, üretim maliyetlerini etkin bir şekilde düşürmektedir [90]. Bu avantajlar, pultrüzyonla üretilen malzemeleri inşaat, otomotiv, enerji ve denizcilik gibi sektörlerde yapısal uygulamalarda cazip hale getirmektedir. Pultrüzyon süreci, malzeme bilimi açısından değerlendirildiğinde, takviye elyaf-matris ara yüzey etkileşimleri, ısı iletimi, reçine akış davranışı ve sertleşme kinetiği gibi çok disiplinli mühendislik parametrelerinin optimize edilmesini gerektiren karmaşık fakat oldukça verimli bir yöntemdir [91,92]. Pultrüzyon yönteminin şematik uygulaması Şekil 2.15'te verilmiştir.

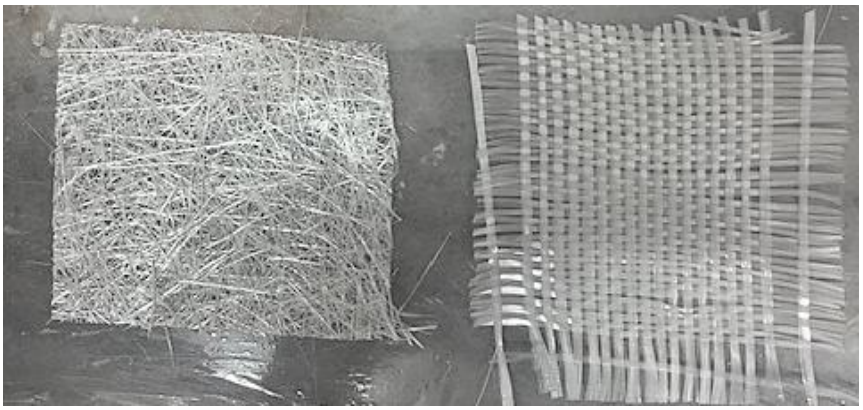


Şekil 2.15: Pultrüzyon yöntemi [91].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Malzemeler

Kompozitlerin üretiminde polimer matris malzemesi olarak UniQ-Lite 44052-800 doymamış polyester reçine (ρ=1,08-1,12 g/cm3) kullanılmış ve bu reçine Prosim Kimya'dan (İstanbul) temin edilmiştir. Kompozit numunelerinin üretimi için cam kalıplar (30x30 cm) kullanılmıştır. Kalıp yüzeyine, kalıp ayırıcı olarak Polivaks Sv-6 (Poliya, Türkiye) uygulanmıştır. Konvansiyonel olarak yanmazlık özelliği için tercih edilen katkı malzemesi alüminyum trihidrat (Al(OH)3, ATH) (saflık>99,7, beyazlık ≥93, parçacık boyutu D50=1,5-2,5 μm, BET yüzey alanı=3,5-5,5 m2/g, ρ=2,42 g/cm3) Eti Alüminyum'dan (Türkiye) temin edilmiştir. Ticari yumurta kabuğu tozu, EGGLIN Food (Balıkesir) firmasından temin edilmiştir. Sertleştirici olarak metil etil keton peroksit (MekP) kullanılmıştır. Kompozit içerisinde takviye elemanı olarak 300 gsm ağırlıktaki keçe ve dokuma formundaki cam elyaflar kullanılmış ve bu elyaflar Şişecam'dan (Türkiye) temin edilmiştir. Elyaflara ait görseller, Şekil 3.1'de verilmiştir.



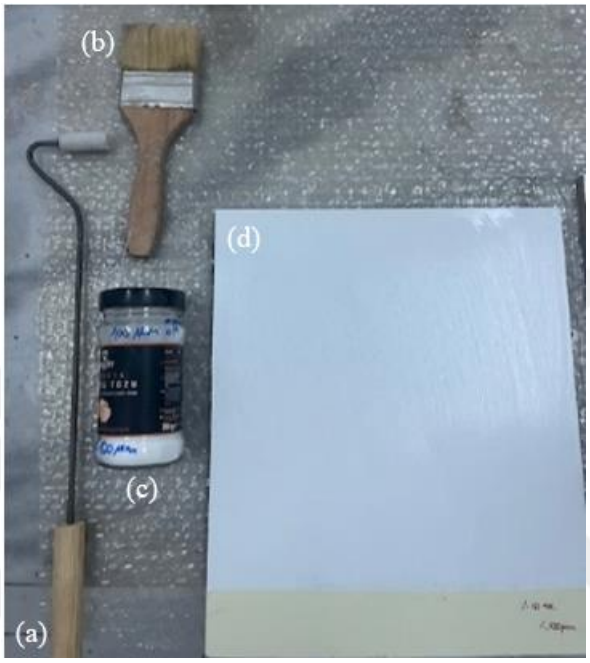
Şekil 3.1: Keçe ve dokuma formundaki cam elyaflar.

3.2 Biyodolgunun Kompozit Üretimi İçin Uygun Parçacık Boyutunun Belirlenmesi

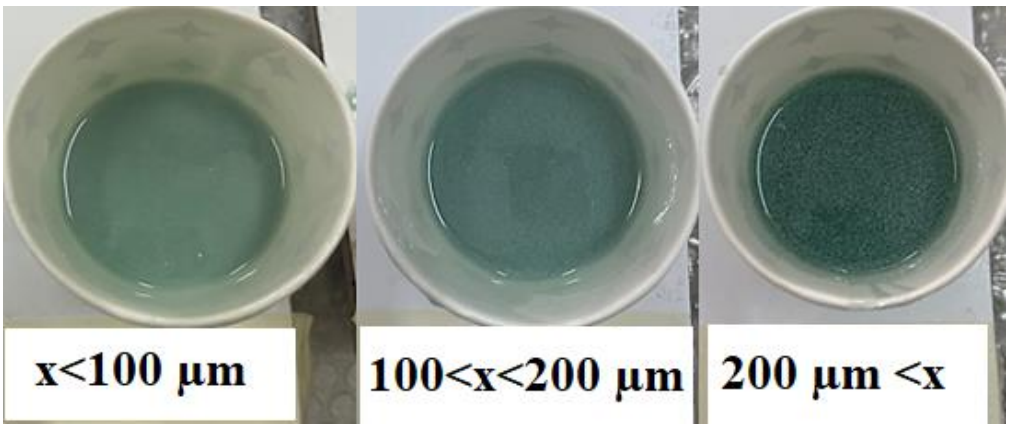
Bu tez çalışmasında, üretilmesi hedeflenen CTP/Yumurta Kabuğu/ATH katkılı kompozitlerde kullanılacak yumurta kabuğu için uygun parçacık boyutunu belirlemek amacıyla bir ön çalışma gerçekleştirilmiştir. CTP ve farklı parçacık boyutlarında ($x<100$ µm, $100<x<200$ µm, $200<x$ µm) yumurta kabuğu içeren CTP/Yumurta Kabuğu esaslı olacak şekilde el yatırması yöntemi ile üretilmiştir. El yatırması yöntemi için kullanılan üretim ekipmanları Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin kompozisyonları Çizelge 3.1'de verilmiştir. Kompozit üretiminde dolgu malzemesi olarak kullanılan yumurta kabuğu tozu (toplam reçine ağırlığına göre ağırlıkça %10) polyester içerisine katılarak karıştırılmıştır. Sonrasında MekP (toplam reçine ağırlığına göre ağırlıkça %1) ilave edilmiştir. Farklı parçacık boyutlarında yumurta kabuğu katkısı ile karıştırılmış polyester reçinelerin görselleri Şekil 3.3'te verilmiştir. Kalıba önce keçe formundaki cam elyaf yerleştirilmiştir. Reçine, keçe formundaki cam elyaf katmanına fırça ile uygulanmıştır ve el tipi silindir ile hava kabarcıkları uzaklaştırılmıştır. Sonra dokuma formundaki cam elyaf konularak reçine uygulamasına devam edilmiştir. Keçe-dokuma şeklinde tekrarlayan sırayla toplam 7 katman cam elyaf kullanılarak kompozitin hedeflenen kalınlığa (3,00 mm) ulaşması sağlanmıştır. Katkılı reçinenin, polivaks ile kaplanan kalıp yüzeyine ve cam elyaf katmanına uygulanması sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Reçinenin cam elyafa düzgün bir şekilde nüfuz etmesi ve tüm hava kabarcıklarının giderilmesi için el tipi bir silindir kullanılmıştır. Farklı parçacık boyutlarında ($x<100$ µm, $100<x<200$ µm, 200 µm $<x$) yumurta kabuğu dolgusu içeren ve dolgu içermeyen tüm kompozit malzemeler aynı üretim süreciyle üretilmiştir. PYK0, PYK1, PYK2 ve PYK3 setleri sırasıyla yumurta kabuğu dolgusuz kompoziti (kontrol), $x<100$ µm boyutunda yumurta kabuğu dolgulu, $100<x<200$ µm boyutunda yumurta kabuğu dolgulu ve $200<x$ µm boyutunda yumurta kabuğu dolgulu kompozitleri temsil etmektedir. Üretilen kompozit plakalar, kürlenme işlemi için etüvde (Binder, Almanya) 3 saat boyunca 60°C'de bekletilmiştir. Kürlenen plakalar Şekil 3.6'da gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Kompozit plakaların kompozisyonları.

Kompozit	CTP	YK katkısı (%ağ.)	Katkı parçacık boyutu
PYK0	100	0	-
PYK1	90	10	x<100 µm
PYK2	90	10	100<x<200 µm
PYK3	90	10	200<x µm



Şekil 3.2: Üretim ekipmanları (a) roller (b) fırça (c) katkı (d) kalıp.



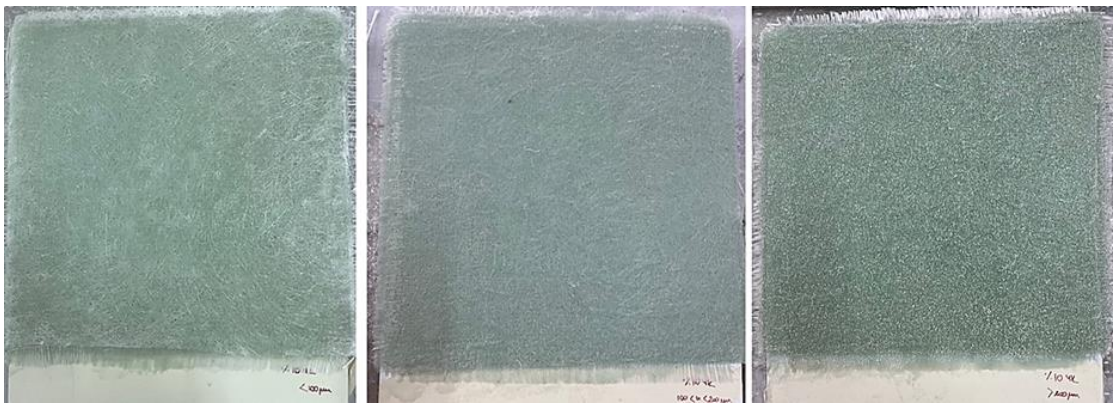
Şekil 3.3: Farklı parçacık boyutlarında yumurta kabuğu katkısı içeren reçineler.



Şekil 3.4: Katkılı reçinenin kalıp yüzeyine uygulanması.



Şekil 3.5: Katkılı reçinenin elyaf yüzeyine uygulanması.



Şekil 3.6 : Kürlenmiş kompozit plakalar.

3.3 Yumurta Kabuğu ve ATH Katkılı Cam Elyaf Takviyeli Kompozitin Üretimi

Bölüm 3.2'de bahsedilen yöntemle farklı oranlarda yumurta kabuğu (100<x<200 µm) ve ATH katkılı cam elyaf takviyeli polyester esaslı kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin kompozisyonları Çizelge 3.2'de verilmiştir.

PY_0A_0, $PY_{100}A_0$, $PY_{75}A_{25}$, $PY_{50}A_{50}$, $PY_{25}A_{75}$ ve PY_0A_{100} setleri sırasıyla dolgu içermeyen kompoziti (kontrol), farklı oranlarda yumurta kabuğu ve ATH katkısı içeren kompozitleri temsil etmektedir. . Bölüm 3.2'de bahsedilen ön çalışma sonuçlarına göre, farklı parçacık boyutlarına (x<100 µm, 100<x<200 µm ve 200 µm <x) sahip kompozitlerin çekme mukavemetleri sırasıyla 236±13,8, 260,50±16,3 ve 175,50±7,8 (N/mm2) ölçülmüştür. Buna göre en iyi mekanik sonuçları sağlayan 100<x<200 µm boyutuna sahip yumurta kabuğu ile deneysel çalışmalara devam edilmiştir.

Çizelge 3.2: Yumurta kabuğu katkılı kompozit plakaların kompozisyonları.

Kompozit	CTP	YK katkısı (%ağ.)	ATH katkısı (%ağ.)
PY_0A_0	100	0	0
$PY_{100}A_0$	90	10	0
$PY_{75}A_{25}$	90	7,5	2,5
$PY_{50}A_{50}$	90	5	5
$PY_{25}A_{75}$	90	2,5	7,5
PY_0A_{100}	90	0	10

3.4 Karakterizasyon Çalışmaları

Üretilen CTP esaslı, yumurta kabuğu ve alüminyum trihidroksit (ATH) katkılı kompozitlerin mikro yapı özelliklerinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizleri yapılarak katkıların matris içerisindeki dağılımı ve ara yüzey etkileşimleri değerlendirilmiştir. Polyester matrisli kompozit malzemelerin kimyasal yapısı ve katkı maddelerinin matris ile etkileşimleri, Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopisi (FTIR ile incelenmiştir. Mekanik performans tayini kapsamında çekme, eğme ve darbe dayanımı testleri uygulanarak malzemelerin taşıyıcı özellikleri nicel olarak belirlenmiştir. Yanmazlık özelliklerinin değerlendirilmesinde termal analiz yönteminden yararlanılmıştır.

3.4.1 Yapısal karakterizasyon

Bu çalışmada, polyester matrisli kompozit malzemelerin kimyasal yapısını ve katkı maddelerinin matris ile etkileşimlerini incelemek amacıyla ThermoFisher (ABD) markalı Nicolet IS50 Fourier Dönüşümlü Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi kullanılmıştır. Cam elyaf, yumurta kabuğu ve ATH katkılarının polyester matrisle olan etkileşimleri, fonksiyonel grup değişimleri ve bileşenler arasındaki olası kimyasal bağların belirlenmesi hedeflenmiştir. Numunelere ait IR spektrumları, FTIR spektrometresi kullanılarak 4000-500 cm-1 dalga boyu aralığında 4 cm-1 çözünürlükteki spektrumu kaydedilmiştir.

3.4.2 Mikroyapısal karakterizasyon

Polyester matrisli kompozitlerde cam elyaf takviyesi ile birlikte yumurta kabuğu ve ATH katkılarının ara yüzey etkileşimleri ve yüzey morfolojileri Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) Carl Zeiss/Gemini 300 (Almanya) cihazı ile incelenmiştir. Bu analizler, lif-matris ara yüzeyindeki etkileşimin kalitesini ve katkı maddelerinin matris içerisindeki dağılımını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneler, yüzey iletkenliğini artırmak ve net görüntü elde edebilmek amacıyla analiz öncesinde altın kaplama (15 nm) işlemine tabi tutulmuştur.

3.4.3 Mekanik özelliklerin tayini

Kompozit malzemelerin mekanik özelliklerinin tayini için aşağıda detayları verilen testler uygulanmıştır.

3.4.3.1 Çekme testi

Çekme testi, plastiklerin ve plastik kompozitlerin çekme dayanımını (N/mm²), kopma anındaki gerilmesini (N/mm²) ve kopma anındaki uzama yüzdesini (%) belirlemek için yapılır. Kompozitlerin çekme özellikleri, ISO 527-4 standardına [93] göre Zwick Z020 evrensel test makinesi (Şekil 3.8) kullanılarak belirlenmiştir. Analiz için 200x10x3 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 3.7: Çekme testi.

3.4.3.2 Eğme testi

ISO 14125 standardına [94] göre üç nokta eğme testleri, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi Shimadzu® AGX-V 100kN Evrensel test makinesiyle gerçekleştirilmiştir. Her kompozit grubunun numune tipi, Sınıf III'e göre hazırlanmıştır. Hedeflenen çalışma değerlerleri 60 mm (uzunluk), 15 mm (genişlik), 3 mm (kalınlık) ve 40 mm (dış açıklık) olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.8: Eğme testi.

3.4.3.3 Darbe testi

Devotrans darbe cihazı, ISO 179-1 standardı [95] kapsamında Charpy darbe testleri için kullanılmıştır. Üretilen kompozit plakalar kalınlıklarına göre Tip 3 sınıfında yer almaktadır. Hedeflenen çalışma boyutları 80 mm (uzunluk), 10 mm (genişlik), 3 mm (kalınlık) ve 62 mm (dış açıklık) olarak belirlenmiştir.

3.4.4 Yanmazlık tayini

Üretilen kompozitlerin alevlenebilirlik özellikleri, UL-94 yatay yanma testi yöntemi ile belirlenmiştir [96]. Deney numuneleri 125x13x3 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Test sırasında numune yatay pozisyonda sabitlenmiş ve uç kısmına doğal gazla çalışan bir alev kaynağı yönlendirilmiştir. Yanma testi prosedürüne göre, numunenin serbest ucundan 25 mm mesafede yer alan ilk işaret ile 100 mm mesafedeki ikinci işaret

arasındaki mesafeyi alevin katetme süresi ölçülmüştür. Alev, numunenin alt yüzeyine 10 saniye süreyle uygulanmış ve ardından alev uzaklaştırılmıştır. Her bir numune için uygulama sonrası gözlemlenen aktif yanma süresi kaydedilmiştir [97]. Bu test yöntemi sayesinde kompozitlerin yangına karşı gösterdiği direnç değerlendirilmiş ve elde edilen veriler farklı kompozit formülasyonlarının karşılaştırmalı analizinde kullanılmıştır. Kompozit numunelerine uygulanan yatay yanma testi Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

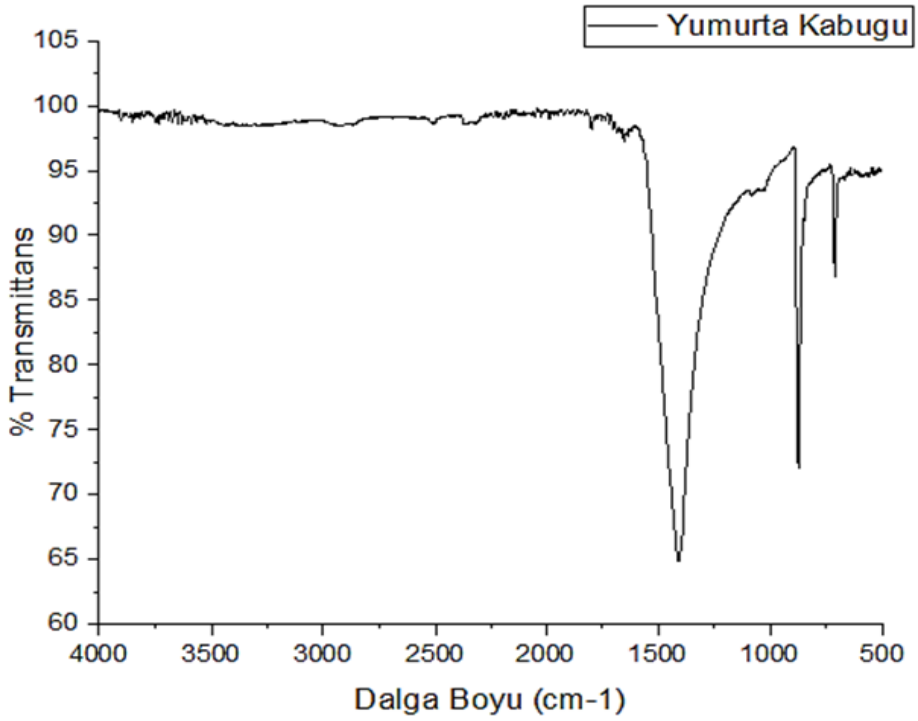


Şekil 3.9: UL94 yanmazlık testi.

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1 FT-IR Analizi

Yumurta kabuğunun FT-IR spektrumu, Şekil 4.1'de verilmiştir. Karbonattan kaynaklanan C=O bağları, 1793 ve 1653 cm^{-1}'deki zayıf bantlar ile temsil edilmektedir. Kalsiyum karbonatın C-O gerilme ve bükülme modları, sırasıyla 1408 ve 873 cm^{-1}'de gözlemlenen dalga boyları ile ayırt edilebilmektedir. Parmak izi bölgesinde 2509 cm^{-1}'de gözlemlenen pik, CaO'nun suyu absorbe etmesiyle oluşan $Ca(OH)_2$ yapısındaki OH grubundan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, 712 cm^{-1}'deki keskin bant Ca-O bağlarıyla ilişkilendirilmektedir [98].

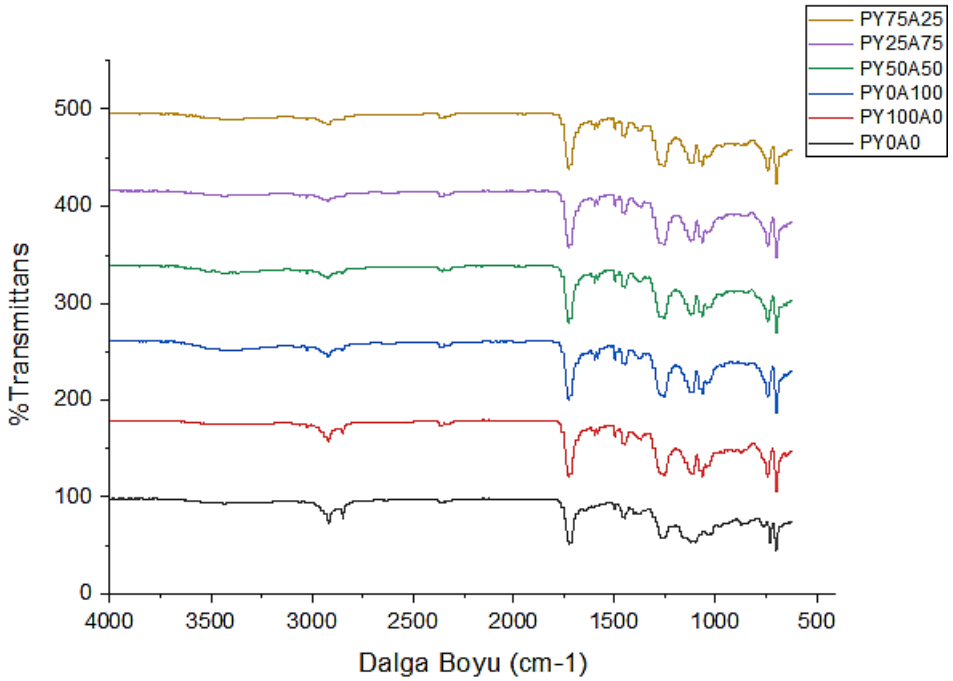


Şekil 4.1: Yumurta kabuğu FT-IR spektrumu.

Cam elyaf/polyester, yumurta kabuğu/cam elyaf/polyester, ATH/cam elyaf/polyester ve yumurta kabuğu/ATH/cam elyaf/polyester esaslı kompozitlere ait FT-IR spektrumu Şekil 4.2'de verilmiştir. Cam elyaf/polyester esaslı kontrol numunesine ait FT-IR spektrumunda 3434 cm^{-1} O-H gruplarının gerilme titreşimini temsil ederken

2849–2960 cm^{-1} aralığındaki pikler, polyester matristeki alifatik alkil gruplarının C-H gerilme titreşimlerine atfedilebilir [99]. C=O gerilme titreşimine karşılık gelen keskin pik 1717 ve 1604 cm^{-1} dalga sayılarında gözlenmektedir [99, 100]. Şiddetleri daha zayıf olan 1585 ile 1494 cm^{-1} bantları aromatik halkadan kaynaklanan farklı C-H titreşim modlarına, 1450 cm^{-1}'deki pik C–H bükülmesine ve 1411 ve 1378 cm^{-1}'de bulunan bantlar alkil gruplarının makaslama ve sallanma titreşim modlarına karşılık gelmektedir [99,100]. CH_2 gruplarının bükülme titreşim moduna ait pik 1266 cm^{-1}'dedir. Aromatik polyesterin -C-O gerilme titreşimlerine ait pikler 1101 ve 1058 cm^{-1}'de görülürken, 873 ile 730 cm^{-1} arasındaki bantlar aromatik halkanın düzlem dışı bükülmesine ve mono-ikameli aromatik halka gerilmesine atfedilebilir [99]. C–H bükülmesine ait pik 700 cm^{-1}'dedir [100].

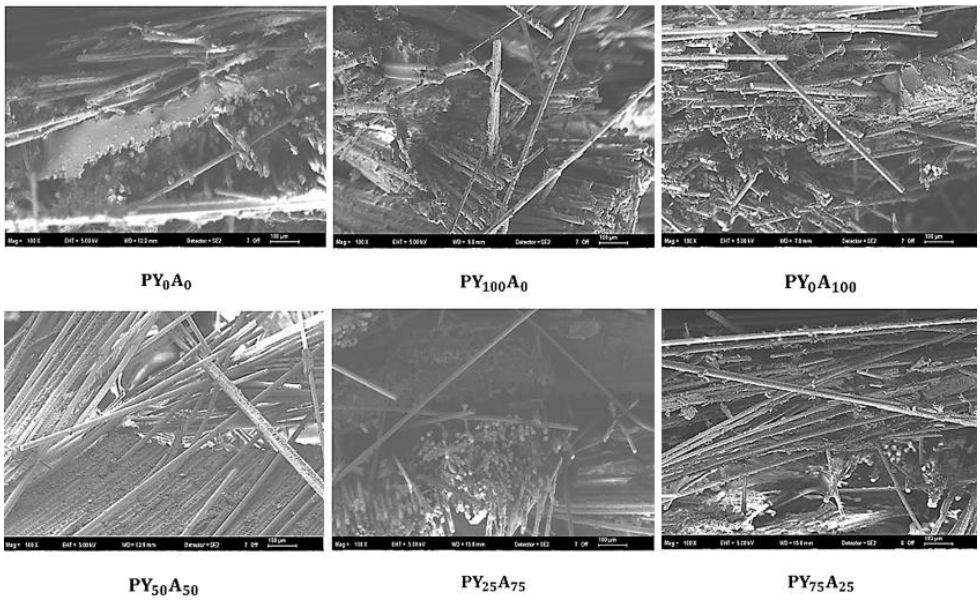
Kontrol numunesinin FT-IR spektrumunda gözlemlenen tüm karakteristik bantlar aynı zamanda katkılı cam elyaf/polyester esaslı kompozit matrislerinde de mevcuttur (Şekil 4.2). Katkıların ilavesiyle cam elyaf/polyester esaslı kompozitlerin kimyasal özelliklerinde hafif değişiklikler gözlenmiştir. Katkı içeren tüm kompozitlerde, 2922 cm^{-1} ve 2854 cm^{-1} dalga sayısındaki piklerin şiddeti, katkısız PY_0A_0 kontrol numunesine göre belirgin şekilde azalmıştır. Bunun yanı sıra, 3027 ve 1720 cm-1'de bulunan pikleri incelediğimizde katkı ilaveli numunelerde kontrol numunesine kıyasla pik şiddetinin arttığı gözlenmektedir. Kontrol numunesinde 1604, 1585 ve 730 cm-1'deki pikler katkı ilavesi ile sırasıyla 1699, 1580 ve 741 cm-1'e kaymakla beraber piklerin şiddetlerinde artış gözlenmiştir. Ayrıca kontrol numunesinde bulunmayan, ATH ve yumurta kabuğu içerikli numunelerde gözüken 1067 cm-1 dalga sayısında yeni pik meydana gelmiştir. Ayrıca kontrol numunesinde bulunmayan, ATH ve yumurta kabuğu içerikli numunelerde gözüken 1067 cm-1 dalga sayısında yeni pik oluşmuştur. Kontrol numunesinde 1158, 1117 ve 1101 cm-1'de küçük pikler gözlemlenirken katkılı kompozitlerde bu pikler kaybolmuştur ve 1119 ve 1067cm-1'de şiddeti daha büyük iki pik mevcuttur. Ortaya çıkan bu yeni bantların, ATH ve yumurta kabuğu katkılarının numune kompozisyonundaki polyester reçine ile kimyasal etkileşimleri sonucunda oluştuğu değerlendirilmektedir.



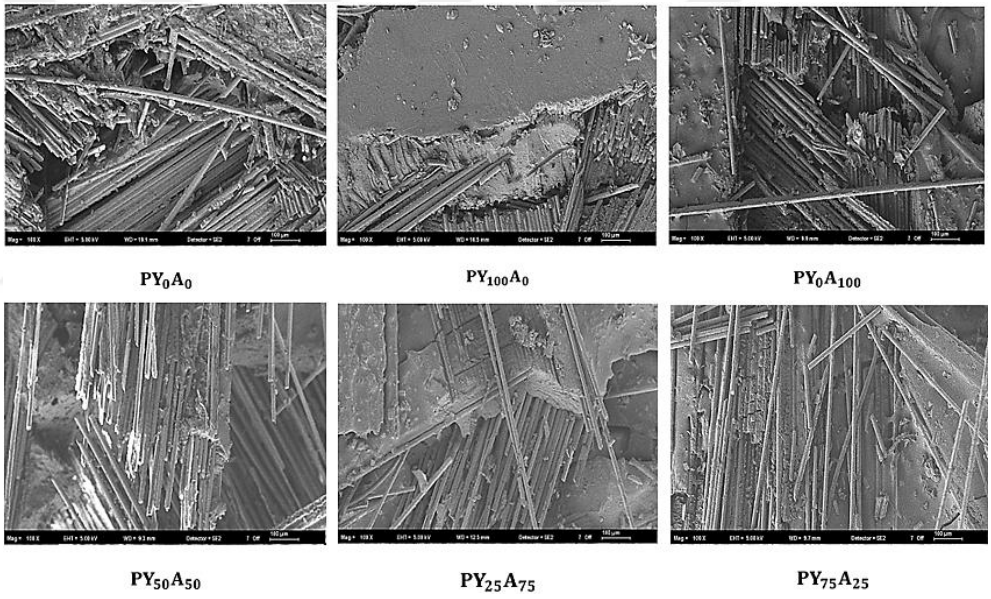
Şekil 4.2: Kompozitlerin FT-IR spektrumları.

4.2 SEM Analizi

Tüm kompozit malzemelere SEM analizi yapılmıştır ve her numune için elde edilen kesit görüntüleri Şekil 4.3'te, yüzey görüntüleri ise Şekil 4.4'te verilmiştir. Kompozitlerin yüzey görüntüleri incelendiğinde cam elyaflar gözlenmektedir. Tüm kompozitlerin kesitlerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde cam elyafların belirgin bir yönelimi olmadığı ve elyaflar ile polimer matris arasında boşlukların bulunduğu belirlenmiştir. Bazı bölgelerde cam elyafların matristen çekilip koptuğu (pull-out) tespit edilmiştir. Bu durum, Mouzakis ve ark. [101] tarafından da belirtildiği gibi, bu tip kompozitler için tipik olan matris kırılması ve çoklu lif parçalanması mekanizmalarının hakim olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.3: Kompozit numunelerinin kesit SEM mikrogramları.



Şekil 4.4: Kompozit numunelerinin yüzey SEM mikrogramları.

4.3 Çekme Özellikleri

Kompozit plakaların çekme mukavemeti, kopma gerilmesi ve kopma uzaması sonuçları, Çizelge 4.1'de ve Şekil 4.5'te verilmiştir. Kontrol numunesinin çekme modülü 9330,13±213,41 N/mm², çekme mukavemeti 179,54±9,10 N/mm², kopma gerilmesi 182,96±8,10 N/mm² ve kopma uzaması ise %3,94±0,20 değerlerini göstermiştir. Kompozisyonunda %10 yumurta kabuğu katkısı içeren $PY_{100}A_0$ numunesinde, çekme modülü 12766,67±275,6 N/mm², çekme mukavemeti

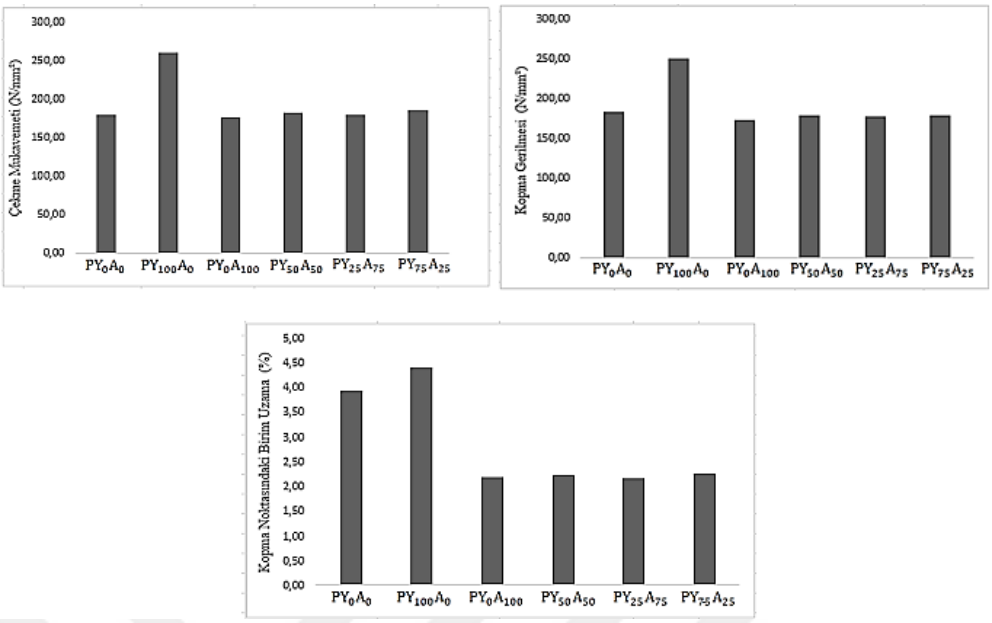
260,50±16,3 N/mm², kopma gerilmesi 251,13±13,4 N/mm² ve %4,41±0,03 kopma uzaması değerleri ile en yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir.

Buna karşılık iki farklı dolgunun yapıdaki sinerjik etkisini gözlemlemek hedefiyle çalışılan $PY_{25}A_{75}$, $PY_{50}A_{50}$ ve $PY_{75}A_{25}$ numunelerinde, yapıdaki ATH katkısının oranı arttıkça çekme mukavemeti, kopma gerilmesi ve kopma uzaması değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir. Kontrol grubuyla kıyaslandığında, katkı maddesi ilavesi yapılan tüm kompozitlerde çekme mukavemetleri artmıştır. Bununla birlikte, yumurta kabuğu ve ATH içeren kompozitlerin kopma uzama değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Dolgu taneciklerinin oluşturduğu mekanik kısıtlama ve tanecik boyutunun etkisiyle matris fazının hareket kabiliyeti ve şekil değiştirme yeteneği sınırlanmaktadır. Bu durum, özellikle cam elyaf ile matris malzeme arasında oluşan rijit ara yüzeyin deformasyon kabiliyetini azaltmasıyla daha belirgin hale gelir. Bu etkileşimler, kompozitlerin özellikle kopma uzaması üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Kopma uzamasındaki azalma, dolgulu polimer sistemlerinde yaygın olarak gözlemlenen bir eğilim olup; matrisin esnekliğinin azalması, dolgu parçacıkları arasındaki zayıf yapışma ve yapısal boşluk oluşumu gibi nedenlerle ilişkilendirilmektedir [102,103].

Kowshik ve ark. [104] yaptığı çalışmada karbonize edilmiş yumurta kabuğu, karbonize edilmemiş yumurta kabuğu ve hibrid yumurta kabuğu parçacıkları dolgulu kompozitler üretmiştir. Kompozit malzemeler arasında en yüksek çekme modülü ve dayanımı, karbonize edilmiş yumurta kabuğu dolgulu kompozitler tarafından sergilenmiştir. Hibrid kompozit, bir sonraki en iyi değerleri göstermiştir ve onu karbonize edilmemiş yumurta kabuğu dolgulu varyant takip etmiştir. En düşük çekme dayanımı ve modülü, dolgu içermeyen kompozitte gözlemlenmiştir. Bu daha yüksek dayanım, polyester matrisinden yumurta kabuğu dolgu malzemesine etkili bir gerilme aktarımı olmasıyla açıklanmıştır.

Çizelge 4.1: Kompozit plakaların çekme değerleri.

Numune Kodu	Çekme Modülü (N/mm²)	Çekme Mukavemeti (N/mm²)	Kopma Gerilmesi (N/mm²)	Kopma Uzaması (%)
PY_0A_0	9330,13±213,41	179,54±9,10	182,96±8,10	3,94±0,20
$PY_{100}A_0$	12766,67±275,6	260,50±16,30	251,13±3,4	4,41±0,03
PY_0A_{100}	9120,28±75,60	177,64±14,60	173,78±6,0	2,20±0,19
$PY_{50}A_{50}$	10831,65±420,2	183,53±10,90	178,27±12,8	2,24±0,20
$PY_{25}A_{75}$	10053,35±324,43	180,15±11,40	177,33±11,6	2,17±0,12
$PY_{75}A_{25}$	12225,76±484,4	185,19±5,90	178,67±5,10	2,27±0,20



Şekil 4.5: Kompozit plakaların çekme testi grafikleri.

4.4 Eğme Özellikleri

Kompozit plakaların eğme testi sonuçları, Çizelge 4.2'de verilmiştir. Katkısız kontrol numunesinin eğme modülü 8746,41±90,4 N/mm² olup eğme mukavemeti 280,88±10,9 N/mm'dir. Yumurta kabuğu katkılı $PY_{100}A_0$ numunesinde 8924,04±21,2 N/mm² değeri ile en yüksek eğme modülü elde edilmiştir. Sadece ATH katkılı kompozitin eğme modülü kontrole göre düşmüştür. Yumurta kabuğu ve ATH katkılı kompozitlerin eğme modülleri $PY_{50}A_{50}$, $PY_{25}A_{75}$ ve $PY_{75}A_{25}$ için sırasıyla 8844,26±58,3, 8233,16±98,0 ve 8642,98±42,6 N/mm'dir.

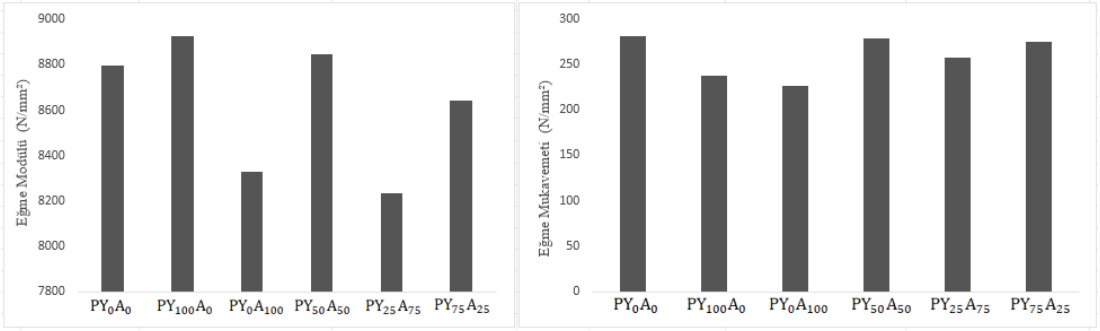
Kompozit kompozisyonuna dolgu ilavesi ile eğme mukavemeti değerlerinde kontrol numunesine kıyasla düşüş gözlenmiştir. Buna karşılık $PY_{50}A_{50}$ numunesinde, iki farklı dolgunun yapıda beraber kullanımı sinerjik etki oluşturarak 278,62±17,6 N/mm² eğme mukavemeti değeri ile kontrol numunesine en yakın değeri göstermiştir. Şekil 4.6'da kompozit numunelerinin eğme modülü ve eğme mukavemeti değişimleri grafik olarak verilmiştir.

Sivakumar ve ark. [105] gerçekleştirdikleri çalışmada yumurta kabuğu tozu ilavesinin artmasının kompozit malzemenin eğme mukavemetini azalttığı belirtilmiştir. Bu durumun, yumurta kabuğu tozu konsantrasyonunun artmasıyla birlikte epoksi reçine içerisindeki kovalent bağların zayıflamasından kaynaklandığı ifade edilmiştir.

Benzer sonuçlar literatürde Kumar ve ark. [106] çalışmasında rapor edilmiştir. Söz konusu çalışmada, zayıf matris akışının kompozit yapı içerisinde yumurta kabuğu tozunun tam olarak ıslatılamamasına ve homojen bir şekilde dağılmamasına yol açabileceği belirtilmiştir. Bu durum, matris içerisinde düzensiz dağılıma ve boşluk oluşumuna neden olarak eğme mukavemetini olumsuz etkileyebilmektedir. Ayrıca, kırılgan bir yapıya sahip olan yumurta kabuğunun, matrisin esnekliğini ve tokluğunu azaltarak yüksek oranda yumurta kabuğu parçacığı içeren kompozitlerde çatlak oluşumu ve yayılımı olasılığının arttığı ve bunun da eğme dayanımını düşürdüğü ileri sürülmüştür.

Çizelge 4.2: Kompozitlerin eğme değerleri.

Numune Kodu	Eğme Modülü (N/mm²)	Eğme Mukavemeti (N/mm²)
PY_0A_0	8746,41±90,4	280,88±10,90
$PY_{100}A_0$	8924,04±21,2	236,99±11,60
PY_0A_{100}	8328,46±21,5	226,05±1,30
$PY_{50}A_{50}$	8844,26±58,3	278,62±17,60
$PY_{25}A_{75}$	8233,16±98,0	257,24±6,10
$PY_{75}A_{25}$	8642,98±42,6	274,99±5,30



Şekil 4.6: Kompozitlerin (a) eğme modülü ve (b) eğme mukavemeti değerleri.

4.5 Darbe Özellikleri

Kompozit malzemelerin darbe testi sonuçlarında elde edilen değerler Çizelge 4.3'te verilmektedir. Kompozitlerin darbe testi sonuçları karşılaştırıldığında, çekme testi sonuçlarına benzer şekilde, $PY_{100}A_0$ numunesinin en yüksek darbe dayanımı değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir (48,97 kJ/m²). Ağırlıkça % 7,5 yumurta kabuğu dolgusu içeren kompozitin $PY_{75}A_{25}$ darbe dayanımı sonucu ise kontrol numunesine daha yakın bir değer göstermiştir (46,44 kJ/m²). Şekil 4.7'de verilen sonuçlar incelendiğinde,

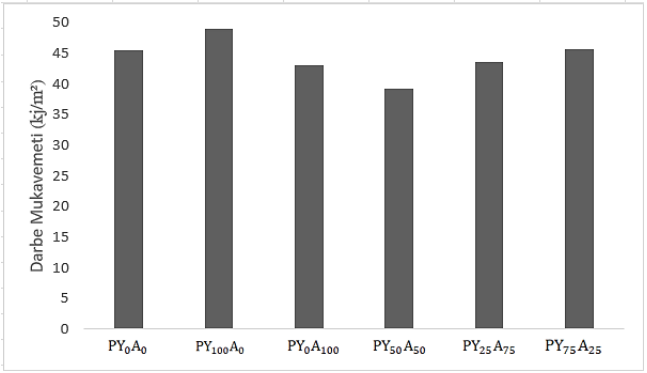
artan yumurta kabuğu katkı oranının kompozitlerin darbe dayanımını artırdığı genel bir eğilim olarak gözlenmiştir.

Literatürde yer alan Khashi'Ie ve ark. çalışmasında [107], yumurta kabuğu tozu ilavesine bağlı olarak dolgu içeriğindeki artışın polyesterin rijitliğini artırdığı belirtilmiştir. Ayrıca, yumurta kabuğu tozunun polimerlerin esnekliğini ve enerji emme kabiliyetini artıran katı bir plastikleştirici gibi davrandığı ifade edilmiştir. Bu durum, polimerlerin kırılması için daha yüksek darbe enerjisi gerekmesiyle sonuçlanan darbe dayanımındaki artışı açıklayabilmektedir. Söz konusu çalışmada, en uygun darbe özelliklerinin %80 yumurta kabuğu tozu ile %20 polyester reçine matrisinin birleştirilmesiyle elde edildiği rapor edilmiştir.

Benzer sonuçları Ramesh ve ark. [108] yaptıkları çalışmada da yumurta kabuğunun artan miktarıyla darbe mukavemetinin arttığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak, elde edilen veriler literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırıldığında yapıda yumurta kabuğunun varlığında paralel doğrultuda gelişmeler gözlenmiştir.

Çizelge 4.3: Kompozit plakaların darbe değerleri.

Numune Kodu	Darbe Mukavemeti (kJ/m²)
PY_0A_0	45,44 ± 7,65
$PY_{100}A_0$	48,97 ± 7,54
PY_0A_{100}	43,05 ± 4,30
$PY_{50}A_{50}$	39,62 ± 5,60
$PY_{25}A_{75}$	44,23 ± 4,18
$PY_{75}A_{25}$	46,44 ± 7,06



Şekil 4.7: Kompozitlerin darbe değerleri.

4.6 Yanmazlık UL94

Yatay yanma testi sonuçlarına göre, numunelere 30 saniye süreyle alev uygulanmasının ardından tüm numuneler 25 mm'lik referans çizgisini geçmiştir. Çizelge 4.4'te verildiği gibi numune kompozisyonunda yer alan yumurta kabuğu katkı oranının artmasıyla birlikte, yanma hızı azalmış ve numuneler 100 mm'lik referans çizgisine daha yavaş ulaşmıştır. Bu durum, yumurta kabuğu katkılı numunelerin alev geciktirici özellik gösterdiğini ve yanma davranışını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Yanma hızlarındaki bu düşüşe bağlı olarak, ATH ve yumurta kabuğu katkılı numuneler UL94 HB sınıfına uygunluk göstermiştir. Yanmazlık testi uygulanan kompozit numunelerinin yanma öncesi ve sonrası görüntüleri Şekil 4.8'de verilmiştir.

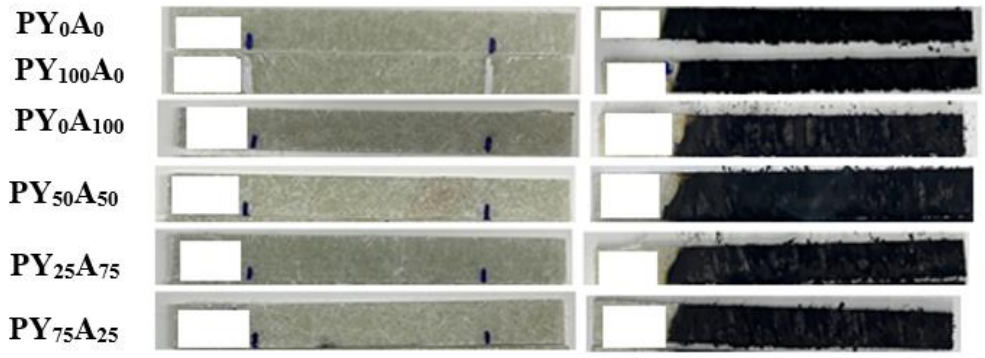
Buna paralel olarak Hiremath ve ark. [109] gerçekleştirdikleri çalışmada polyester matris içerikli ve cam elyaf katkılı kompozitlerin yapısına dahil ettikleri ağırlıkça %5 ve 10 yumurta kabuğu katkısının alev geciktirici özelliklerini incelemişlerdir. Dolgu parçacık boyutundan bağımsız olmak üzere kompozitlerin yanma hızının, yumurta kabuğu dolgu içeriğinin arttıkça azaldığını gözlemlemiştir.

Özdemir ve Özgan [110] yaptıkları çalışmada, odun plastik kompozit malzeme (OPK) üretiminde yumurta kabuğu içeriğinin artması ile malzemelerin tutuşma sürelerinde gecikme olduğu ve ayrıca yanma sürelerinin kontrol örneğine kıyasla uzadığı belirlenmiştir.

Sonuç olarak literatür çalışmalarıyla karşılaştırıldığında elde edilen verilerin uyumlu olduğu anlaşılmıştır. Bu bağlamda, cam elyaf takviyeli kompozitlere yumurta kabuğu dolgusunun eklenmesi, kompozitin yanma dayanımını arttırmanın yanı sıra, konvensiyonel alev geciktirici katkılara göre maliyet etkin ve çevre dostu bir avantaj sağladığını göstermektedir.

Çizelge 4.4: Kompozit numunelerinin ortalama yanma süreleri.

Numune Kodu	Yanma Süresi (s)
PY_0A_0	320
$PY_{100}A_0$	355
PY_0A_{100}	330
$PY_{50}A_{50}$	335
$PY_{25}A_{75}$	330
$PY_{75}A_{25}$	345



Şekil 4.8: Yanmazlık testi uygulanan kompozitlerin yanma öncesi ve sonrası.

5. DEĞERLENDİRME ve ÖNERİLER

Kompozit sektöründe yenilikçi biyodolguların kullanımı, son yıllarda sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim süreçleri açısından büyük önem kazanmıştır. Üretim süreçlerinde maliyet etkinliğin sağlanması ve malzemelerin çevresel ayak izinin minimize edilmesi için sürdürülebilir malzemelerin kompozit üretiminde değerlendirilmesinin ve kompozitlerin özelliklerine etkisinin araştırılması önerilmektedir.

Bu çalışmada, gıda endüstrisi atığı olan yumurta kabuğu, alüminyum trihidrat ve cam elyaf polyester esaslı kompozitlerin üretiminde değerlendirilmiştir. Farklı oranlarda kullanılan yumurta kabuğu ve alüminyum trihidrat dolgu malzemelerinin kompozitlerin mekanik performansları, morfolojik, yapısal ve alev geciktirici özellikleri kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

Tez kapsamında elde edilen önemli sonuçlar:

- Yumurta kabuğunun parçacık boyutu cam elyaf/polyester kompozitin mekanik özelliklerini etkilemiştir. Yumurta kabuğunun parçacık boyutu 100-200 μm aralığındayken kompozit için en iyi çekme mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Cam elyaf/polyester kompozitin çekme mukavemeti yumurta kabuğu ilavesi ile yaklaşık %45 oranında artmıştır.
- Yumurta kabuğu ve alüminyum trihidratın birlikte kullanımıyla elde edilen kompozitlerin çekme mukavemetlerinde sadece cam elyaf/polyester esaslı kompozite göre az miktarda artış gözlemlenirken kopma gerilmesi değerlerinin azaldığı görülmüştür. Kopma uzaması değerlerinde ise yaklaşık %45 oranında azalma meydana gelmiştir.
- Dolgu içeren kompozitler incelendiğinde yumurta kabuğu ve alüminyum trihidratın %5 ilave edildiği kompozitin ($PY_{50}A_{50}$) eğme mukavemeti (278,62±17,60 N/mm^2) ve eğme modülü (8844,26±58,3 N/mm^2) en yüksek değere ulaşmıştır.

- Yumurta kabuğu ve alüminyum trihidrat ilavesi ile cam elyaf/polyester esaslı kompozitin yanma süresi uzamıştır.

Elde edilen sonuçlar, biyodolguların polyester esaslı malzemelerin geliştirilmesinde geleneksel sentetik malzemelerle bir arada kullanılabilme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Gelecekte yapılacak çalışmalarda, biyodolgu içeren kompozitlerin uzun vadeli dayanıklılığı, yaşlanma davranışları ve farklı çevresel koşullardaki performansına odaklanılması, bu malzemelerin endüstriyel uygulamalarda yaygınlaşmasına katkı sağlayacaktır.

Sonuç olarak, kompozit sektöründe biyodolguların kullanımının artırılması hem çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada hem de yenilikçi malzeme tasarımlarında önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu bağlamda, disiplinlerarası araştırmaların desteklenmesi ve endüstri ile akademi arasındaki iş birliğinin güçlendirilmesi, kompozitlerin potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için kritik bir gerekliliktir.

5.1 Çalışmanın Uygulama Alanı

Bu çalışma kapsamında geliştirilen yumurta kabuğu ve alüminyum trihidrat katkılı cam elyaf takviyeli polyester kompozitler, özellikle otomotiv ve raylı sistemler sektörlerinde hafiflik, mekanik dayanım ve çevresel sürdürülebilirlik gibi temel gereksinimleri karşılayacak şekilde tasarlanmıştır. Geri dönüştürülebilir atıkların değerlendirilmesiyle elde edilen bu kompozit malzemeler; otomotiv, inşaat, denizcilik ve spor ekipmanları gibi dayanım, hafiflik ve maliyet optimizasyonunun önemli olduğu pek çok endüstriyel alanda potansiyel uygulama alanlarına sahiptir. Ayrıca biyoesaslı katkı maddesi olan yumurta kabuğunun kullanımı, geleneksel takviye malzemelerine göre daha düşük çevresel etki ile üretim yapılmasına olanak tanıyacaktır.

Yumurta kabuğu içeriğindeki yüksek kalsiyum karbonat oranı ile sadece mekanik performansa katkı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda malzemenin yanma davranışını da olumlu yönde etkilemektedir. Kalsiyum karbonatın termal bozunma sırasında endotermik reaksiyon göstermesi, kompozit sistemde ısı yutucu bir etki oluşturarak yanma geciktirici özellik kazandırmakta; böylece alev yayılımı, duman yoğunluğu ve ısı salınım oranı gibi kritik yangın parametrelerinde iyileşme sağlamaktadır.

Bu özellikleriyle geliştirilen kompozit malzeme; otomotivde motor kompartımanı çevresi, iç trim bileşenleri ve batarya muhafazaları gibi ısıya maruz kalan bölgelerde; raylı sistemlerde ise yangın güvenliği yönetmeliklerine uyum gerektiren iç kabuk kaplamaları ve yapısal olmayan hafif panellerde kullanılmaya uygun bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Bu sayede hem geleneksel alev geciktirici katkıların çevresel etkileri azaltılmakta hem de geri dönüştürülebilir atıkların katma değerli ürünlere dönüştürülmesi sağlanmaktadır.

KAYNAKLAR

[1] **Alam, S., Habib, F., Irfan, M., Iqbal, W., Khalid, K.** (2010). Effect of orientation of glass fiber on mechanical properties of GRP composites. *Journal of the Chemical Society of Pakistan, 32(3)*, 265-269.

[2] **Wang, R. M., Zheng, S. R., Zheng, Y. G.** (2011). Polymer matrix composites and technology. Elsevier.

[3] **Sajan, S. S. P. S., Selvaraj, D. P.** (2021). A review on polymer matrix composite materials and their applications. *Materials Today: Proceedings, 47*, 5493-5498.

[4] **Biswas, B., Bandyopadhyay, N. R., Sinha, A.** (2019). Mechanical and dynamic mechanical properties of unsaturated polyester resin-based composites. In *Unsaturated Polyester Resins* (pp. 407-434). Elsevier.

[5] **Tayde, S., Satdive, A., Toksha, B., Chatterjee, A.** (2023). Polyester Resins and Their Use as Matrix Material in Polymer Composites: An Overview. *Polyester-Based Biocomposites*, 1-23.

[6] **Jabbar, Rihab and Shahatha, Sara H. and habib, Mohammed Aboode and Hossain, M. Khalid.** (2024). A Green Route to Manufacture a Novel Unsaturated Polyester Matrix Composites: *A Comprehensive Study of Different Reinforcement Materials Types.*

[7] **Liu, Z., Wang, H., Yang, L., Du, J.** (2022). Research on mechanical properties and durability of flax/glass fiber bio-hybrid FRP composites laminates. *Composite Structures, 290*, 115566.

[8] **Anilkumar, S., Arumugam, K., Mutyala, V. R., Ram, K. K., Kumar, T. K.** (2021). Investigation on mechanical properties of natural fiber-polymer composite materials. *Materials Today: Proceedings, 45*, 6149-6153.

[9] **Farokhi Nejad, A., Bin Salim, M. Y., Rahimian Koloor, S. S., Petrik, S., Yahya, M. Y., Abu Hassan, S., Mohd Shah, M. K.** (2021). Hybrid and synthetic FRP composites under different strain rates: A review. *Polymers, 13*(19), 3400.

[10] **İlhan, R., & Feyzullahoğlu, E.** (2019). Cam elyaf takviyeli polyester (ctp) kompozit malzemelerde kullanılan doğal elyaflar ve dolgu maddeleri. *El-Cezeri, 6(2)*, 355-381.

[11] **Väisänen, T., Haapala, A., Lappalainen, R., Tomppo, L.** (2016). Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. *Waste management, 54*, 62-73.

[12] **Ogah, A. O., James, T. U.** (2018). Mechanical behavior of agricultural waste fibers reinforced vinyl ester bio-composites. *Asian J. Phys. Chem. Sci, 5*, 1-10.

[13] **Rajan, J. S.** (2021). Effective use of nano-carbons in controlling the electrical conductivity of epoxy composites. *Composites Science and Technology*, *202*, 108554.

[14] **Petersen, M. R., Chen, A., Roll, M., Jung, S. J., Yossef, M.** (2015). Mechanical properties of fire-retardant glass fiber-reinforced polymer materials with alumina tri-hydrate filler. *Composites Part B: Engineering*, *78*, 109-121.

[15] **Campbell, F. C.** (2004). Introduction to composite materials and processes: Unique materials that require unique processes. *Manufacturing Processes for Advanced Composites; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands*, 1-37.

[16] **T. Ngo**, Introduction to Composite Materials, IntechOpen eBooks, 2020, https://doi.org/10.5772/intechopen.91285.

[17] **Johnson T.** (2018). History of composites. The evolution of lightweight composite materials. Available from: https://www.thoughtco.com/history-of- composites-820404

[18] **Al-Shawk, A. A. A. H.** (2017). Meso-scale finite element modeling of microvascular channels in composites (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).

[19] **Asi, D.** (2018). Polimer matrisli kompozit malzemelerde ilave olarak kullanılan parçacıkların geometrisinin kompozit malzemelerin fiziksel ve mekaniksel özelliklerine etkisinin araştırılması.

[20] **Şirin, K.** (2024). Vasküler kanallı kendi kendini onaran cam elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu (Master's thesis, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

[21] **Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M., Iqbal, M. J., Billah, M., Chowdhury, M. A.** (2024). Advances of composite materials in automobile applications–A review. *Journal of Engineering Research*.

[22] **Harris, B.** (1991). A perspective view of composite materials development. *Materials & Design*, *12*(5), 259-272.

[23] **Seydibeyoğlu, M. Ö., Doğru, A., Kandemir, M. B., Aksoy, Ö.** (2020). Lightweight composite materials in transport structures. In *Lightweight Polymer Composite Structures* (pp. 103-130). CRC Press.

[24] **Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M., Iqbal, M. J., Billah, M., Chowdhury, M. A.** (2024). Advances of composite materials in automobile applications–A review. *Journal of Engineering Research*.

[25] **Rajak, D. K., Pagar, D. D., Kumar, R., Pruncu, C. I.** (2019). Recent progress of reinforcement materials: a comprehensive overview of composite materials. *Journal of Materials Research and Technology*, *8*(6), 6354-6374.

[26] **İşler, H.** (2015). Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Esneklik Katsayılarının Ultrasonik Olçümü (Master's thesis, Necmettin Erbakan University (Turkey)).

[27] **Cantor, B., Dunne, F. P., Stone, I. C.** (2003). Metal and ceramic matrix composites. *CRC Press*.

[28] **David, W. R.** (2018). Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design. *CRC Press*.

[29] **Şenel, M. C., Gürbüz, M., Koç, E.** (2018). Toz Metalürjisi Metoduyla Üretilen Al-Si3N4 Metal Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Mühendis ve Makina*, *59*(693), 33-46.

[30] **Hunt, W. H.** (1997). Metal Matrix Composites. *MECHANICAL ENGINEERING-NEW YORK AND BASEL-MARCEL DEKKER-*, 293-300.

[31] **Li, J., Laghari, R. A.** (2019). A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *100*, 2929-2943.

[32] **Dang, Z. M., Yuan, J. K., Zha, J. W., Zhou, T., Li, S. T., Hu, G. H.** (2012). Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites. *Progress in materials science*, *57*(4), 660-723.

[33] **Ray, B. C.** (2006). Temperature effect during humid ageing on interfaces of glass and carbon fibers reinforced epoxy composites. *Journal of colloid and interface science*, *298*(1), 111-117.

[34] **Xu, Y., Chung, D. D. L., Mroz, C.** (2001). Thermally conducting aluminum nitride polymer-matrix composites. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, *32*(12), 1749-1757.

[35] **Davim, J. P., Reis, P.** (2003). Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments. *Composite structures*, *59*(4), 481-487.

[36] **Mukherjee, M., Das, C. K., Kharitonov, A. P.** (2006). Fluorinated and oxyfluorinated short Kevlar fiber-reinforced ethylene propylene polymer. *Polymer Composites*, *27*(2), 205-212.

[37] **Thoppul, S. D., Finegan, J., Gibson, R. F.** (2009). Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures–a review. *Composites Science and Technology*, *69*(3-4), 301-329.

[38] **Bhargava, A. K.** (2010). Engineering Materials: Polymers, Ceramics and Composites, PHI learning Pvt. *Ltd. New Delhi*.

[39] **Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimašauskienė, R.** (2020). Matrix materials used in composites: A comprehensive study. *Materials Today: Proceedings*, *21*, 1559-1562.

[40] **Ozturk, F., Cobanoglu, M., Ece, R. E.** (2024). Recent advancements in thermoplastic composite materials in aerospace industry. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, *37*(9), 3084-3116.

[41] **Şahin, Y.** Kompozitlerde Kullanılan Takviye Elemanları ve Özellikleri.

[42] **De Araújo, M.** (2011). Natural and man-made fibres: Physical and mechanical properties. In *Fibrous and composite materials for civil engineering applications* (pp. 3-28). Woodhead Publishing.

[43] **Rezaei, F., Yunus, R., Ibrahim, N. A.** (2009). Effect of fiber length on thermomechanical properties of short carbon fiber reinforced polypropylene composites. *Materials & Design*, *30*(2), 260-263.

[44] **Husić, S., Javni, I., Petrović, Z. S.** (2005). Thermal and mechanical properties of glass reinforced soy-based polyurethane composites. *Composites science and technology*, *65*(1), 19-25.

[45] **Singh, T. J., Samanta, S.** (2015). Characterization of Kevlar fiber and its composites: a review. *Materials Today: Proceedings*, *2*(4-5), 1381-1387.

[46] **Marmol, G., Ferreira, D. P., Fangueiro, R.** (2021). Automotive and construction applications of fiber reinforced composites. In *Fiber Reinforced Composites* (pp. 785-819). Woodhead Publishing.

[47] **Nagavally, R. R.** (2017). Composite materials-history, types, fabrication techniques, advantages, and applications. *Int. J. Mech. Prod. Eng*, *5*(9), 82-87.

[48] **Gan, Y. X., Solomon, D., Reinbolt, M.** (2010). Friction stir processing of particle reinforced composite materials. *Materials*, *3*(1), 329-350.

[49] **Kim, H. S.** (2000). On the rule of mixtures for the hardness of particle reinforced composites. *Materials Science and Engineering: A*, *289*(1-2), 30-33.

[50] **Nikbakt, S. K. M. S. S., Kamarian, S., Shakeri, M.** (2018). A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites. *Composite Structures*, *195*, 158-185.

[51] **Hallal, A., Elmarakbi, A., Shaito, A., El-Hage, H.** (2013). Overview of composite materials and their automotive applications. *Advanced composite materials for automotive applications: structural integrity and crashworthiness*, 1-28.

[52**] Yıldırım, H.**, "Değişik kompozit malzemelerin mekanik davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2009.

[53] **Mochane, M. J., Mokhena, T. C., Mokhothu, T. H., Mtibe, A., Sadiku, E. R., Ray, S. S., et al.** (2019). Recent progress on natural fiber hybrid composites for advanced applications: a review. *Express Polym. Lett. 13*, 159–198. doi: 10.3144/expresspolymlett.2019.15

[54] **Durowaye, S., Lawal, G., Sekunowo, O., Onwuegbuchulem, A.** (2018). Synthesis and characterization of hybrid polypropylene matrix composites reinforced with carbonized Terminalia catappa shell particles and Turritela communis shell particles. *Journal of Taibah University for Science*, *12*(1), 79-86.

[55] **Jagadeesh, V., Venkatasubbaiah, K., Lakshumu Naidu, A.** (2019). Experimental study on mechanical behavior of natural hybrid composites filled with ground nut shell ash. *Mechanics & Mechanical Engineering*, *23*(1).

[56] **Thwe, M. M., Liao, K.** (2003). Durability of bamboo-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Composites science and technology*, *63*(3-4), 375-387.

[57] **Prasad, V., Joy, A., Venkatachalam, G., Narayanan, S., Rajakumar, S.** (2014). Finite element analysis of jute and banana fibre reinforced hybrid polymer matrix composite and optimization of design parameters using ANOVA technique. *Procedia Engineering*, *97*, 1116-1125.

[58] **Venkateshwaran, N., ElayaPerumal, A., Alavudeen, A., Thiruchitrambalam, M.** (2011). Mechanical and water absorption behaviour of banana/sisal reinforced hybrid composites. *Materials & Design*, *32*(7), 4017-4021.

[59] **Marichelvam, M. K., Manimaran, P., Verma, A., Sanjay, M. R., Siengchin, S., Kandakodeeswaran, K., Geetha, M.** (2021). A novel palm sheath and sugarcane bagasse fiber based hybrid composites for automotive applications: an experimental approach. *Polymer Composites*, *42*(1), 512-521.

[60] **Ramesh, V., Karthik, K., Cep, R., Elangovan, M.** (2023). Influence of stacking sequence on mechanical properties of basalt/ramie biodegradable hybrid polymer composites. *Polymers*, *15*(4), 985.

[61] **Karacor, B., Özcanlı, M.** (2022). The effect of use of different types of matrix material on mechanical characteristics in jute/carbon fiber reinforced hybrid composites. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *11*(2), 439-448.

[62] **Sapuan, S. M., et al.** (2020). Mechanical properties of longitudinal basalt/woven-glass-fiber-reinforced unsaturated polyester-resin hybrid composites. *Polymers*, *12*(10), 2211.

[63] **Abdel-Hamid, S. M. S., Al-Qabandi, O. A., NAS, E., Bassyouni, M., Zoromba, M. S., Abdel-Aziz, M. H., Mira, H.** (2019). Fabrication and characterization of microcellular polyurethane sisal biocomposites. *Molecules*, *24*(24), 4585.

[64] **Li, S., Li, X., Deng, Q., Li, D.** (2015). Three kinds of charcoal powder reinforced ultra-high molecular weight polyethylene composites with excellent mechanical and electrical properties. *Materials & Design*, *85*, 54-59.

[65] **Webo, W., Masu, L., Maringa, M.** (2018). The impact toughness and hardness of treated and untreated sisal fibre-epoxy resin composites. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2018*(1), 8234106.

[66] **Kumar, S., Vedrtnam, A., Pawar, S. J.** (2019). Effect of wood dust type on mechanical properties, wear behavior, biodegradability, and resistance to natural weathering of wood-plastic composites. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, *13*, 1446-1462.

[67] **Edoziuno, F. O., Akaluzia, R. O., Odoni, B. U., Edibo, S.** (2021). Experimental study on tribological (dry sliding wear) behaviour of polyester matrix hybrid composite reinforced with particulate wood charcoal and periwinkle shell. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, *33*(5), 318-331.

[68] **Thori, P., Sharma, P., Bhargava, M.** (2013). An approach of composite materials in industrial machinery: advantages, disadvantages and

applications. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, *2*(12), 350-355.

[69] **Erden, S., Sever K, Seki Y, Sarikanat M** (2010) Enhancement of the mechanical properties of glass/polyester composites via matrix modification glass/polyester composite siloxane matrix modification. *Fibers and Polymers 11*: 732-737.

[70] **Rajak, D. K., Wagh, P. H., Linul, E.** (2021). Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*, *13*(21), 3721.

[71] **Prashanth, S., Subbaya, K. M., Nithin, K., Sachhidananda, S.** (2017). Fiber reinforced composites-a review. *J. Mater. Sci. Eng*, *6*(03), 2-6.

[72] **Rosato, D. V., Rosato, D. V.** (2004). *Reinforced plastics handbook*. Elsevier.

[73] **Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., Naveen, J.** (2014). Glass fiber-reinforced polymer composites–a review. *Journal of reinforced plastics and composites*, *33*(13), 1258-1275.

[74] **Sunardi, S., Ariawan, D., Surojo, E., Prabowo, A. R., Akbar, H. I., Cao, B., Carvalho, H.** (2023). Assessment of eggshell-based material as a green-composite filler: Project milestones and future potential as an engineering material. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, *32*(1), 20220269.

[75] **Owuamanam, S., Cree, D.** (2020). Progress of bio-calcium carbonate waste eggshell and seashell fillers in polymer composites: a review. *Journal of Composites Science*, *4*(2), 70.

[76] **Chandrappa, R. K., Kamath, M. S. S.** (2020). The Egg shell as a filler in composite materials-a review. *Journal of Mechanical and Energy Engineering*, *4*(4), 335-340.

[77] **Nayak Y.S., Shenoy S., Sharma P., Aman I., Dey S.** (2015, November). Use of Egg Shell Particulate as Fillers in E-Glass/Epoxy Composites'', *Proceedings of International Conference on Mechanical Engineering and Industrial Automation*, Dubai, 21-25, (2015).

[78] **Muhammad, A. F., Abidin, M. S. Z., Hassan, M. H., Mustafa, Z., Anjang, A.** (2022). Effect of eggshell fillers on the tensile and flexural properties of glass fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, *66*, 2938-2942.

[79] **Attallah, M. S.** (2020). Investigation of Some Mechanical Properties for Natural (Eggshell) And Industrial (Calcium Carbonate) Material/Reinforced with Glass Fiber with Polymer Composite. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, *24*(6), 137-141.

[80] **Mishra, T., Mandal, P., Rout, A. K., Sahoo, D.** (2022). A state-of-the-art review on potential applications of natural fiber-reinforced polymer composite filled with inorganic nanoparticle. *Composites Part C: Open Access*, *9*, 100298.

[81] **Davim, J. P., Reis, P., António, C. C.** (2004). Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up. *Composites Science and Technology*, *64*(2), 289-297.

[82] **Perna, A. S., Viscusi, A., Astarita, A., Boccarusso, L., Carrino, L., Durante, M., Sansone, R.** (2019). Manufacturing of a metal matrix composite coating on a polymer matrix composite through cold gas dynamic spray technique. *Journal of Materials Engineering and Performance*, *28*, 3211-3219.

[83] **Hopmann, C., Wruck, L., Schneider, D., Fischer, K.** (2019). Automated winding of preforms directly from roving. *Lightweight Design worldwide*, *12*(2), 58-63.

[84] **Abdurohman, K., Pratomo, R. A., Hidayat, R., Ramadhan, R. A., Nurtiasto, T. S., Ardiansyah, R., PPP, M. G.** (2023). A comparison of vacuum infusion, vacuum bagging, and hand lay-up process on the compressive and shear properties of GFRP materials. *Indonesian Journal of Aerospace*, *21*(1), 39-50.

[85] **Petrucci, R., Santulli, C., Puglia, D., Sarasini, F., Torre, L., Kenny, J. M.** (2013). Mechanical characterisation of hybrid composite laminates based on basalt fibres in combination with flax, hemp and glass fibres manufactured by vacuum infusion. *Materials & Design*, *49*, 728-735.

[86] **Miranda Campos, B., Bourbigot, S., Fontaine, G., Bonnet, F.** (2022). Thermoplastic matrix-based composites produced by resin transfer molding: A review. *Polymer Composites*, *43*(5), 2485-2506.

[87] **Jaafar, J., Siregar, J. P., Tezara, C., Hamdan, M. H. M., Rihayat, T.** (2019). A review of important considerations in the compression molding process of short natural fiber composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *105*, 3437-3450.

[88] **Liu, W., Drzal, L. T., Mohanty, A. K., Misra, M.** (2007). Influence of processing methods and fiber length on physical properties of kenaf fiber reinforced soy based biocomposites. *Composites Part B: Engineering*, *38*(3), 352-359.

[89] **Ku, H., Wang, H., Pattarachaiyakoop, N., Trada, M.** (2011). A review on the tensile properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, *42*(4), 856-873.

[90] **Liu, M., Zhao, Y., Wang, Y., Tian, L., Shuo, W.** (2025). Design, simulations, and experiments of tube-making pultrusion process with glass fabric/PP composites. *Polymers and Polymer Composites*, *33*, 09673911251321020.

[91] **Kim, H. S., Kim, J. W., Seo, J., Lee, D. G., Sim, J. K.** (2013). Fabrication and Characterization Evaluation of Prepreg with Unidirectional Glass Fibers for use of Automobile Bumper Beams. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, *22*(5), 806-811.

[92] **Tipboonsri, P., Pramoonmak, S., Uawongsuwan, P., Memon, A.** (2023). Optimization of thermoplastic pultrusion parameters of jute and glass fiber-reinforced polypropylene composite. *Polymers*, *16*(1), 83.

[93] International Organization for Standardization (ISO) 1997 Plastics. Determination of tensile properties. Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre- reinforced plastic composites, ISO 527-4:1997

[94] Organización Internacional de Normalización. (1998). ISO 14125: fibre-reinforced plastic composites: determination of flexural properties. ISO.

[95] International Organization for Standardization (ISO) ISO/EN 179-1, 2010, Plastics-Determination of Charpy Impact Properties, ISO/EN, Brussels.

[96] Underwriters' Laboratories. Test for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances—UL-94. Northbrook, 2003.

[97] **Gunes, O. C., Gomek, R., Tamar, A., Kandemir, O. K., Karaorman, A., Albayrak, A. Z.** (2018). Comparative study on flame retardancy, thermal, and mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites with ammonium polyphosphate, expandable graphite, and aluminum tri-hydroxide. *Arabian journal for science and engineering*, *43*, 6211-6218.

[98] **Iliyasu, I., Yahaya, H., Stephen, M., Abubakar, M.** (2023). Effect of Filler Content and Particle Sizes on the Mechanical and End-Use Properties of Eggshell Powder Filled Epoxy Polymer Composite. *Physics Access. 03.* 68-77.

[99] **Croitoru, C., Patachia, S., Papancea, A., Baltes, L., & Tierean, M.** (2015). Glass fibres reinforced polyester composites degradation monitoring by surface analysis. *Applied Surface Science*, *358*, 518-524.

[100] **Haris, N. I. N., Ilyas, R. A., Hassan, M. Z., Sapuan, S. M., Afdzaluddin, A., Jamaludin, K. R., Ramlie, F.** (2021). Dynamic mechanical properties and thermal properties of longitudinal basalt/woven glass fiber reinforced unsaturated polyester hybrid composites. *Polymers*, *13*(19), 3343.

[101] **Mouzakis, D. E., Zoga, H., Galiotis, C.** (2008). Accelerated environmental ageing study of polyester/glass fiber reinforced composites (GFRPCs). *Composites part B: engineering*, *39*(3), 467-475.

[102] **Deshpande, S., Rangaswamy, T.** (2014). Effect of fillers on E-glass/jute fiber reinforced epoxy composites. *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, *4*(8), 118-123.

[103] **Mahdi, E., Dean, A.** (2020). The effect of filler content on the tensile behavior of polypropylene/cotton fiber and poly (vinyl chloride)/cotton fiber composites. *Materials*, *13*(3), 753.

[104] **Kowshik, S., Sharma, S., Rao, S., Shettar, M., Hiremath, P.** (2023). Mechanical properties of post-cured eggshell-filled glass-fibre-reinforced polymer composites. *Journal of Composites Science*, *7*(2), 49.

[105] **Sivakumar, A. A., Sankarapandian, S., Avudaiappan, S., Flores, E. I. S.** (2022). Mechanical behaviour and impact of various fibres embedded with eggshell powder epoxy resin biocomposite. *Materials*, *15*(24), 9044.

[106] **Kumar, B. A., Saminathan, R., Tharwan, M., Vigneshwaran, M., Babu, P. S., Ram, S., Kumar, P. M.** (2022). Study on the mechanical properties

of a hybrid polymer composite using egg shell powder based bio-filler. *Materials Today: Proceedings*, *69*, 679-683.

[107] **Khashi'Ie, N. S., Hamzah, K.** (2024). Mechanical properties of jute fiber polyester hybrid composite filled with eggshell. *Semarak Engineering Journal*, *6*(1), 20-28.

[108] **Ramesh, C., Krishna, M. V., Bezawada, S.** (2014). Evaluation of Mechanical Properties of Polyamide-Egg Shell Powder Composite Materials. *The International Journal of Science and Technoledge*, *2*(11), 90.

[109] **Hiremath, P., Shettar, M., Gowrishankar, M. C.** (2016). Investigation on mechanical and physical properties of GFRP-Egg shell powder hybrid composites. *Indian Journal of Science and Technology*, *9*(32), 1-6.

[110] **Özdemir, F., Özğan, A. O.** (2023). Yumurta Kabuğu İçeriğinin Odun Plastik Kompozit Malzemenin Yanma Dayanımı Üzerine Etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *26*(1), 98-107.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-SOYAD **:** Miray ÖZBAKIŞ

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2017-2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Mimarlık ve Mühendislik Fakültesi, Polimer Malzeme Mühendisliği.
- **Yüksek Lisans:** 2022-Devam ediyor, Bursa Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Polimer Malzeme Mühendisliği.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2024-Halen SAZCILAR A.Ş., Ar-Ge Uzmanı
- 2021-2023 KORTEKS , Ar-Ge Mühendisi
- 2021 Polimer Malzeme Mühendisliği Onur Öğrencisi

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Özbakış, M., Terzioğlu, P. (2025). Evaluation of different filler materials on glass fiber reinforced polymer composites for the automotive industry [Sözlü sunum]. *11th International Conference on New Trends in Chemistry*, Bologna, İtalya

Özbakış, M., Terzioğlu, P. (2025). Biyokömür ile Güçlendirilmiş Cam Elyaf Takviyeli Kompozit ve Üretim Yöntemi, Patent Başvuru Numarası: 2025/004514

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

Karaman, M., Cam, S. M., Çelen, O., Özbakış, M., Yılmaz, K. (2024). Reel- to-Reel Coating of a Conductive Polymer on Synthetic Textile Yarns in a Semi-closed Batch Oxidative CVD System. *Fibers and Polymers*, *25*(7), 2597-2603.