

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**ATIK STRAFOR KULLANARAK GRAFEN TAKVİYELİ
POLİSTİREN KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE
KARAKTERİZASYONU**

Doktora Tezi

Amin FIYOUJ

Danışman
Doç.Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

SAMSUN
2021

TEZ KABUL VE ONAYI

Amin FIYOUJ tarafından, Doç.Dr. Mevlüt GÜRBÜZ danışmanlığında hazırlanan “Atık Strafor Kullanarak Grafen Takviyeli Polistiren Kompozitlerin Üretimi Ve Karakterizasyonu” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 16.9.2021 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy çokluğu ile başarılı bulunarak Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı Adı Soyadı Üniversitesi Ana Birim/Ana Sanat Dalı	İmza	Sonuç
Başkan	Prof.Dr. Naci KURGAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul
			☐ Ret
Üye	Doç.Dr. Mevlüt GÜRBÜZ Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul
			☐ Ret
Üye	Doç.Dr. ÖZGÜR DEMİRCAN Ondokuz Mayıs Üniversitesi Metalürji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul
			☐ Ret
Üye	Dr.Öğr.Üyesi Yusuf KANCA Hitit Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☒ Kabul
			☐ Ret
Üye	Dr.Öğr. Üyesi Emine Feyza ŞÜKÜR Samsun Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı		☐ Kabul
			☒ Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT
Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım doktora tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

İmza

02/11/ 2021

Amin FIYOUJ

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı: ATIK STRAFOR KULLANARAK GRAFEN TAKVİYELİ
POLİSTİREN KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 09.06.2021 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 24

Tek kaynak oranı : % 3 çıkmıştır.

İmza

02/11/ 2021

Doç.Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

ÖZET

ATIK STRAFOR KULLANILARAK GRAFEN TAKVİYELİ POLİSTİREN KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Amin FIYOUJ

Ondokuz Mayıs Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doktora, Ekim/2021
Danışman: Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

Bu çalışmada atık strafordan elde edilen polistiren matris malzeme, takviye elemanı olarak ta grafen (ağ. % 0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 ve 1), aerogel (ağ.% 3, 6 ve 9) ve grafen-aerogel kullanılarak kompozitler üretilmiştir. Elde edilen kompozitlere çekme dayanımı, Shore sertlik testi, yanmazlık (LOI) testleri uygulanmıştır. Kompozitlerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Ayrıca TG ve FTIR analizleri de yapılmıştır.

Sonuçlardan grafen takviyeli kompozitlerde çekme dayanımı takviyesiz örneklerle (0.67 MPa) kıyaslandığında, maksimum çekme dayanımı ağ.%0.45 grafen içeren kompozitte (2.84 MPa) elde edilmiştir. Shore sertlik testi sonucunda ise ağ.%0.45 grafen için en yüksek değer (194) elde edilmiştir. Artan grafen oranıyla çekme dayanımında ve sertlik değerinde düşüş gözlenmiştir. Aerogel takviyeli kompozitlerde ise ağ.9% aerogel içeren kompozit 0.85 MPa maksimum çekme dayanımı göstermiş, Shore sertliği ise 202'ye kadar arttığı görülmüştür. Mekanik özellik olarak en iyi kompozisyon olan ağ.%0.45 grafen içeren komppozite aerogel takviyesi yapılmış ve en yüksek çekme dayanımı sonucu 3.84 MPa olarak bulunmuştur. Sertlik testinde ise bu değer 150 olarak tesbit edilmiştir. Bu kompozitlerin yanma test sonuçlarından grafen takviyeli kompozitlerde sahip olduğu yüksek termal iletkenlikten dolayı yanma oranı artmış (%5.04), aerogel takviyesiyle ise artan miktara bağlı olarak polistirene (%1.74) göre yanma oranı (%0.54) aerogelin oldukça düşük termal iletkenliğinden dolayı oldukça azalmıştır. Aerogel ve grafenin birlikte olduğu kompozitlerde ise en düşük yanma oranı %1.42 olarak belirlenmiştir.

Sonuç olarak belli bir değere kadar grafen takviyesi mekanik özellikler üzerine olumlu etki yaparken, yanmazlık özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Diğer taraftan optimum miktarda grafen içeren kompozisyona aerogel takviyesinin yapılması hem mekanik hemde yanmazlık konusunda polistirene göre daha yüksek sonuç vermiştir. Aerogel tek başına kullanıldığında daha çok yanmazlık özelliğinin gelişmesine katkı vermiştir.

Ekim 2021, 81 Sayfa

Anahtar Sözcükler: Polistiren, Grafen, Aerogel, Çekme testi, Shore testi, Yanmazlık testi

ABSTRACT

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF GRAPHENE REINFORCED POLYSTYRENE COMPOSITES USING WASTE STYROFOAM

Amin FIYOUJ

Ondokuz Mayıs University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering
PhD, October /2021

Supervisor Assoc. Prof. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ

In this study, polystyrene obtained from waste styrofoam, graphene (0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 and 1 wt.%), aerogel (3, 6 and 9 wt.%) and graphene-aerogel were used as matrix and reinforcement elements to fabricate composites. Tensile strength, Shore hardness test, flammability (LOI) tests were applied to the obtained composites. The microstructures of the composites were analyzed by scanning electron microscopy (SEM).

From the results, the maximum tensile strength was obtained (2.84 MPa) in the composite containing 0.45 wt % graphene. As a result of the Shore hardness test, the highest value (194) was obtained for 0.45 wt. % of graphene. A decrease in tensile strength and hardness value were observed with increasing graphene ratio. In aerogel reinforced composites, the composite containing 9 wt. % of aerogel showed a maximum tensile strength of 0.85 MPa, and the Shore hardness increased up to 202. Aerogel reinforcement was applied to the composite containing 0.45 wt% graphene, and the highest compressive strength was found to be 3.84 MPa. In the hardness test, this value was determined as 150. From the flammability test results of these composites, the flammability rate increased (5.04 %) due to the high thermal conductivity of the graphene, and the flammability rate of these composites decreased (0.54%) compared to the polystyrene (1.74 %) with the aerogel reinforcement, due to the very low thermal conductivity of the aerogel. In composites with aerogel-graphene, the lowest flammability rate was determined as 1.42%.

As a result, while graphene reinforcement had a positive effect on mechanical properties up to a certain value, it had a negative effect on non-flammability properties. On the other hand, the addition of aerogel to the composition containing the optimum amount of graphene gave higher results than polystyrene in terms of both mechanical and non-flammability. When aerogel is used, it has contributed to the development of its non-flammability feature.

October 2021, 81 Pages

Keywords: Polystyrene, Graphene, Aerogel, Tensile, Shore hardness, Non-flammability

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında katkılarını esirgemeyen, değerli bilgilerini paylaşan, destek olan ve sorduğum her soruyu en ince ayrıntısına kadar paylaşan değerli danışman hocam Doç. Dr. Mevlüt GÜRBÜZ' e çok teşekkür ederim. Kendisinin doktora öğrencisi olmak bana gurur ve onur vermiştir.

Tez çalışması süresince zamanını doktora tez izleme raporlarını ve doktora tezini değerlendirmeye ayıran sayın Prof. Dr. Naci KURGAN ve Doç. Dr. Özgür DEMİRCAN 'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu süreçte göstermiş oldukları sonsuz anlayış ve hoşgöründen dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalar süresince faydalandığım Ondokuzmayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü altyapısını oluşturmakta büyük katkıları olan sayın hocam Prof. Dr. Erdem KOÇ' a teşekkür ederim. Laboratuvar imkanlarından faydalanmamı sağlayan Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Bu zor süreçte hep yanımda olan hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan anneme, babama ve ağabeyimler çok teşekkür ederim

Amin FIYOUJ

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
TABLolar DİZİNİ	xii
1.GİRİŞ.	1
1.2.Tezin Kapsamı	3
1.3. Tezin Amacı	3
1.4. Tezin Özgün Değeri	4
2. LİTRERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. KOMPOZİT MALZEMELER	9
3.1. Genel Bilgiler	9
3.1.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler	10
3.1.2.Takviye Malzemesinin Şekline Göre Kompozitler	11
3.1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları	11
3.1.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajı	12
3.1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları	12
3.2. Kompozit Üretim Yöntemleri	13
3.3. Polimer Matrisli Kompozitler	14
3.3.1. Matrisler	14
3.3.1.1. Termoset Matrisler	15
3.3.1.2. Termoplastik Matrisler	17
3.3.1.3. Elastomerler	18
3.3.2. Polimer Matrisli Kompozitlerin Kullanım Alanları	19
3.3.3. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	19
3.3.3.1. Elle Yatırma Yöntemi	20
3.3.3.2. Püskürtme Yöntemi	21
3.3.3.3. İplik Sarma (Filament Winding)	22
3.3.3.4. Otoklav Yöntemi	22
3.3.3.5. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) / Reçine enjeksiyonu	23
3.3.3.6. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Prosesleri	24
3.3.3.7. Enjeksiyon Kalıplama	25
3.3.3.8. Hazır Kalıplama (Compression Molding)	26
3.4. Polistiren	27
3.4.1. Fiziksel ve kimyasal özellikleri	29
3.4.2. Kullanım alanları	29
3.4.3. Polistiren Yanma Özellikleri	30
3.4.4. Polistirenin Çözünen Ve Çözünmeyen Maddeler	31
3.4.5. Stirenin Sağlıkla İlgisi	31
3.4.6. Polistiren Sınıflandırılması	32
3.4.7. Polistiren Üretim Yöntemi	32
3.4.8. Türkiye'deki Stiren Durumu	34
3.4.9. Polistiren gerilme-şekil değiştirme özellikleri	35
3.4.10. Polistiren dünyadaki tüketimi ve geri dönüşümü	35
3.5. Grafen Ve Özellikleri	37
3.5.1. Grafen özellikleri	40
3.5.2. Grafen kullanım alanlar	40
3.5.3. Grafenin üretim yöntemleri	41
3.6. Aerojel	41

3.6.1. Aerojel Çeşitleri.....	43
3.6.2. Aerojel fiziksel özellikleri	43
3.6.3. Aerojel kullanım alanları	44
4. MATERYAL ve YÖNTEM.....	45
4.1. Materyal.....	45
4.2. Yöntem	47
4.2.1 Numune Hazırlama.....	48
4.3. Çalışmada Kullanılan Ekipmanlar	50
4.3.1. Tozların Ultrasonik Dağıtıcıyla Karıştırılması	50
4.3.2. Hassas Terazî	51
4.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	51
4.3.4. Çekme Testi Cihazı.....	53
4.3.5. Sertlik Testi Cihazı (Shore Testi)	55
4.3.6. LOI Testi (Loss on ignition)	55
5. BULGULAR ve TARTIŞMA	57
5.1. Numunelerin Çekme Testi Sonuçları.....	57
5.2. Polistiren-Aerojel-Grafen Takviyeli Kompozitlerin Çekme ve Sertlik Testleri	60
5.3. Polistiren, Grafen, Aerojel Ve Grafen-Aerojel Takiveyi Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) Testi.....	66
5.3.1. Polistiren İçin Yanmazlık (LOI) Testi	66
5.3.2. Grafen Takviyeli Polistiren Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) Testi.....	67
5.3.3. Aerojel Takviyeli Polistiren Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) Testi	68
5.3.4. Grafen-Aerojel Birlikte Takviyeli Polistiren Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) testi.....	69
5.3.5. Üretilen Kompozitlerin Termal Analizleri	71
6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	74
6.1. Polistiren Matrisli Grafen Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Sonuçları.....	74
6.2 Polistiren Matrisli Aerojel Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Sonuçları	74
6.3. Polistiren Matrisli Grafen-Aerojel Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Sonuçları....	75
6.4. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar.....	75
KAYNAK	76
ÖZ GEÇMİŞ	81

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER:

\$	:Dolar
°C	:Santigrat derece
°K	:Kelvin derece
Ag	:Gümüş
Al	:Alüminyum
C	:Karbon
Cm	:Santimetre
cm ³	:Santimetreküp
Cu	:Bakır
E	:Elastisite modülü
EPS	:Genleşebilir Polistiren
Fe ₃ O ₄	:Demir oksit
g	:Gram
GMT	:Cam Mat Takviyeli Termoplastikler
Gpa	:Gigapaskal
GPPS	:Genel amaçlı polistiren
Gr	:Grafen
HAP	:Hidroksiapatit
Kg	:Kilogram
L	:Litre
<i>l_o</i>	:İlk boyut
<i>l_s</i>	:Son boyut
m	:Metre
M ₀	:İlk ağırlık
M ₁	:Yandıktan sonraki ağırlık
ml	:Mililitre
Mm	:Milimetre
MPa	:Megapaskal
Pa	:Paskal
PAI	:Poliamidimid
PCL	:Polikaprolakton
PPE	:Poifenileneter
Ps	:Polistiren
PSU	:Polisülfon
S	:Saniye
SAN	:Stiren-akrilonitril
SBR	:Stiren-bütadien
SiC	:Silisyum karbür
SMA	:Stiren maleik anhidrit
T	:Sıcaklık
TiO ₂	:Titanyum oksit
Tpa	:Tera paskal
W	:Tungsten
ZnO	:Çinko oksit
ε	:Şekil değiştirme
π	:Pi
σ	:Gerilme

KISALTMALAR:

ABD	:Amerika birleşik devletleri
-----	------------------------------

CVD	:Kimyasal buhar biriktirme
DMTA	:Dinamik Mekanik Termal Analiz
DSC	:Boyaya duyarlı güneş pilleri
EDS	:Enerji dispersiv spektrum
EIS	:Elektrokimyasal impedans spektroskopisi
EPD	:Elektroforetik biriktirme
EPS	:Genleştirilmiş polistiren
FT-IR	:Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi
GNS	:Grafen nanosheets
GNT	:Grafen nanotabaka
GO	:Grafen oksit
GPL	:Grafen trombosit
GTMK	:Grafen takviyeli metal matris kompozit
HV	:Vickers sertlik testi
ISO	:Uluslararası standartlar
LOI	:Yanma kaybı
MLG	:Çok katmanlı grafen
MMK	:Metal matris kompozit
NMR	:Nükleer manyetik rezonans Spektroskopisi
OA	:Oleik asit
PMK	:Polimer matris kompozitler
RGO	:İndirgenmiş grafen oksit
RTM	:Reçine transfer kalıplama
SEG	:Solventle eksfoliyasyonlu grafen
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
SMC	:Hazır kalıplama pestili
SPS	:Sindikotaktik polistiren
SWCNT	:Tek duvarlı karbon nanotüp
TEM	:Geçirimli elektron mikroskobu
TGA	:Termal analiz
XRD	:X-ışını kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Uçakta kullanılan kompozit yapılar	1
Şekil 3.1. Uçak yapımında kullanılan malzemeler.....	9
Şekil 3.2. Kompozit malzeme oluşumu	10
Şekil 3.3. Plastik matri kompozit üretim yöntemleri	20
Şekil 3.4. El yatırma yönteminin üretimi	21
Şekil 3.5. Püskürtme yöntemi	22
Şekil 3.6. İplik sarma	22
Şekil 3.7. Otoklav yöntemi	23
Şekil 3.8. Reçine transfer kalıplama RTM / reçine enjeksiyonu.....	24
Şekil 3.9. Enjeksiyon kalıplama.....	25
Şekil 3.10. Hazır kalıplama örnekleri	26
Şekil 3.11. SMC hazır kalıplama birleşimi üretimi	27
Şekil 3.12. Polistiren üretim şeması.....	28
Şekil 3.13. Yanan bir polistiren örneği görüntüsü	31
Şekil 3.14. Polistirenin çözünmesine örnek görüntü.....	31
Şekil 3.15. Yıllık ortalama stiren adsorpsiyon miktarı (Mg)	32
Şekil 3.16. Sürekli bir kütle polimerizasyonu prosesiyle polistiren üretimi	33
Şekil 3.17. 2020 için dünyada talep edilen stiren türevleri.....	35
Şekil 3.18. Polistiren gerilme-şekil değiştirme özellikleri	35
Şekil 3.19. 2011 yılında bölgeye göre (A) Küresel EPS tüketimi ve (B) Kapasiteleri	36
Şekil 3.20. 2013 yılında bölgelere göre küresel EPS tüketimi.....	37
Şekil 3.21 karbon esaslı malzemeler	37
Şekil 3.22. Grafenin özelliklerinin bilinen diğer malzemelerle karşılaştırılması.....	38
Şekil 3.23. Grafen tabakaları.....	39
Şekil 3.24. Genel aerjel görüntüsü	42
Şekil 3.25. Aerjel yanma ve ağırlık taşıma Şeması.....	44
Şekil 4.1. Kullanılan grafenim SEM görüntüsü.....	46
Şekil 4.2. Ps-Gr, Ps-Aerjel, Ps+Gr+Aerjel Kompozit üretim aşamaları.....	48
Şekil 4.3. Kalıplama öncesi numune hazırlama süreçleri: a) PS hazırlama, b) çözme c) vakumlama	49
Şekil 4.4. Kalıp tasarımı (a), kalıplanmış örnekler (b) ve kesilmiş örnekler (c)	50
Şekil 4.5. Ultrasonik dağıtıcı ve özellikleri.....	51
Şekil 4.6. Hassas terazi şeması ve özellikleri.....	51
Şekil 4.7. Taramalı elektron mikroskobu	52
Şekil 4.8. Taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi.....	53
Şekil 4.9. Metalik bir malzemenin çekme ve basma diyagramları	53
Şekil 4.10. Instron 5982 100 kN zemin modeli çekme cihazı	54
Şekil 4.11. Manuel sertlik kontrolü - shore test cihazının görüntüsü.....	55
Şekil 4.12. LOI test düzeneği.....	57
Şekil 5.1. Grafen takviyeli kompozitlerin çekme eğrisi (a) ve ortalama maksimum çekme dayanımları (b)	58
Şekil 5.2. Grafen takviyeli PS kompozitlerin sertlik değeri.....	59
Şekil 5.3. Polistiren (a), ağırlık %0.45 grafen içeren polistiren (b), ağırlık %1 grafen içeren polistiren (c) ve grafen içeren kompozitin SEM ve EDX analizi (d).	60
Şekil 5.4 Polistiren-aerjel-grafen takviyeli kompozitlerin çekme örnekleri	61
Şekil 5.5. Farklı oranlarda aerjel içeren ps-gr kompozitlerin çekme test sonuçları.....	62
Şekil 5.6. Farklı örneklerin maksimum çekme dayanımlarının karşılaştırılması.....	63
Şekil 5.7. Grafen, aerjel ve grafen-aerjel takviyeli PS kompozitlerin sertlik değerleri	64
Şekil 5.8. Polistiren-ağırlık %0.4 grafen-ağırlık %9 aerjel içerikli kompozitlerin SEM ve EDX analizi	65
Şekil 5.9. PS örnekler için yanma öncesi ve sonrası görüntüleri	66
Şekil 5.10. Ps-Ağırlık %0.45 Gr İçeren Kompozitin Yanma Öncesi Ve Sonrası Görüntüsü	67
Şekil 5.11. PS-Aerjel içeren kompozitin yanma öncesi ve sonrası görüntüsü	68

Şekil 5.12. Örneklerin yanmazlık sonuçlarının karşılaştırılması	71
Şekil 5.13. Grafen, arejel, grafen-aerjel takviyeli polistiren kompozitlerin TG analizleri....	72
Şekil 5.14. Grafen, arejel, grafen-aerjel takviyeli polistiren kompozitlerin FTIR analizleri	73

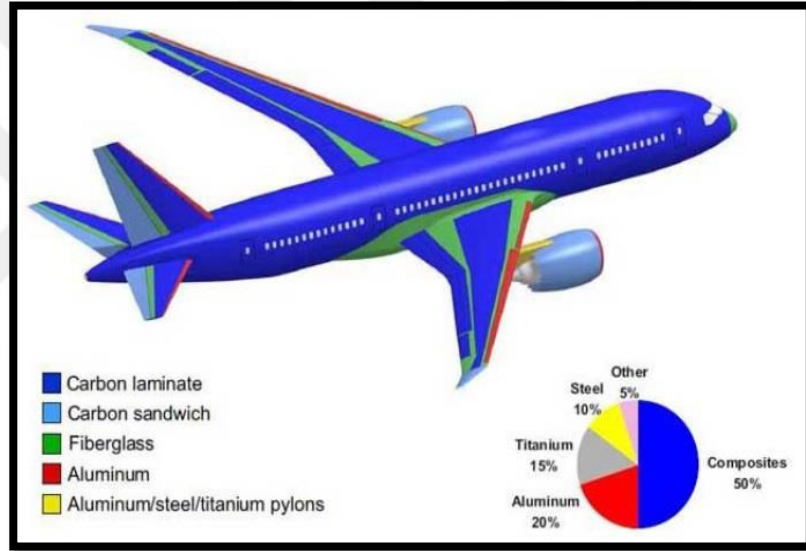


TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Belli başlı termoplastik reçineleri ve işlem sıcaklıkları	17
Tablo 4.1. Polistiren mekanik ve termal özellikleri	45
Tablo 4.2. Tek tabakalı grafenin özellikleri	46
Tablo 4.3. Asetilaseton fiziksel ve kimyasal özellikleri	47
Tablo 5.1. Ps numunenin yanma kaybı oranı	67
Tablo 5.2. Ps+Gr (%0.45) numunenin yanma kaybı oranı	67
Tablo 5.3. Aerojel takviyeli kompozitlerin yanma kaybı oranı	68
Tablo 5.4. Aerojel takviyeli Ps-0.45Gr kompozitlerin yanma kaybı oranı	69

1. GİRİŞ

Günümüzde malzeme bilimi tüm teknolojik sektörlerde kendine yer açan neredeyse tüm ekonomik ve sanayi faaliyetlerine girmiş bir alandır. Bu bağlamda kompozit malzemeler, akıllı/işlevsel malzemeler, optoelektronik malzemeler gibi ileri malzeme alanları, ülkemiz için de önemli fırsat alanlarıdır. Bu fırsat alanlarından biri Şekil 1.1'de verilen ve kullanım miktarı gittikçe yaygınlaşan, havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi bir çok kritik sektörde kullanılan kompozit malzemelerdir. Doğadaki malzemelerin çoğu "kompozit" olarak adlandırılan karma yapılı maddelerden oluşur. Bu karışımın özelliği, kendini oluşturan maddelerin özelliklerinden çok daha üstündür (Arıcasoy, 2006).



Şekil 1.1. Uçakta kullanılan kompozit yapılar (Evcin, 2017).

En az iki farklı malzemenin makro seviyede (birbiri içerisinde çözünmeyecek şekilde) birleştirilmesiyle oluşturulan yeni malzemelere kompozit malzemeler denir. Kompoziti oluşturan birleşenler kimyasal olarak birbirlerinden etkilenmezler. Eğer malzemeler birbiri içerisinde çözünebilir ve atom seviyesinde bir etkileşim olursa bu tür malzemeler kompozit değil alaşım olur. Karışım nanometre seviyesindeki partiküller düzeyinde olursa nanokompozit olarak adlandırılır (Zor, 2018).

Genel olarak kompozit malzemelere bakıldığında malzeme biliminin daima gelişmekte olan bir dalı olduğunu görülmektedir. Kompozit malzemelerin savunma sanayi, tekstil, uçak, denizcilik ve otomotiv sektöründe kullanımının önemli yeri vardır. Kompozit malzemelerde fiberlerinin eklenmesi mekanik mukavemetin

sağlanmasında önemli bir rol oynamakta ve matris malzemesi kompozit malzemesini tek parça ve bütün bir hale getirir. Kompozit malzemelerde kullanılan matrisin özellikleri yapının ısı, kimyasal, fizik ve mukavemetini belirler. Kompozit malzemelerin üretiminde elyaf lar farklı tür ve formda olan malzemeler seçilir. Genel olarak fiberler metal tabaka, partikül, seramik, viskerler ve parçalanmış elyaf lar gibi farklı malzemeler kullanılabilir. Kompozitlerde kullanılan fiberlerin temel görevi yapıya destek verme, uygulanan yükü taşıma ve malzeme hacmini artırmaktır (Yastımoğlu ve Özkan, 2017).

Genel olarak polimer matrisi olan kompozitlerde, matris olarak polimer kullanılıp ve takviye olarak da fiber kullanılan bir kompozit çeşitidir. Bu kompozitlerde elyaf ve matris arasındaki arayüz etkileşiminin oldukça kuvvetli olması gereklidir. Günümüzde bu tür kompozitler fabrikasyon aşamaları kolay olduğundan dolayı kompozit uygulamalarında en yaygın kullanılan kompozit türüdür. Polimer matrisli kompozitlerin bazı avantajlarını hafif ve korozyona karşı dirençli olmasını sayabiliriz. Bu avantajlara karşı bazı dezavantajları da vardır; bunlar ısı direncinin düşük olması veya termal genişlemenin yüksek olmasıdır. Son zamanlarda yüksek ve iyi özellikleri olan fiber takviyeli kompozitler korozyon direnci, hafif olması, yorulmaya karşı dayanıklı olması ve montaj edebilme kolaylığı gibi nedenlerden dolayı endüstride çok yaygın kullanılmaya başlanmıştır. Polimer matrisli kompozitlerin alanları havacılık ve uzay sanayisi, otomotiv, paketleme, medikal sektörü gibi alanlar örnek verilebilir(Beşergil, 2016).

Kompozit üretiminde kullanılan matris malzemelerden biride polistiren matrisli kompozitlerdir. Bu kompozitler korozyon direncini artırmada, farklı uygulamalar için su tutmaz yüzeyler, yanmazlık, ısı/ses yalıtımı amaçlı film kompozit formunda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alanlarda kullanılan polistiren kompozitlerin halen yukarıda verilen uygulamalar için özellikleri yeterli olmayıp yeni çalışmalara ihtiyaç vardır. Ayrıca yapılan çalışmaların çoğu pahalı kimyasal teknolojilerle yapılmaktadır. Yukarıda verilen nedenlerden dolayı bu tez çalışmasında ucuz üretim yöntemi ve pahalı hammaddelere alternatif polistiren kaynağı olarak atık strafor köpüklerin geri dönüşümü ile mekanik özelliği, yanmazlık vb. özelliklerin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bunun için grafen ve aerogeller kullanarak çalışamalar gerçekleşmiştir. Grafen-aerogelin birlikte kullanıldığı ve atık straforun polistiren kaynağı olarak kullanıldığı çalışmaya rastlanmamıştır.

1.2. Tezin Kapsamı

Bu çalışmanın ilk bölümünde kompozit malzemeler, matris, takviye elemanları üzerine olup, ikinci bölümünde polimer matrisli kompozitler (PMK) ve grafen takviyeli kompozitler üzerine yapılmış olan çalışmalar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde kompozit malzemeler, sınıflandırılması, polimer matrisli kompozitler, matris, takviye elemanları, grafenin özellikleri ve kompozit malzemelerin üretim yöntemleri üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde kompozit malzemelerin özellikleri, deney ekipmanları, karakterizasyonu ve kompozit malzemelerin üretim aşamaları anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise üretilen polistiren-grafen, polistiren-grafen-aerogel kompozitlerin mikroyapı analizleri, sertliği, çekme mukavemeti, yanmazlık testi değerlendirilmiştir. Altıncı bölümde ise sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

1.3. Tezin Amacı

EPS (genleştirilmiş polistiren) termoplastik, kapalı gözenekli, polistiren taneciklerin şişirilmesi ve birbirine yapışması yolu ile üretilen %98' i kuru havadan oluşan bir ısı yalıtım malzemesidir. En iyi ısı yalıtımı sağlayan birkaç malzemeden biri olan EPS, performans/fiyat analizi yapıldığında diğer ısı yalıtım malzemelerine göre ekonomik çözümler sağlayan bir yapı malzemesidir. . Bu yapı malzemelerinin kullanım sonrasında bir çok atık oluşmakta bu da geri dönüşüm olarak değerlendirilmemektedir. Bu nedenle bu tez çalışmasında amaç, inşaat atıklarından elde edilen ucuz üretim yöntemi ve pahalı hammaddelere alternatif polistiren kaynağı olarak atık strafor köpüklerin geri dönüşümü ile mekanik özelliğı, yanmazlık vb. özelliklerin son yılların en çok çalışılan malzemesi olan grafen ve aerogellerin kullanılmasıyla geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada grafen ve aerogel tozlar farklı oranlarda homojen olarak dağıtılmış, çözünmüş strafor çözeltisi içerisine katkılanmıştır. Oluşan vizkoz solüsyon bir kalıba dökülerek malzemeler elde edilmiş, sonrasında shore sertliği, çekme dayanımı ve yanma testi gibi özellikleri incelenmiştir. Ayrıca üretilen kompozitlerin mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilip, TG ve FTIR analizleride yapılmıştır.

1.4. Tezin Özgün Değeri

Kompozit üretiminde kullanılan matris malzemelerden biride polistiren matrisli kompozitler olup, bu kompozitler su tutmaz yüzeyler, yanmazlık, ısı/ses yalıtımı, mekanik özelliklerin geliştirilmesi için tercih edilmektedir. Ancak halen kullanılan polistiren kompozitler yukarıda verilen uygulamalar için özellikleri yeterli olmayıp yeni çalışmalara devam edilmektedir. Yapılan bu çalışmaların çoğu pahalı kimyasal teknolojilerle yapılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı tez çalışmasında pahalı hammaddelere alternatif polistiren kaynağı olarak atık strafor köpüklerin geri dönüşümü ile mekanik özelliği ve yanmazlık özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bunun için grafen ve arojel kullanarak çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Grafen ve arojelin birlikte kullanıldığı, atık straforun polistiren kaynağı olarak kullanıldığı ve bu takviyelerin mekanik özellik, yanmazlık gibi özellikleri üzerine olan etkisine yönelik çalışmaya rastlanmamıştır. Ayrıca literatüre bakıldığında grafenin mekanik özelliklere olumlu etki yaptığı, arojelin ise daha çok sahip olduğu düşük termal iletkenlikten dolayı ısı yalıtım amaçlı kullanıldığı görülmüştür. Polistirene yönelik grafen, arojel ve grafen-arojelin kullanıldığı çalışma sayısının sınırlı olduğu görülmüştür. Bu çalışmada atık strafordan elde edilen polistirene grafen, arojel ve grafen-arojel takviyesinin mekanik ve yanmazlık üzerine etkisi incelenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çalışmada kullanılması planlanan grafenin kompozit yapılarda mekanik özelliklere olan etkisine yönelik metal ve polimer matrisli kompozit çalışmaları aşağıda verilmiştir.

Archana.S vd. (2010), polistiren nanopartikül ile işlevselleştirilmiş grafen kullanarak mikro emülsiyon polimerizasyonu yapılmıştır. Sonuçlardan PS'nin termal özellikleri grafenin kompozit içerisine dahil edilmesi ile iyileştiği görülmüştür. Modifiye grafen, iletken PS filmleri oluşturmak üzere iyi uyum ve etkileşimler sergilemiştir.

Jintao Yang vd. (2011), yaptığı çalışmada Hummers yöntemi kullanılarak grafitin oksitlenmesiyle grafen oksit hazırlamıştır. Sonrasında polistiren/grafen oksit kompozitleri hazırlanmış ve morfolojileri özellikleri karakterize edilmiştir. Grafen oksit ilavesi, polistiren/grafen oksit kompozitlerinin cam geçiş sıcaklığını arttırmıştır.

Yoda vd (2011), termal izolasyon amaçlı aerogel ve polipropilen içeren köpükleri çalışmış, yüksek hacimli aerogel oranında bile kompozit yüksek esneklik göstermiştir. Kompozitin termal iletkenliği neredeyse silika esaslı aerogel kadar düşük olduğu ($0.016 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2013), bu çalışmada indirgenmiş grafen oksit (RGO), Ag nanopartikülleri ve polistiren mikro-küresinden oluşan üçlü bir solüsyon hazırlamışlardır. Yapılan kimyasal analiz sonuçlarından RGO, Ag nanoparçacıkları ve PS mikroküresi arasında güçlü etkileşimlerin olduğu görülmüştür.

Wu vd. (2013), aerogel takviyesinin PVDF yapıda kullanımını incelemiştir. Silika esaslı gözenekli aerojelleri sahip olduğu düşük termal iletkenliğinden dolayı PVDF polimer fiberlerin üretiminde kullanmıştır. Aerogel kullanımıyla daha düşük termal iletkenliğe sahip, daha yüksek mukametli fiber yapıları üretilmiştir

Bir vd. (2014), güneş pillerine yönelik bu çalışmada ZnO, grafen ve polistiren birleştirilerek etkili bir kompozit elektrolit hazırlamıştır. Gr-PS elektrolitinin iyonik iletkenlikleri, optimize edilmiş grafen elektrolit oranı için 32.8 mS cm^{-1} den 39.8 mS cm^{-1} e belirgin şekilde geliştirilmiştir.

Xu vd. (2014), yaptıkları bu çalışmada çok katmanlı grafen (MLG) ile güçlendirilmiş TiAl matris kompozitlerinin (GTMK) hazırlama tekniği ve tribolojik

özelliklerini raporlamıştır. Tribolojik çalışmalardan MLG'nin sürtünme katsayılarını 4 kat azaltmasında ve aşınmayı neredeyse 9 kata kadar azaltmada önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

Şenel vd. (2015), yaptıkları çalışmada genel olarak saf alüminyum içerisine grafen katkısı yapıldığında, kompozitin maksimum çekme dayanımı 155 MPa'dan 315 MPa'ya, mikro Vickers sertlik değeri ise 76 HV'den 85 HV'ye arttığı görülmüştür.

Chen vd. (2016), yaptıkları çalışmada grafe/bakır kompozitleri vakumlu sıcak pres sinterleme ile imal etmişler, saf bakıra göre %177 mukavemet artışı görülmüştür.

Li vd. (2016), ısı yalıtımı için aramid elyaf takviyeli aerjel takviyeli kompozitleri ısı yalıtımı amaçlı üretmişlerdir. Hazırlanan aerjel ilaveli (ağ.1.5% - 6.6% arası) aramid fiber içeren kompozitler oldukça düşük termal iletkenliğe ($0.0227 \pm 0.0007 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$) sahip olmuştur.

Zhao vd. (2017), yaptıkları çalışmada, grafen takviyeli polistiren kompozitleri basit bir solüsyon-döküm yöntemi kullanılarak hazırlamıştır. Doğal grafitten elde edilen grafen ağ.%0.5 PS matrisine eklenmesiyle arasındaki etkin yük aktarımı nedeniyle çekme mukavemetinde % 6'lık bir artış ve saf PS'den daha yüksek young modülünde % 77'lik bir iyileşme sağlamıştır.

Zhanga vd. (2017), indirgenmiş grafen oksitler ile polistireni(RGO-PS) emülsiyon polimerizasyonu yoluyla hazırlamış ve dielektrik özelliklere olan etkisi araştırılmıştır. Sonuçlardan hiçbir muamele edilmemiş RGO içeren kompozitlerle karşılaştırıldığında, RGO-PS'ye sahip kompozitler için önemli ölçüde dielektrik sabit artmış ve düşük dielektrik kaybı gözlenmiştir. Bu çalışma, kompozitlerin dielektrik performansının, iletken dolguların arayüz yapısını makul bir tarzda tasarlama stratejisi vasıtasıyla etkili bir şekilde iyileştirilebileceğini göstermektedir.

Gürbüz ve Mutuk (2018), yaptıkları bu çalışmada sinterleme süresinin, sıcaklığın ve grafen miktarının titanyum özelliklerine etkisi detaylı olarak incelemişlerdir. Saf titanyuma ağ. %0.15, 0.30, 0.45, 0.60 grafen nanotabaka eklenip ve toz metalürjisi yöntemiyle kompozitler üretilmiştir. Sonuçlardan, yüksek yoğunluklu (4.39 g/cm^3), en sert (390 HV'den 566 HV'ye) ve ağ.%0.15 grafen ilavesi için geliştirilmiş kompozitlerde elde edilmiştir.

Liu vd. (2018), yaptıkları çalışmada grafen ile titanyumu güçlendirmişlerdir. Saf titanyum örnekler akma dayanımı ve basma dayanımında sırasıyla yaklaşık % 43 ve % 37'lik bir maksimum artış elde etmişlerdir.

Yang vd. (2018), yaptıkları bu çalışmada alüminyum tozu içine ağırlıkça % 0,06, 0,14, 0,21 ve 0,54 oranında grafen katkısı yapılmıştır. Üretim sonrası numunelere 450°C'de sıcak ekstrüzyon uygulanmıştır. Ağırlıkça %0.54 grafen ilave edildikten sonra, ekstrüzyondan öncesi mukavemetindeki artış % 45 olmuştur. Bununla birlikte, ekstrüzyon işleminden sonra gerilme mukavemetindeki artış % 93'e yükselmiştir.

Şenel ve Gürbüz (2020), toz metalurjisi yöntemiyle Si_3N_4 ve grafen takviyeli alüminyum matrisli hibrit kompozitler toz metalurjisi yöntemiyle farklı oranlarda (Si_3N_4 : 1, 3, 6, 9 ağırlık%; grafen: 0.1, 0.3, 0.5 ağırlık%) üretilmiştir. Test sonuçlarından, en yüksek Vickers sertliği (66 ± 1 HV), en düşük gözeneklilik (%5,6), aşınma oranı ($3,1 \times 10^{-5} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$) grafen içeren Al-9 Si_3N_4 -0.1GNP için elde edilmiştir

Gürbüz vd. (2021), titanyum matrisli kompozitlerin mekanik, tribolojik ve termal özelliklerine grafen içeriğinin (0,15-0,60 ağırlık% arası) etkilerini araştırmıştır. Sonuçlardan grafen takviyeli titanyum kompozit ile saf titanyum karşılaştırıldığında ağırlık% 0,15 grafen içeren kompozitin en yüksek basma dayanımının (845 MPa), çekme dayanımının (613 MPa), en düşük kütle kaybının (10 N için 0,6 mg) ve en düşük aşınma oranının ($286 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 10 N için) olduğu görülmüştür. Bu değerler saf titanyum için sırasıyla 652 MPa, 413 MPa, 1 mg ve $5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ elde edilmiştir.

Şenel vd. (2021), farklı oranlarda bor karbür ve grafen nanoplakalar kullanarak alüminyum hibrit kompozitleri toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiştir. Sonuçlardan Al-30%B4C-0.15GNPs kompozitinin Vickers sertliği ve basma dayanımındaki artış, saf alüminyum ile karşılaştırıldığında %293 ve %190 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, Al-30B4C-GNPs kompozitlerinin mekanik mukavemetinin GNP içeriğinin %0.15'ine kadar arttığı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %0.15 grafen içeriğinden sonra, kompozitlerinin mekanik mukavemeti, topaklanmış grafen nanoparçacıkları nedeniyle azalmıştır.

Şenel ve Gürbüz (2021), alümina Al_2O_3 ve grafen nanoplakalar ile alüminyum matrisli kompozitler üretmiştir. Test sonuçlarından, saf alüminyumun mikro Vickers

sertliği 28.2 ± 1 HV, $\text{Al-30Al}_2\text{O}_3$ kompozitin $51.5 \pm 0,8$ HV ve grafen ilaveli $\text{Al-30Al}_2\text{O}_3\text{-0.1GNPs}$ hibrit kompozitin ise 63.1 ± 1 HV olduğu belirlenmiştir. Benzer şekilde maksimum basma dayanımı sırasıyla 92.4 ± 4 MPa, 165 ± 4.5 ve 188 ± 5 MPa olarak belirlenmiştir.

Şenel ve Gürbüz (2021), toz metalurjisi yöntemi ile bor nitrür ve grafen takviyeli hibrit alüminyum matris kompozitleri üretmiş olup, grafen ve seramiğin bulunduğu hibrit kompozitler basma dayanımında ve mikro-Vickers sertliğinde saf alüminyuma kıyasla $\sim \%225$ ve $\sim \%87$ oranında önemli bir iyileşme elde edilmiştir.

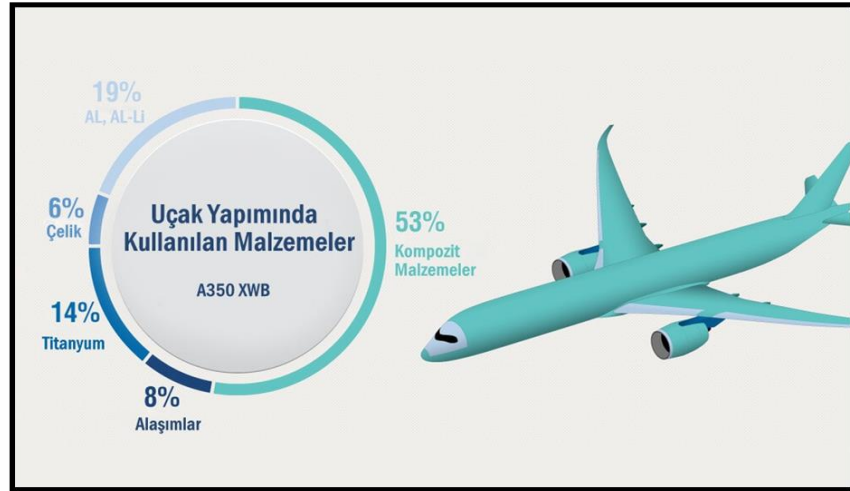
Mutuk vd. (2021), toz metalurjisi yöntemiyle Si_3N_4 ve grafen ikili toz takviyeli hibrit titanyum kompozitleri üretmiştir. Si_3N_4 tozu ağırlıkça $\%3$ oranında ve grafen nanoplateletler çeşitli miktarlarda (0,15, 0,30, 0,45, 0,60 ağırlıkça $\%$) titanyum matrise ilave edilmiştir. En yüksek sertlik (634 HV) ve basma dayanımı (1458 MPa) değerleri ağırlıkça $\%0.15$ grafen ve ağırlıkça $\%3$ Si_3N_4 katkılı titanyum hibrit kompozit için ölçülmüştür.

Sonuç olarak yapılan çalışmalara bakıldığında grafenin belli bir orana kadar mekanik özelliği artırdığı, aerogelin ise daha çok sahip olduğu düşük termal iletkenlikten dolayı ısı yalıtım amaçlı kullanıldığı görülmüştür. Polistirene yönelik grafen, aerogel ve grafen-aerogelin kullanıldığı çalışma sayısının sınırlı olduğu görülmüş ve bu çalışmada atık straforun elde edilen polistirene grafen, aerogel ve grafen-aerogel takviyesinin mekanik ve yanmazlık üzerine etkisi incelenmiştir.

3. KOMPOZİT MALZEMELER

3.1. Genel Bilgiler

Kompozit malzemeler, birleşenleri farklı ve birbiri içerisinde çözünmeyen iki veya daha fazla malzemenin kendi özelliklerinden daha yüksek malzeme özelliklerine sahip olması için makro seviyede birleştirilmesi sonucu elde edilen malzemelerdir. Kompozitlerin tersine yapılarında birden fazla sayıda fazın yer aldığı klasik alaşımlar da atomik seviyede çözünmenin olduğu, bu fazların makro ölçüde homojen olmalarına karşılık mikroskobik muayene ile mikro ölçüde heterojen olduğu görülür. Kompozit malzemelerin kullanılmasındaki bir diğer önemli noktada malzemelerin ekonomik ve hafif olmasıdır. Örneğin paslanmaz çelikler ve polimerler karşılaştırıldığında, polimer bir malzeme hafif ve mukavemeti düşük, paslanmaz çelik ise ağır çok pahalıdır. Örneğin çeliğe alternatif olarak polimer matrisli kompozit yapı hem daha ekonomik hemde özellik olarak çeliğe yakın özellikler elde edilmektedir (Yılmazoğlu, 2004). Şekil 3.1’de uçak üretiminde kullanılan malzemeler verilmiş, kullanılan kompozit yapının kullanımı metal yapılara göre sahip olduğu hafiflik ve metallere yakın mukavemetlerinden dolayı artış göstermektedir.



Şekil 3.1. Uçak yapımında kullanılan malzemeler (Anonim, 2017)

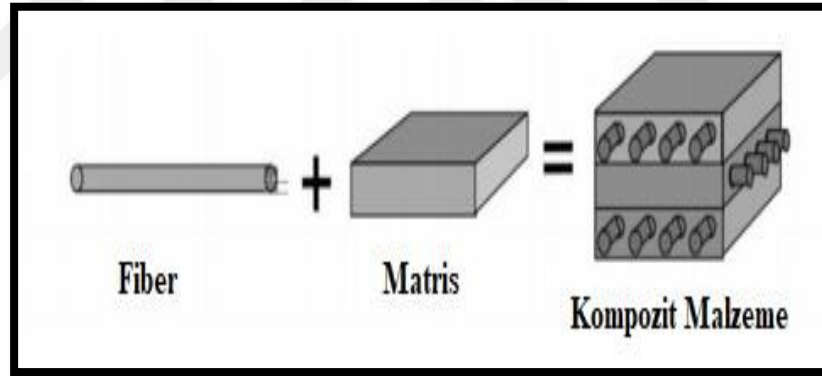
Şekil 3.2’de verildiği üzere kompozit malzemelerin üç ana elemanı bulunmaktadır.

Bunlar :

- **Matris:** Termoset veya termoplastik polimer malzeme olarak sürekli fazı oluşturur. Termosetler grubunda ağırlıklı olarak polysterler kullanılır. Bunun

yanı sıra vinilester/birsfenol, epoksi reçine ve fenolik reçinelerin kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır. Termoplastik grubunda yaygın olarak poliamid ve polipropilen kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra hibrit formda polietilen ve polibutilentereftalat, polietereketon ve polietersulfon kullanımı da dikkat çekmektedir.

- **Takviye:** Aramid, karbon, grafit, boron, silisyum karbür, alümina, cam ve polietilen malzemelerin kısa veya uzun düzenli veya rastgele dağılmış elyaf formunda kullanıldığı ve matrise yaklaşık %60 hacim oranında pekiştirici işlevi olan malzemelerdir.
- **Katkılar:** Kimyasallar ve diğer katkıları matrise niteliklerine göre özelliklerin geliştirilmesi amacıyla ilave edilirler. Bu gruptaki kompozit malzemeler uçak-uzay, savunma, yapı-inşaat, korozyon dayanımı gerektiren uygulamalarda, elektrik-elektronik, denizcilik ve özel amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle otomotiv sektöründe giderek artan ve % 6'ya yaklaşan bir uygulama artış hızı görülmektedir(Arıcasoğlu, 2006).



Şekil 3.2. Kompozit malzeme oluşumu (Y. K. Kumar ve D. S. Lohchab, 2016)

Kompozit malzemeler en genel şekliyle matris malzemesine ve takviye elemanına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılır.

3.1.1. Matris Malzemesine Göre Kompozitler

Kompozit yapılar metal, seramik ve polimer matrisli kompozitler şeklinde matris malzemesine göre sınıflandırılmaktadır. Polimer matrisli kompozitler (PMK), kompozitin ana malzemesi polimer olup, bu anafazdan üretilen kompozitler düşük yoğunluğu, ekonomik olması, kolay şekillendirilmesi, mekanik davranışının yüksek olması ve elektriksel olarak yalıtkan olması gibi nedenlerden dolayı uygulamalarda

yoğun olarak kullanılmaktadır. Seramik matrisli kompozitler (SMK) ise matris malzemesi ZrO_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , SiC , Si_3N_4 , B_4C , BN vb. seramik bir malzeme olan ve takviye elemanında seramik partikül veya fiberlerden oluşan bir yapı olup yüksek sıcaklık gereken ve tokluğu artırmak, çatlak ilerlemesini durdurmak için kullanılan kompozitlerdir. Metal matrisli kompozitler (MMK) ise daha çok anafaz olarak magnezyum (Mg), çinko (Zn), titanyum (Ti), alüminyum (Al) ve bakır (Cu) gibi metaller ve alaşımlarını içeren, takviye elemanı olarak ise partikül veya fiber formunda nitrür, karbür ve oksit formundaki seramikleri içeren kompozitlerdir. Bu kompozitler daha çok korozyon ve aşınma özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılmaktadır (Şenel, 2018).

3.1.2. Takviye Malzemesinin Şekline Göre Kompozitler

Takviye elemanları kompozit malzemelerin özelliklerini etkileyen en önemli yapıdır. Takviye elemanı ile matris malzemesinin uyumlu olması kompozit özelliklerini iyileştirmektedir. Kompozit üretimlerinde kullanılan takviye elemanları tek filament, uzun/kısa elyaf veya fiber, parçacık ve laminant yapıda olmaktadır. Kompozit yapı içerisinde anafaz malzeme tarafından yükün takviyeye iletilmesi için, matris ile takviye malzemesi arasındaki arayüz etkileşiminin kuvvetli olması gerekmektedir. Ayrıca takviye malzemelerinin matris içinde homojen dağılımı da kompozitin özelliklerini etkileyen en önemli parametredir (Şenel, 2018).

3.1.3. Kompozit Malzemelerin Avantajları

Kompozit malzemelerin temel avantajları aşağıda özetlenmiştir.

- Aşınma direnci
- Korozyon direnci
- Kırılma tokluğu
- Yüksek sıcaklığa dayanıklılık
- Isı iletkenliği veya ısı direnci
- Rijitlik
- Düşük ağırlık
- Elektrik iletkenliği veya elektriksel direnci
- Mekanik özelliklerin iyi olması
- Akustik iletkenlik, ses tutuculuğu veya ses yutuculuğu

- Kolay Şekillendirebilme
- Titreşim Sönümlendirme

3.1.4. Kompozit Malzemelerin Dezavantajı

Kompozit malzemelerin temel dezavantajları aşağıda özetlenmiştir.

- Kompozit malzemelerdeki üretim sonrası hava kalıntıları malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir
- Kompozit malzemeler yöne bağlı farklı mekanik özellikler gösterirler.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerleri farklılıklar gösterir.
- Kompozit malzemelerin delik delme, kesme türü operasyonları liflerde açılmaya neden olduğundan, bu tür malzemelerde hassas imalattan söz edilemez.
- Hammaddenin pahalı olması; havacılık, otomotiv ve savunma sanayi uygulamalarında kullanılabilecek kalitede karbon elyafının maliyeti yüksektir.
- Lamine edilmiş kompozitlerin özellikleri her zaman tekrarlanabilir değildir. Kalınlık yönünde düşük dayanıklılık ve katlar arası düşük eğme dayanıklılık özelliği bulunmaktadır
- Malzemenin kalitesi üretim yöntemlerinin kalitesine bağlıdır, standartlaşmış bir kalite yoktur.
- Kompozitler kırılgan (gevrek) malzeme olmalarından dolayı kolaylıkla zarar görürler, onarımları yeni problemler yaratabilir.
- Kullanılan malzemelerin sınırlı raf ömürleri vardır. Bazı tür kompozitlerin soğutularak saklanmaları gerekmektedir.
- Kompozitlerin geri dönüşümü ve onarılması zordur.
- Kompozitler onarılmadan önce çok iyi olarak temizlenmeli ve kurutulmalıdır. (Onat, 2015).

3.1.5. Kompozit Malzemelerin Kullanım Alanları

Kompozit malzemelerin kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir.

- Makinelerde olan dişli çarklar
- Makina takımları
- Gövde elemanları

- Tesisatlıboruları
- Depo olarak kullanılan alanlar
- Yapı sektöründe yaygın kullanımı
- Deniz sektör imalatında
- Elektrikli kontak cihazları
- Tesisatlardaki nükleer reaktör
- Sürünme dayanıklı cihazlar
- Her türlü Batarya teknolojileri
- Isıtma cihazlar
- Havacılık, otomotiv ve savunma sanayi (Zor, 2018)

3.2.Kompozit Üretim Yöntemleri

Kompozit malzemeler; genel itibariyle kendini meydana getiren malzemelerin en iyi özelliklerini yansıtacak şekilde birçimlendirilir. Bu nedenle hafiflik ve yüksek mukavemet istenen yerlerde metaller yerine kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Çok sayıda kompozit üretim yöntemi mevcuttur. Örnek olarak metal matris üretim yöntemleri katı faz, sıvı faz ve diğer yöntemler olarak sınıflandırılabilir.

a) Katı Faz Üretim Yöntemleri

- Toz metalurjisi üretim yöntemi
- Difüzyon bağı tekniği

b) Sıvı Faz Üretim Yöntemleri

- Sıvı Metal İnfiltrasyon
- Sıkıştırma Döküm
- Sıvı Metal Karıştırma
- Plazma Püskürtme

c) Diğer Yöntemler

- Rheocasting ve compocasting döküm yöntemleri
- Vidalı ekstrüzyon yöntemi
- In-Situ yöntemi

- XD yöntemi (Onat, 2015).

3.3. Polimer Matris Kompozitler

Polimer malzemeler, son 25-30 yıl içerisinde önemli gelişmeler göstererek günlük yaşantımızda ve endüstrinin hemen her dalında kullanılan malzemeler haline gelmiştir. Polimerler yapıları gereği çelik ve diğer konvansiyonel malzemelerden farklı olup onların avantajlı yanları ön plana çıkartılarak kullanım alanları giderek genişlemektedir. Polimer ve polimer kompozitlerin başlıca hedefleri en az çelik kadar sağlam ve olabildiğince hafif ekonomik malzeme üretimidir. Günümüzde ileri mühendislik malzemelerinin kullanımında hiç şüphesiz otomotiv sektörü en büyük payı almaktadır. Otomotivde çeşitli polimer malzemelerin kullanımı %10 civarında ise de tampon gibi bazı özel uygulamalarda polimer kompozitlerin kullanımı artmaktadır (Akdoğan Eker, 2008).

3.3.1. Matrisler

Kompozit malzeme üretiminde polimer matris kompozitin yanında metal ve seramik de kullanılabilir. Ancak metal ve seramik matrisleri yaygın olarak kullanılsa da, kompozit üretiminde çoğunlukla polimer matris kullanılmaktadır. Matris genel olarak polimer malzemeler olması nedeni ile bu tür kompozitlere takviyeli polimer adı verilmiştir. Genel olarak metal matrisler çoğu yerde kullanılsa da hafifliğin ve mukavemetin gerektiği yerlerde maliyeti yüksek ve kullanımları zordur. Diğer taraftan seramik matrisler genel olarak basma dayanımı yüksek ancak kırılgan ve tokluğu düşüktür. Daha çok basmanın ve yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalarda tercih edilmektedir. Bunların dışında karbon esaslı kompozit üretmek hem maliyetli ve hem zordur. Diğer matris seçenekler arasında en çok kullanılan polimer matrisler arasında en çok tercih edilen termoset yapısı olan polyester ve epoksidir.

Matrisler iyi yapışma, çevre ve hava şartlarına karşı yüksek dayanıma sahiptir. Kompozit de matrisin sağladığı mekanik özellikler yüksek sertlik ve dayanıklılık değerleridir. İyi bir kompozit malzeme sert olmalıdır, ancak gevrek bir kompozitin gösterdiği özelliklerden dolayı performans değerleri azalmamalıdır. Bu özelliklere sahip polimer esaslı matrisler termoset ve termoplastik matrisler olarak iki türde bulunmaktadır(Onat, 2015).

Plastik matris malzemeleri üç guruba ayrılır:

- Termosetler
- Termoplastikler
- Elastomerler(Zor, 2018)

3.3.1.1. Termoset Matrisler

Termosetler matris olarak en çok kullanılan malzemelerdendir. Termosetler genel olarak sıvı şeklinde bulunurlar, ısı uygulanarak, kimyasal tepkimelerle sert malzemeye dönüşür ve sağlam olur. Termosetlerin polimerizasyon zamanı termoplastik malzemelerle karşılaştırıldığında farklı olarak geri dönüşü olmayan bir süreçtir. Yüksek sıcaklıklarda bile sert olup yumuşamazlar. Genel olarak termoset matris bir sertleşme olmaması için dondurulmuş halde depolanmalıdır. Sonra dondurucudan çıkarılıp oda sıcaklığında bir müddet (1-4 hafta arası) bekletildiğinde sertleşip ve özelliklerini kaybederek biçim verilmesi zorlaşır. Termoset özelliklerinden birisi de kimyasal etkiler altında çözülmez ve her türlü hava şartlarında dahi iyi ve uzun ömürlü olmaktadır. Aşağıda kompozitler de en yaygın olan matrisler ve özellikleri belirtmiştir:

1) Polyester: Günümüzde özellikle denizcilik ve inşaat sektöründe en çok kullanılan reçinedir. Genel olarak kompozitler de iki tür polyester reçine kullanılır:

- Ortoftalik: maliyeti daha azdır
- İsoftalik: iyi özellikler ve suya daha çok dayanaklı

Kompozitler de, polyester reçinelerini polimerizasyon zamanının tamamlaması için katalizör ve hızlandırıcı olarak ek maddeler kullanılır. Reçinelerin bazı avantaj ve dezavantajları aşağıda verilmektedir:

- Kullanımı çok kolay
- Maliyeti çok düşük ve ekonomik
- Sertleşme sırasında yüksek oranda çekme
- Zehirli sitiren gazlarının yayılması
- Mekanik özelliklerin orta seviyede olması
- Raf ömrünün az olması

2) Epoksiler:

- Hava sektörü, spor, ulaşım, askeri ve deniz araçları elemanları gibi geniş alanda kullanılabilir.
- Mekanik özelliklerinin iyi olması
- Su içeren ortamlarda iyi olması
- Isı dayanımı iyidir
- Sertleşmede oluşan düşük oranda çekme
- Pahalı olması
- Cilde zararlı olması
- Karışımda doğru karışması önemli

3) Vinil ester:

- Yüksek çevresel/kimyasal dayanım
- Daha iyi mekanik özellikler
- Maliyeti Polyesterden daha yüksek olması
- Sertleşmede oluşan yüksek oranda çekme

4) Fenolikler:

- Yanmaya karşı dayanıklı
- Buharlaşma sebebinden dolayı gözenek oluşması ve yüzey kalitesinin azalmasına neden olur.

- Hava sanayi, denizcilik ve demir yol kullanımı yaygındır
- Daha ucuzdur
- Islak durumunda zararlı
- Gevrek olması
- Yüzey kalitesinin iyi olmaması

5) Silikon:

- Yanmaya karşı dayanıklı
- Yüksek sıcaklıklar da ürün özelliklerinin değişmemesi
- Kürleme yapılması için yüksek sıcaklık gereklidir

6) Poliamidler: Poliamid elyafının günümüzdeki adı naylon olarak bilinmektedir. Poliamid; kimyasal elyafları üretilmesinde ilk başta gelen, çok kullanılan bir elyaftır. Poliamid, polyester karşısında dayanıklılık açısından daha iyi olması polyester ve diğer kimyasal elyafları üretim çalışmaları içinde ön planda

olmasını sağlamıştır. Şimdiye kadar en çok kullanılan poliamid elyafları, poliamid 6 ve poliamid 6.6' dır. Çoğunlukla tüm poliamid elyaflarına naylon denilmesinin yanı sıra, aslında naylon terimi poliamid 6.6 elyafı için seçilmiştir.

7) Poliüretan: İzosiyonat ve hidroksil grupları arasındaki tepkime ürününü tekrarlar şeklinde kapsayan polimer poliüretan olarak adlandırılır. Poliüretan köpükler daha çok ısı ve ses izolasyon maddesi olarak kullanılmaktadır. Poliüretan köpükler zayıf yapıya sahip uçak kanatlarında kullanılır. Sert poliüretan köpükler ince yapıya sahip uçak kanatlarının içine konur. Poliüretan köpük sert şeklinin ilk yapımı 1947 yılında, esnek poliüretan köpüğün ilk yapımı 1954 yılında yapılmıştır. 1960 yıllarında ise otomobil sektöründe yarı sert poliüretan köpükler üretilerek makul bir şekilde yaygın hale gelen ve sanayide çok kullanılan hammaddenin günümüzde yaklaşık 11 bin türü üretilmektedir.

3.3.1.2. Termoplastik Matrisler

Termoplastik polimerlerinin çeşitlerinin çok fazla olmasına rağmen matris olarak kullanılan polimerler sınırlıdır. Termoplastikler düşük sıcaklıklarda sert halde bulunurlar ısıtıldıklarında yumuşarlar. Termosetlere göre matris olarak kullanımları daha az olmakla birlikte üstün kırılma tokluğu, hammaddenin raf ömrünün uzun olması, geri dönüşüm kapasitesi ve sertleşme prosesi için organik çözücülere ihtiyaç duyulmamasından dolayı güvenli çalışma ortamı sağlaması gibi avantajları bulunmaktadır. Bunun yanı sıra şekil verilen termoplastik parça işlem sonrası ısıtılarak yeniden şekillendirilebilir. Oda sıcaklığında katı halde bulunan termoplastik soğutucu içinde bekletilmeden depolanabilir. Termoplastikler yüksek sertlik ve çarpma dayanımı özelliğine de sahiptirler.

Tablo 3.1. Belli başlı termoplastik reçineleri ve işlem sıcaklıkları(Onat, 2015)

Malzeme	Erime sıcaklık aralığı (°C)	Maksimum işlem sıcaklığı (°C)
PP	160 - 190	110
PA	220 - 270	170
PES- Poli eter sülfan	-	180
PEI- Polieterimid	-	170
PAI- Poliamid imide	-	230
PPS- Polfenilen sülfid	290 - 340	240
PEEK- Polieter eter keton	350 - 390	250

Kompozit malzemelerde termoplastiklerin matris olarak esas olarak seçilme nedeni üretiminin zor olması yanında daha pahalı olmasıdır. Normal hava şartlarında

işlem kalitesi düşük olup ve üretim aşamasında fazla zaman kaybına yol açar. Termoplastiklerin bazılarını farklı şekillere dönüştürebilmek için farklı çözücülere gerek duyulur.

Termoplastiklerin ham maddesi termosetlerle kıyaslandığında maliyeti daha yüksektir. Çoğu zaman sıcaklıkları 60°C ile 245°C arasında değişebilen termoplastik reçine türleri mevcuttur. İlk olarak amorf yapılı reçinelerden polietersülfan (PES) ve polietirimid (PEI) matris olarak kullanılmıştır.

Zamanla gelişen bu ihtiyaçlardan sonra polietereketon (PEEK) ve polifenilen sulfit (PPS) gibi yarı-kristal yapılı plastik malzemeler geliştirilmiştir. Aynı zamanda kısıtlı oranlarda poliamidimid (PAI) ve polimid gibi plastiklerde kullanılmaya başlanmıştır. Genel olarak yoğun çalışmalar ise PA, PBT/PET ve PP gibi düşük sıcaklıklarda kullanılan polimerlerin üzerine yapılmıştır. Bu polimerler den başka ABS, SAN, SMA (stiren malik anhidrit), PSU (polisülfan), PPE (polifenilen eter) matris olarak yaygın kullanılır. Malzemelerin çekme ve eğme dayanımının artması için termoplastik reçine ile kullanılır. Otomotiv sanayisinde genel olarak kullanılan termoplastikler uçak sektöründe de iyi performanslı malzeme çözümlerinde kullanılmaktadırlar. Çoğu zaman enjeksiyon ve ekstrüzyon kalıplama yolu ile üretilen termoplastiklerin üretiminde GMT (cam mat takviyeli termoplastikler) olarak ta üretilmektedir. Soğuk plakaların preslenebilmesi ve geri dönüşüm sürecine uygunluğundan dolayı özellikle otomotiv sektöründe bu yöntemle hazırlanan takviyeli termoplastikler tercih edilmektedir(Onat, 2015).

3.3.1.3. Elastomerler

Elastomerler, termosetler gibi çapraz bağlı olan uzun zincir moleküllerinden oluşur. Küçük kuvvetler etkisinde çok büyük elastik deformasyonlar meydana gelir. Bazılarında %500 civarında elastik şekil değişikliği meydana gelebilir. En önemlileri kauçuk olup iki kategoride incelenebilir:

- Doğal kauçuk : Belirli bitkiler den elde edilir.
- Sentetik kauçuk: Termoset ve termoplastik polimerlerde kullanılırlar ve benzer polimerizasyon işlemleriyle üretilirler(Zor, 2018)

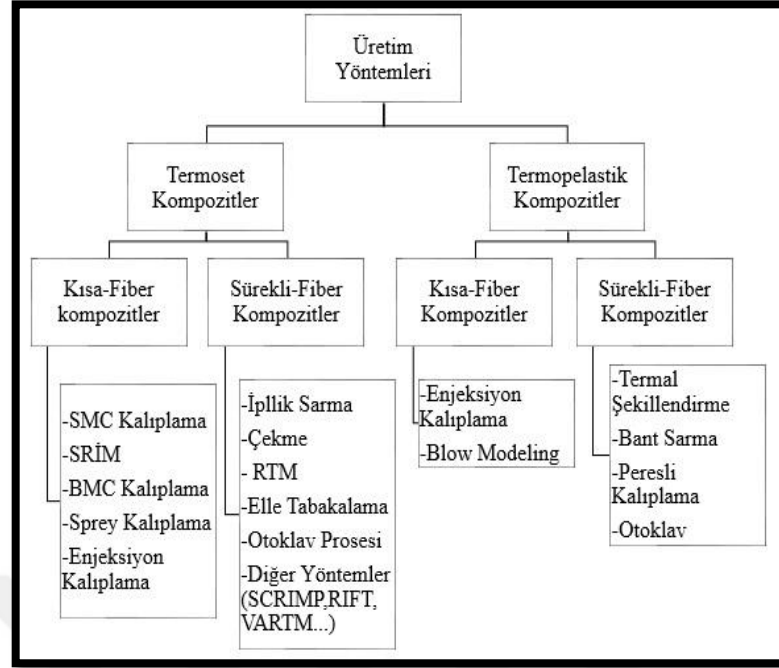
3.3.2. Polimer Matris Kompozitlerin Kullanım Alanları

Bazı kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir

- Poşetler
- Paketleme ürünleri
- Tavalar
- Diş fırçaları
- Kablolar
- Araba tekerlekleri
- Su Şişeleri
- Kıyafetler
- İzolasyon malzemeleri
- Kurşun geçirmez malzemeler
- Ayakkabılar
- Pencereler
- Yapıştırıcılar
- Kalem
- Balonlar
- Sakızlar
- Gözlükler
- Telefonlar
- Bilgisayarlar
- Şemsiyeler (Anonim, 2018)

3.3.3. Polimer Matris Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

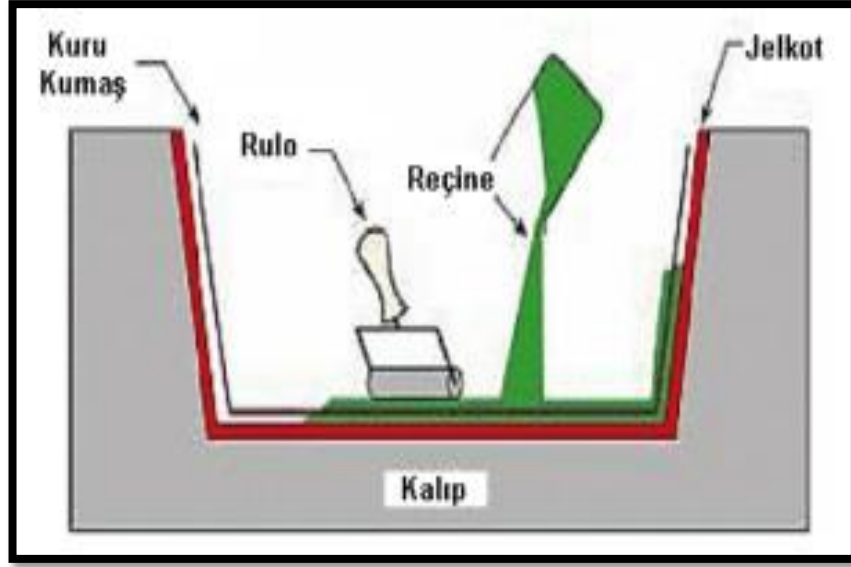
Seçilecek üretim yöntemi takviye malzemesine (elyaf), matris malzemeye (reçine), parça şekline, istenen mekanik ve fiziksel özelliklere bağlı olarak değişim gösterir. Bir parçayı üretmek için genel olarak; ham madde, kalıp, ısı ve basınç ihtiyacı vardır. Polimer matris kompozitlerin en yaygın üretim yöntemleri yöntemleri Şekil 3.3’de verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere termoset ve termoplastik kompozitlerde fiberlerin yapısına göre üretim metotları çeşitlilik göstermektedir.



Şekil 3.3. Plastik matrix kompozit üretim yöntemleri (Ataş, 2018)

3.3.3.1. Elle Yatırma Yöntemi

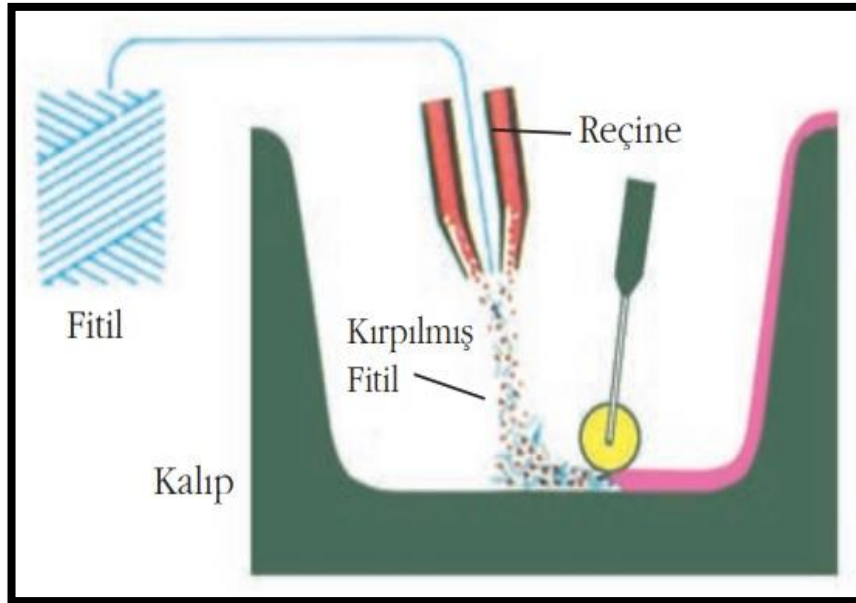
El yatırma yöntemi düşük üretim adetlerinde yaygın kullanımı olan, ilk zamanlardan beri endüstride sürekli gelişime açık olan ve üzerinde çalışılan üretim yöntemlerinden olmuştur. Bu yöntem bir kalıba elle yerleştirilen elyaflar/kumaşlara bir rulo veya fırça ile reçine emdirilmesi sonucunda kalıbın şeklinin verilmesi işlemidir (Şekil 3.4). Parçanın şekli kalıbın şekli tarafından tayin edilir ve kalıp yüzeyi tipik olarak parçanın dış yüzeyiyle temas halindedir. Kullanılacak kalıp düz bir levha olabileceği gibi sonsuz kenarlardan ve eğrilerden de oluşabilir. İlk olarak kalıp ayırıcı cam lifli parçanın kalıba yapışmasını engellemek için uygulanır. Sonra renklendirilmiş bir reçine olan jel kot yani yüzey kaplama reçinesi parçaya renk vermek için kalıba uygulanır. Daha sonra cam lifi ve polyester reçine, hızlandırıcı tabakalar halinde uygulanır ve bu tabakalar reçineyi homojen şekilde yaymak ve hava ceplerini yok etmek için merdanelerle preslenir. Çok katmanlı cam lifi ve reçine istenen kalınlık elde edilinceye kadar yapılır. Reçineler kumaşlara kat kat sürüldüğü gibi kumaşın özelliklerine bağlı olarak çok katmana aynı anda da reçine sürülebilir. Daha sonra reçine emdirilmiş kumaşlar oda sıcaklığı ve atmosferik basınç altında veya farklı sıcaklık ve basınçlar altında kurumaya bırakılır. Kuruma işlemi tamamlanan parçalar kalıptan ayrılarak kesme, çapak alma ve boyama gibi işlemler sonrasında kullanıma hazır hale gelirler.



Şekil 3.4. El yatırma yönteminin üretimi (Durgun ve Arge, 2014)

3.3.3.2. Püskürtme Yöntemi

Şekil 3.5’te verilen püskürtme yöntemi elle yatırma yönteminin makineleşmiş halidir. Daha fazla ürün elde etmek için kullanılır. Bir püskürtme tabancası ile kırılmış elyaf ve reçine karışımı kalıba püskürtülerek kalıbın şeklini alması sağlanır. Püskürtme işlemi yüzeye dik olarak yapılmalı ve böylece malzeme israfı önlenmelidir. Püskürtme sonrası reçine içindeki havayı çıkarmak ve yüzeyi düzgünleştirmek amacıyla rulo lama uygulanır. Oto kaportası, kayık, küvet, yüzme havuzlarının iç yüzeyi bu yöntemle kaplanır.

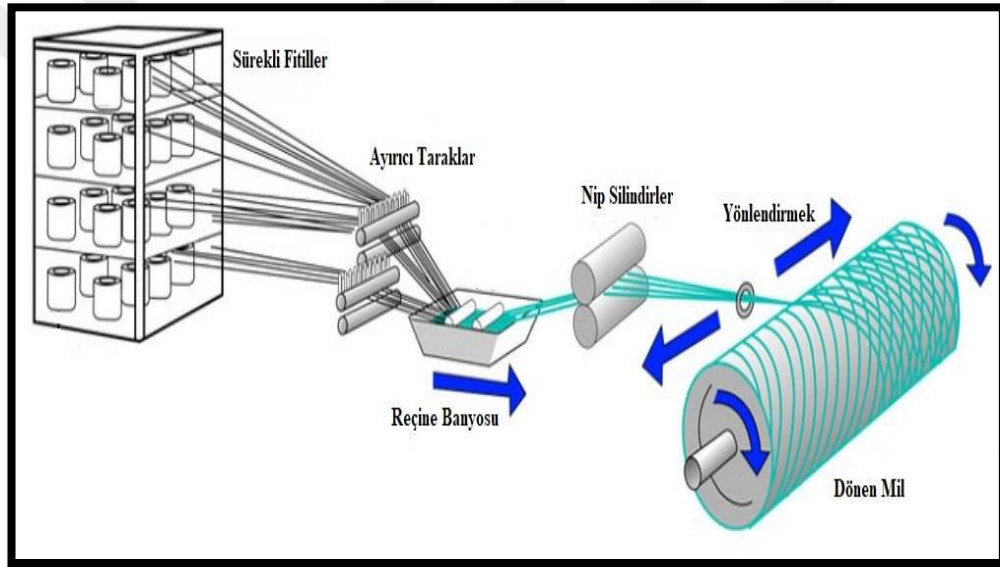


Şekil 3.5. Püskürtme yöntemi (Ateş Kut, 2005)

3.3.3.3. İplik Sarma (Filament Winding)

Şekil 3.6’da verilen iplik sarma yöntemi, genellikle boru ve tank gibi içi boş parçaların üretiminde kullanılır. Yöntemin işlem basamakları kısaca şu şekildedir:

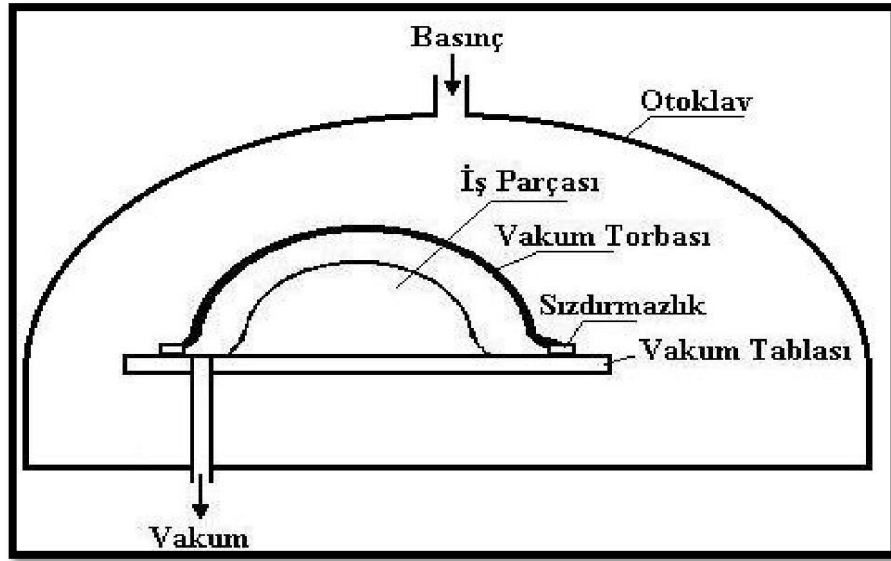
- Bobinlere sınırlı olan fiberler bir reçine banyosundan geçer
- Reçine emmiş olan fiberler hareketli bir mekanizma ile belli bir hızda eksenini etrafında dönen minderle istenen açıda sarılır
- İstenen kalınlığa veya katman sayısına ulaşıldıktan sonra işlem tamamlanmış olur.
- Kurutma işlemi oda sıcaklığında ve bir fırında gerçekleştirilir.



Şekil 3.6. İplik Sarma(Anonim, 2018b)

3.3.3.4. Otoklav Yöntemi

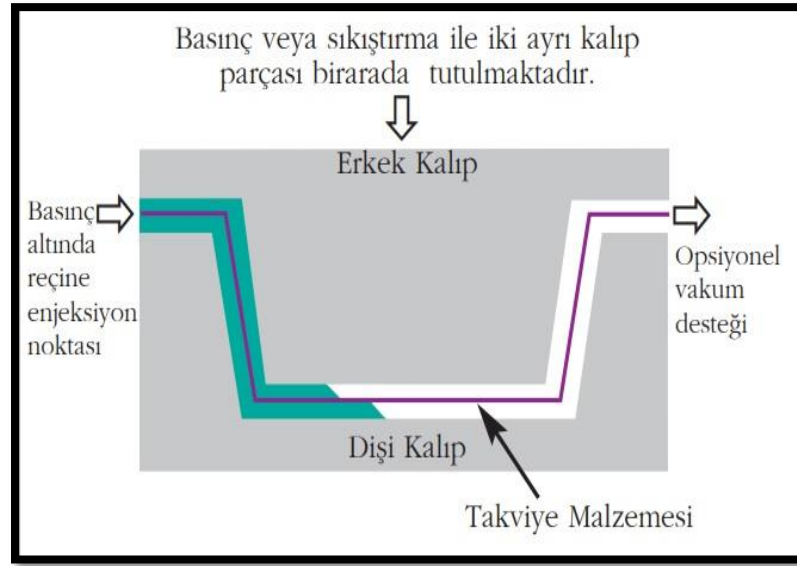
Şekil 3.7’de verilen otoklav yöntemi, ısı ve emişin kontrol edilebildiği basınçlı bir kaptır. Vakum bagging yöntemi ile benzerdir. Fırın yerine bir otoklav kullanılır. Böylece özel amaçlar için yüksek kalitede kompozit üretebilmek için kür şartları tam olarak kontrol edilebilir. Bu yöntem diğerlerine oranla daha uzun sürede uygulanır ve daha pahalıdır(Ayşegül Akdoğan, 2008).



Şekil 3.7. Otoklav yöntemi (Akdoğan, 2008)

3.3.3.5. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) / Reçine Enjeksiyonu

RTM üretim yönteminde iki parça kalıp kullanılması gerekir. Bu yöntem daha hızlı ve uzun ömürlüdür. Şekil 3.8’de verilen RTM yönteminde çoğu zaman jel kotlu ve kotsuz her iki alan da saf ve iyi olması gereken kompozitler de kullanılır. Bu yöntemde elyaf malzemesi kuru olarak kumaş veya keçe karışımından oluşan malzeme kullanılır. Elyaf malzemesi olarak kullanılan madde tüm kalıp boşluğunda yerleştirilir ve sonra kalıp kapatılır. Takviye elemanın matris içinde kalıpta sapmasını önlemek için geç çözünen reçinelerle kaplanır. Reçine basınç ile kalıbın içine dökülür. İşlem enjeksiyonu soğuk, ılık veya 80°C'ye kadar ısıtılmış kaplarda uygulanabilir. Vakum kullanılarak içerideki hava dışarı çıkarılır ve reçinenin elyaf içine işlemesi sağlanır. Bu yöntem ile karmaşık kompozit parçalar elde edilir. Bazı uçaklar parçaları bu yöntem ile üretilir.



Şekil 3.8. Reçine transfer kalıplama rtm / reçine enjeksiyonu (Onat, 2015).

3.3.3.6. Vakum Destekli Reçine İnfüzyon Prosesleri

Literatürde vakum ortamında reçine füzyonu mantığına dayanan ve farklı isimler ile adlandırılan çeşitli yöntemler vardır. Aralarında küçük birtakım farklılıklar olmakla birlikte temel de işlem mantığı ve basamakları şu şekildedir:

- Kuru kumaşlar (elyaf) bir kalıp içerisine istiflenir.
- İstiflenmiş kumaşlar (lamine); “Vacuum Bagging” yönteminde olduğu gibi plastik bir vakum filmi ve çift taraflı yapışkan sızdırmazlık macunları kullanılarak dış ortamdan izole edilir.
- Lamine’in üzerine bir ayırıcı film ve reçine dağıtıcı tabaka konur.
- Vakum yardımı ile reçinenin istiflenmiş kuru kumaşlara nüfuz etmesi sağlanır.

Genel olarak; epoksi, polyester ve vinylester reçineler kullanılır. Bilinen klasik elyaflar bu yöntemde kullanılabilir. Birbirlerine önceden dikilmiş elyaf tabakalarının kullanımı durumunda bu yöntemler daha iyi sonuçlar verir. Ayrıca sandviç kompozit üretiminde; bal peteği dışındaki çekirdek malzemelere de uygulanabilirler.

Bu prosesin avantajlar:

- Tek taraflı bir kalıba ihtiyaç vardır.
- Yüksek mukavemetli bir kalıba ihtiyaç yoktur.
- Bu nedenlerle kalıp ve üretim maliyeti RTM ye oranla daha düşüktür.

- Büyük parçalar bu yöntemle üretilebilir.
- Hand Lay-up yönteminde kullanılan kalıplar bu yöntem için modifiye edilerek kullanılabilir.

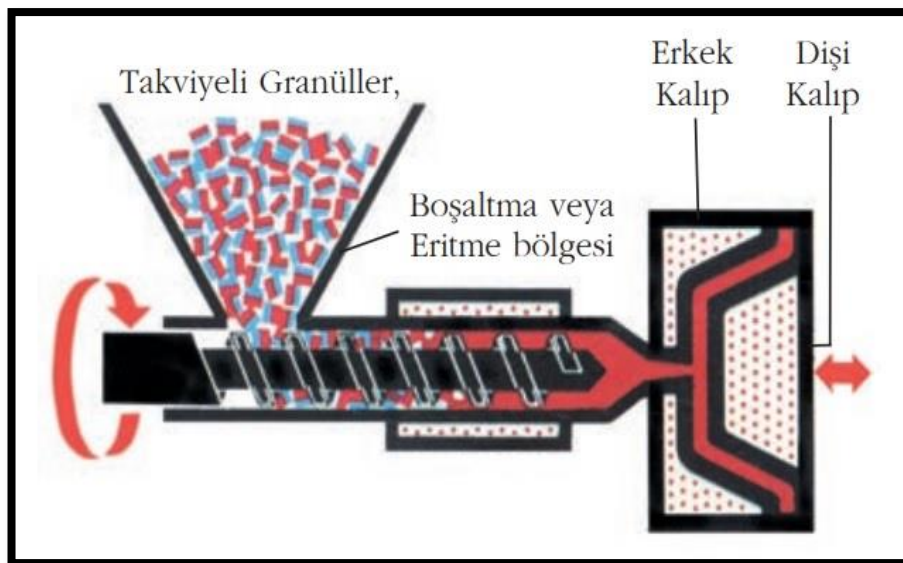
- Çekirdek yapılar bir seferde/adımda üretilebilir.

Bu prosesin dezavantajlar:

- İşlem basamakları kısmen komplekstir.
- Düşük viskoziteye düşük reçine kullanımı mekanik özellikleri olumsuz etkileyebilirler.
- Reçine ile ıslanmamış bölgeler kalabilir; bu da pahalı atık malzeme demektir.

3.3.3.7. Enjeksiyon Kalıplama

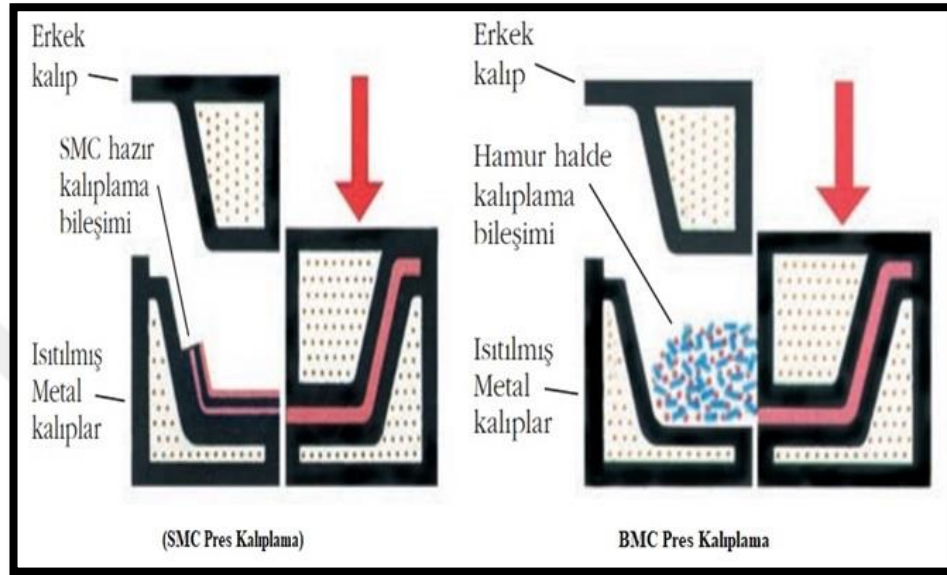
Bu yöntem genel olarak karmaşık şekli olan ve yüksek boyutlu malzemelerin üretimde kullanılan bir yöntemdir. Aynı zamanda büyük hacmi olan malzemeler içinde uygun bir yöntemdir. Bu üretim yönteminden elde edilen ürünler genel olarak takviyesi olmayan termoplastik malzemelerdir. Şekil 3.9’da verilen bu yöntemde ana kuralı termoplastik malzemelere ısıya maruz kaldığında yumuşar ve aksine soğuk bir ortama maruz kaldığında da sertleşirler. Çoğu enjeksiyon kalıplama yönteminde taneli şeklinde olan reçine bacadan sıcak metal silindirin diğer tarafına beslenir. Sonra silindir dönmeye başlar ve reçin içeriye doğru hareket eder. Reçine ısıtılarak akışkan hale getirilir ve kalıp içine boşaltılır.



Şekil 3.9. Enjeksiyon kalıplama (Ateş Kut, 2005)

3.3.3.8. Hazır Kalıplama (Conmpression Molding)

Şekil 3.10’da verilen bu yöntemde hazır kalıp içindekileri cam elyaf, reçine katkı ve dolgu malzemesi oluşturmuş, sıcak pres kullanılarak ürün üretilmektedir. Bu yöntem diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında bu yöntemler karmaşık şekli olan kompozitler üretilabilir ve farklı cidar kalınlıkları elde edilebilir.



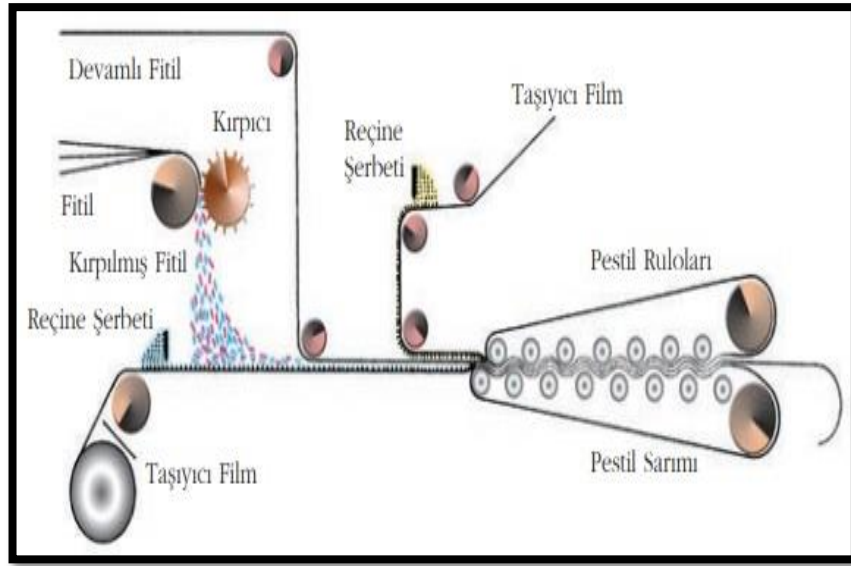
Şekil 3.10. Hazır kalıplama örnekleri (Ateş Kut, 2005)

Bu yöntemin avantajları yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin kalıplama ekipmanlarının buzdolabında saklanması, kalıpların ekonomik açısından pahalı olması ve büyük hacmi olan parçaların maliyeti yüksek ve pahalı pireselere ihtiyaç duyulur.

Bu yöntemde birleşimi oluşturan malzemeye göre ve en çok yaygın olan iki tür kalıplama birleşeni kullanılmaktadır:

- SMC (sheet moulding composites)
- BMC (bulk moulding composites)

SMC: Güçlendirme malzeme olarak kesilmiş elyaf ile dolgu maddeyi önceden hazırlayıp birleştirilmesi ile oluşmuş olan kuru bir malzemedir. Bu yöntemde elyafın ağırlığı 25-50 mm ve kompozit malzemenin ağırlığı % 25-30 arasındadır ve çoğu zaman 3mm kalınlığında üretilir(Şekil 3.11).



Şekil 3.11. SMC hazır kalıplama birleşimi üretimi (Ateş Kut, 2005)

BMC: Elyaf malzemesi olarak kullanılan kesilmiş elyaf ve dolgu malzemesi içeren hamur şeklinde olan birleştirilmesi ile oluşan bir malzemedir.

Bu yöntemin avantajları:

- Fazla tasarım seçenekleri
- Yüzey kalitesinin iyi olması
- Kalıplaması daha kolay
- Malzemenin geri dönüşüm yapılabilmesi
- Montaj yapması kolay
- Ateşe karşı dayanıklı
- Soğuk ortamda kırılman olmaması

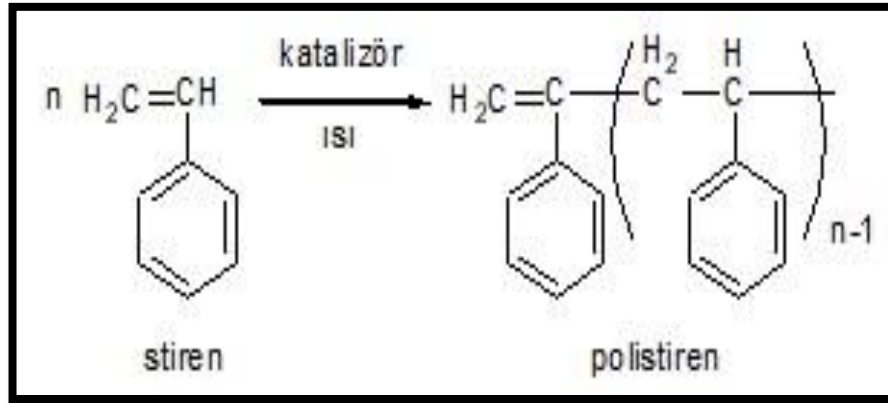
Bu yöntemi incelersek RTM yöntemine benzemektedir. Tek farkı reçine/elyaf karışımının kalıbın dışarısında karıştırılması ve ısıtılarak eritip basınç ile kalıbın içerisine dökülmesidir. Bu yöntem ile az viskozitesine sahip termosetler bu yöntem ile hazırlanabilir ve öbür yöntemler ile kıyaslandığında hızlı yapılmaktadır. Uçak parçaları ve çoğu ürünler bu yöntem ile üretilebilir(Onat, 2015).

3.4. Polistiren

Polistiren bilinen en eski vinil polimerlerinden biridir. İlk olarak Fransız kimyacı M. Berthelot tarafından 1851’de benzen ve etilenin sıcak tüplerden geçirilmesiyle elde edilmiştir. Genel amaçlı ve kristalin homopolimerleri ile, stiren-akrilonitril (SAN), stiren-maleik anhidrit (SMA), stiren-bütadien (SBR) ve stiren-

akrilikler gibi çeşitli kopolimerleri bulunur. Polistiren, monomer haldeki stirenden polimerizasyon ile üretilen bir polimer olup petrolden elde edilir. Plastik endüstrisinde daha çok PS kısaltması ile kullanılır. Oda sıcaklığında, polistiren katı halde bir termoplastiktir, fakat enjeksiyon (akıtma) veya ekstrüzyon (plastığe şekil verme tekniği) yolu ile işlenirken yüksek sıcaklıklarda eriyik hale getirilir. Daha sonra soğutulularak tekrar katılaşması sağlanır. Sıcaklığın artması polimerizasyonu hızlandırır; örneğin, 150 °C’de polimerizasyon süresi sadece birkaç saattir. Isının yükseltilmesiyle beraber bir başlatıcı (katalizör) ilave edildiğinde reaksiyonlar daha kısa sürede biter. Yüksek molekül ağırlıklı ve dayanıklı ürün elde etmek, yan reaksiyonları asgariye indirmek için proseslerin çoğu orta derecelerdeki sıcaklıklarda ve bir başlatıcıyla yapılır.

Polimerizasyon koşulları ve kullanılan katalizör sistemlerine bağlı olarak izotaktik, sindiyotaktik ve ataktik yapıları polistiren elde edilir. Ziegler-natta katalizör sistemiyle ile yapılan polimerizasyonda izotaktik polimer yanında bir miktar amorf ürün de elde edilir. Amorf polistirenin miktarı katalizördeki oranının belirli bir seviyenin altına düşmesine paralel olarak artar; reaksiyon, katyonik polimerizasyon mekanizmasıyla ilerler. . Şekil 3.12’de polistirenin oluşum reaksiyonu verilmiştir.



Şekil 3.12. Polistiren üretim şeması (Beşergil, 2008)

Polistiren kolay kırılan, darbe direnci düşük, çözücülere dayanıksız bir polimer olup oldukça sınırlı yerlerde kullanılabilir. Stirenin kopolimerizasyonu ile elde edilen polimerik ürünler ise polistirenin kullanım alanlarını genişletmekte ve bu polimerin bildiğimiz en faydalı maddelerden biri olmasını sağlamaktadır. Polistiren zinciri üzerinde her iki karbon atomu eklenmiş (benzen halkası adı verilen) fenil grubu vardır. Bir uzun zincirli hidrokarbondur. Stiren aromatik monomer, ticari olarak

petrolden üretilmiştir. Polistiren vinil polimer, stiren monomer serbest radikal vinil polimerizasyon tarafından üretilmiştir (Birlsen Beşergil, 2008).

3.4.1. Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri

- Yoğunluğu 1.03-1.06 gr/ml arasında değişir
- Maksimum sıcaklık dayanımı 70°C'dir ve 100°C'un üzerinde yumuşamayan, 185°C civarında akışkan bir sıvı hâline dönüşebilen renksiz, saydam bir termoplastiktir

- Rigit ve köpük olabilen, çok yönlü ve amaçlı kullanılan bir polimerdir
- Oldukça sert, kırılğan ve parlaktır
- Nispeten düşük erime noktasına sahip çok pahalı olmayan bir reçinedir
- Polistiren hızlı yanar, kuvvetli gaz kokusu yayar, önemli miktarda kurum üretir

- Asetonlu ortamda hızla kabarır
- Uv ışınlarına iyi direnç gösterir
- İyi darbe ve gerilme direnci vardır
- Düşük fiyat ve işleme kolaylığı vardır
- Asit alkali ve tuzlara karşı da üstün bir direnç gösterir
- Erime sıcaklığı 210 – 250°C 'dir
- Özgül ısısı 1.34 kJ/kg°C 'dir
- Mukavemeti güçlüdür
- Pürüzsüz bir yüzeye sahiptir
- Bakteri oluşumuna karşı dayanıklıdır
- Nem tutma oranı düşüktür
- Isı ile şekillendirilebilir
- Isıyı kendi içinde barındırmaz
- Elektrik yalıtım özelliği üst düzeydedir (Yığıt vd, 2006).

3.4.2. Kullanım Alanları

Polistirenin kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir.

- İzolasyon malzemesi olarak
- İnce cidarlı kaplarda
- Soğutma kulelerinde

- Boru köpük
- Kauçuk
- Çeşitli aletler
- Otomobil parçaları
- Paneller ve elektronik aletlerin plastik aksamalarında yaygın olarak kullanılır
- Tek kullanımlık bardak, tabak, yoğurt kapları, ayran kaplarında sıklıkla kullanılır

• Genetik ve moleküler biyolojinin en temel uygulamalarından biri olan hücre kültürlerinde kullanılan kapların yapısında bulunur

- Reklam sektörü
- Otomotiv
- Ambalaj
- Elektronik sektörü
- Beyaz eşya sektörü
- Gıda sektörü
- Oyuncak(Anonim 2017b).

3.4.3. Polistiren Yanma Özellikleri

Şekil 3.13'te verilen polistrene yönelik yanma davranışları aşağıda verilmiştir.

- Alevle yanar ve alevin çıkarılmasından sonra yanmaya devam eder
- Sarı alevi var
- Siyah duman karbon parçacıkları ile gelir
- Alev içinde damla şeklinde düşer
- Yanma kokusu, doğal gazın kokusu gibidir



Şekil 3.13. Yanan bir polistiren örneği görüntüsü

3.4.4. Polistirenin Çözünen Ve Çözünmeyen Maddeler

Polistirenin çözünen ve çözünmeyen maddeler aşağıda sıralanmıştır:

- Polistirenin çözündüğü maddeler: Benzen, klorlu alifatik hidrokarbonlar, metil etil keton, etil asetat, aseton, metilen klorür, tolüen, kloroform, küklotron, graylene, karbon di sülfür, dimetil falanat doksan, amil asetat, asetilaseton
- Polistirenin çözünmediği maddeler : Asitler, stein, alkol, dietil eter, fenol, doymuş hidrokarbonlar, etanol, geleneksel ve seyreltik alkalilerdir.



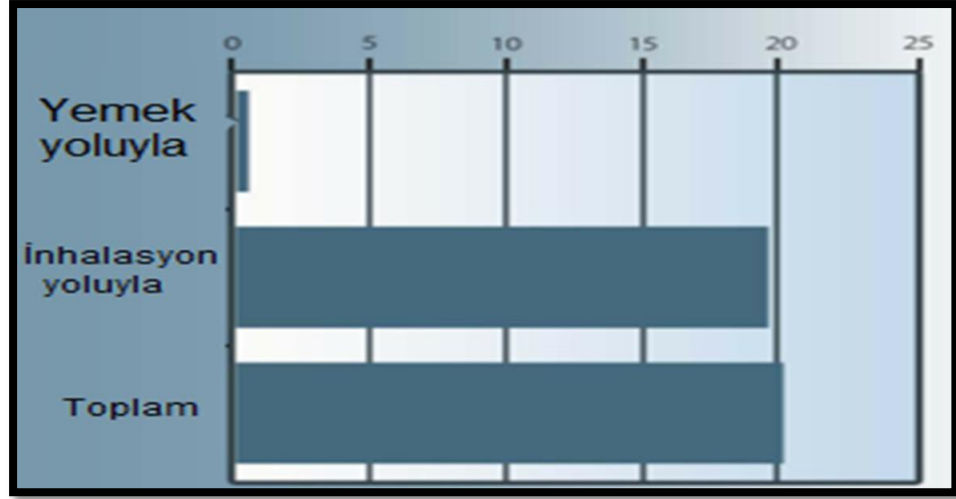
Şekil 3.14. Polistirenin çözünmesine örnek görüntü

3.4.5. Stirenin Sağlıkla İlgisi

- Çeşitli çalışmalar, stiren miktarının, hava ve gıdada mevcut olduğu ölçüde tehlikeli olmadığını göstermiştir.

- 1994 yılında, Kanada Sağlık Bakanlığı, Stiren'in insan sağlığı ve yaşamı için risk oluşturmadığı ve insan yaşamının bağlı olduğu bir toplum için tehlike oluşturmadığı sonucuna vardı.

- 2002 yılında, Harvard tehlike analiz merkezi, stirenin doğal olarak gıdalarda bulunduğunu ve gıdalardaki stiren miktarının insan sağlığı için herhangi bir risk oluşturmadığını bildirmiştir.



Şekil 3.15. Yıllık ortalama stiren adsorpsiyon miktarı (Mg)

3.4.6. Polistiren Sınıflandırılması

Polistiren en genel sınıflandırılması aşağıda sıralanmıştır:

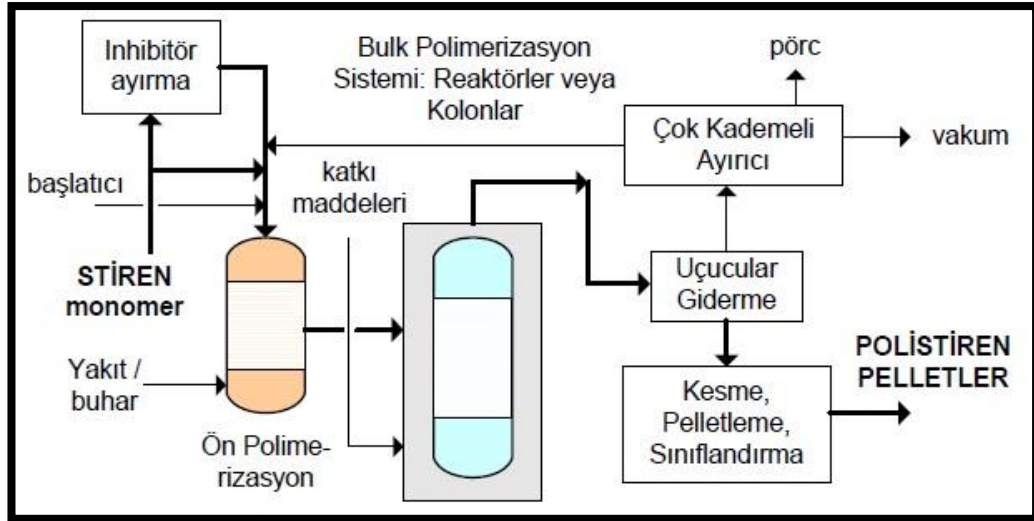
- Genel Amaçlı Polistiren (GPPS):** Sanayide bu polimere kristal denir. Bu malzeme sert, şeffaf, sünek, neme dayanıklılık, kokusuz ve tatsız, elektrik yalıtımı, iyi şekillendirilebilirlik özelliklerinden dolayı sağlık, spor, otomotiv endüstrisi, ev aletleri, elektrik endüstrisi, bilgisayar, fan, tıraş makinesi, tek kullanımlık kapların üretimin de kullanılır.

- Genleşebilir Polistiren(EPS):** Üfleme maddesi (blowing agent) PS'e eklenirse EPS denir. Bu malzeme hafif ve beyaz olup, pentan gazı içerir ve diğer isimleri polyfoam ve styrofoam dır. Bazı özellikleri ise; ateşe dayanıklıdır, suya ve neme karşı mükemmel direnç gösterir, ses ve ısıya yalıtımdır. Kullanım alanlarından yapı sektöründe, panellerin yapımında, soğuk depolama, ses ve duvar yalıtımı, hafif yapıların, konstrüksiyonu da kullanılır.

3.4.7. Polistiren Üretim Yöntemi

Stiren oluşturan malzeme yaklaşık %80 oranında benzen ve %20 oranında etilenden oluşmuştur. Son zamanlarda stiren üretmek için farklı yöntemler vardır ama en yaygın olanı etilbenzen dehidrojenasyonu yöntemidir. Yani son aşamada ürün olarak benzen ve tolüen oluşmuş olur. Polistiren üretiminde en yaygın uygulaması olan proses çok ekonomik olan sürekli bulk (kütle) polimerizasyonudur. Bu prosesle yüksek-darbe polistiren, stiren-akrilonitril reçineler, genel amaçlı (kristal dereceli) polistiren ve parlaklık derecesi yüksek, gerilmeye dayanıklı çeşitli polistirenler üretilebilir. Polimerizasyon kesikli veya sürekli yapılabilir. Şekil 3.16'da tipik bir sürekli kütle polimerizasyonu prosesi akım şeması görülmektedir. Stiren, önce bir ön-polimerizasyon reaktöründe, çalışma parametrelerine bağlı olarak kısmen polimerleştirildikten sonra bir başlatıcıyla beraber sürekli karıştırılan reaktöre verilir. Polimerizasyon hızı reaktörlerin (veya kolonlar) sıcaklığı 110-180°C arasında değiştirilerek ayarlanır, proses koşulları ve katkı maddeleri ilave-siyle molekül ağırlığı dağılımı kontrol altında tutulur.

Reaksiyonlar tamamlandıktan sonra sıcaklık 260°C 'nin üstüne çıkarılarak polimer ergitilir ve basınçla küçük delikleri olan bir kalıptan şeritler halinde basılır; bunlar soğutulur, kesilir ve depolamaya verilir. Reaksiyona girmemiş olan stiren monomeri vakumda çekilir ve tekrar sisteme döndürülür.



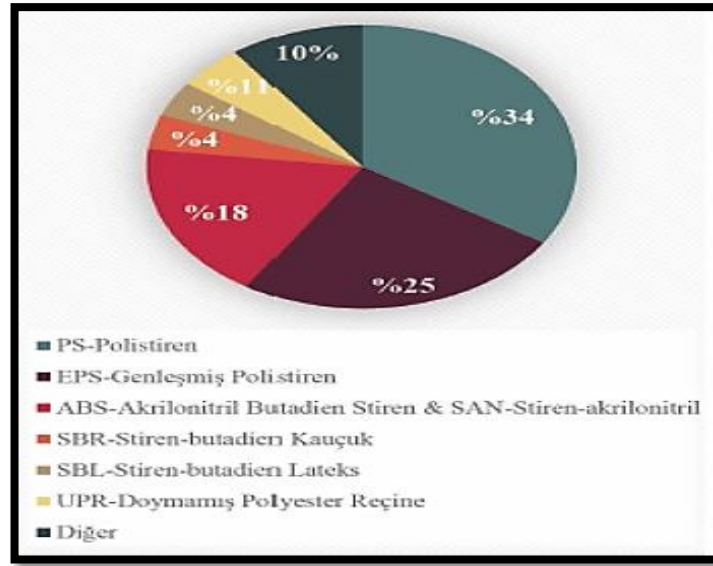
Şekil 3.16. Sürekli bir kütle polimerizasyonu prosesiyle polistiren üretimi (Beşergil, 2008)

Kesikli polimerizasyon yönteminde stiren önce bir otoklavda ön polimerizasyon işlemine sokularak molekül ağırlığı yükseltilir; bu işlem sırasında az miktarlarda yağlayıcı, plastifiyan, polimerizasyon regülatörü ve antioksidan ilavesi

yapılabilir. Ön polimerizasyon akımı bir reaktöre pompalanır, burada stirenin bir kısmı buharlaşarak ayrılır. Reaktördeki karışım ısıtılır ve bir başlatıcı ilave edilerek polimerizasyon reaksiyonları başlatılır. Polimerizasyon tamamlandıktan sonra reaktörden alınan ergimiş haldeki karışım kalıntı stiren, etil benzen ve düşük molekül ağırlıklı polimerlerin uzaklaştırılması için bir ayırıcıdan geçirildikten sonra tekrar ısıtılarak sürekli proseste olduğu gibi işlemlere devam edilir. Batch proseste verim daha yüksektir. Polistiren çok yaygın olmasa da süspansiyon polimerizasyonu yöntemiyle de üretilir. Böyle bir proseste karıştırıcılı ve soğutma ceketli bir reaktör kullanılır; stiren, başlatıcılar ve su (açığa çıkan ısıyı alması için) reaktöre konur ve sürekli karıştırarak %90 stiren dönüşümü sağlanır, sonra santrifüjlenir, polimer tanecikleri ayrılır, kurutulur ve depolanır. Polimerizasyon sırasında reaksiyon ortamına uçucu bir hidrokarbon (pentan, propilen, metilen klorür gibi) ilave edilerek polistiren köpük üretilebilir. Elde edilen polimer buhar veya kaynar su ile ısıtıldığında içerdiği uçucu birleşimin kabarcıklaşmasıyla köpük ürün oluşur (Beşergil, 2016).

3.4.8. Türkiye’deki Stiren Durumu

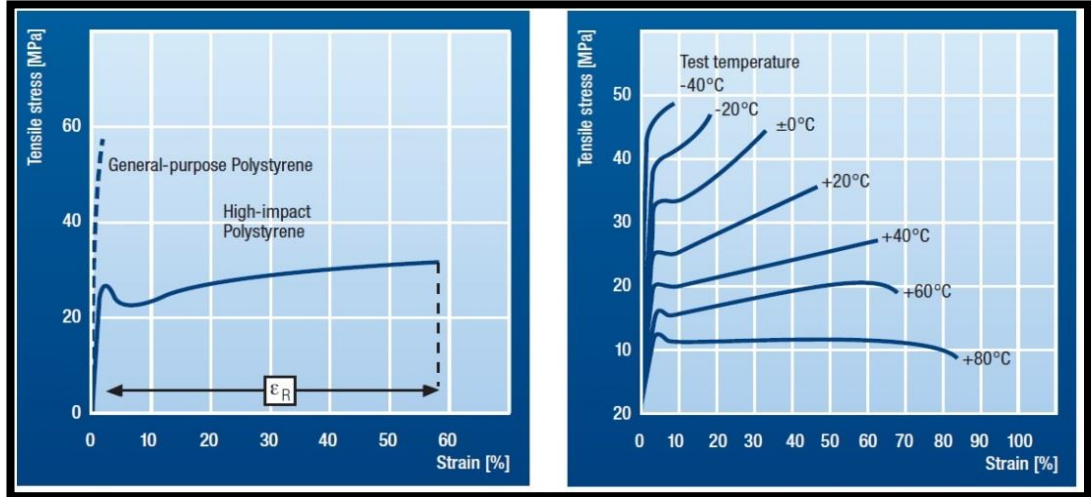
Türkiye’de stiren üretimi yapılamamakta olup yurtiçinde kullanılan ve ihtiyaç duyulan ürünler yurt dışından getirilmektedir. Türkiye’de stiren örneğin doymamış polyester reçineler ve koruyucu kaplamalar gibi sektörlerde kullanılmaktadır. Ülkemizde bu ürün üretilmediği için 2018 yılında ülkeye ithalat yolu ile giren stiren yaklaşık 266.000 ton olarak belirlenmiştir ve en çok ithalat yapılan ülkeler sırasıyla İspanya, Suudi Arabistan ve Hollanda’dır (Anonim, 2020). Şekil 3.17’de dünyada talep gören stiren ve türevleri verilmiş olup en çok talep polistiren ve genleşmiş polistiren talep görmektedir.



Şekil 3.17. 2020 için dünyada talep edilen stiren türevleri (Anonim, 2020)

3.4.9. Polistiren Gerilme-Şekil Değiştirme Özellikleri

Polistirenin kısa süreli tek eksenli çekme gerilmesi altındaki davranışı düşük bir deformasyon oranı, aşağıda gösterilen gerilim-gerinim grafiğinde sıcaklığın etkisini grafiği nasıl etkilediği gösterilmiştir. Polistirenin gerilme-uzama davranışı, sıcaklığa ve deformasyon hızına bağlı olup, sıcaklığın azlamasıyla akma noktası yükselmekte ancak kırılma artmaktadır (Şekil 3.18) (Anonymous, 2010).

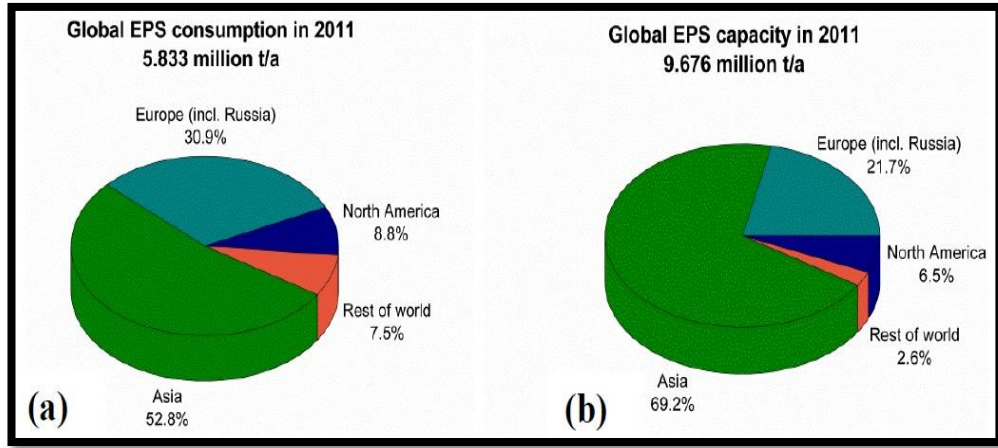


Şekil 3.18. Polistiren gerilme-şekil değiştirme özellikleri (Anonim, 2010)

3.4.10. Polistiren Dünyadaki Tüketimi

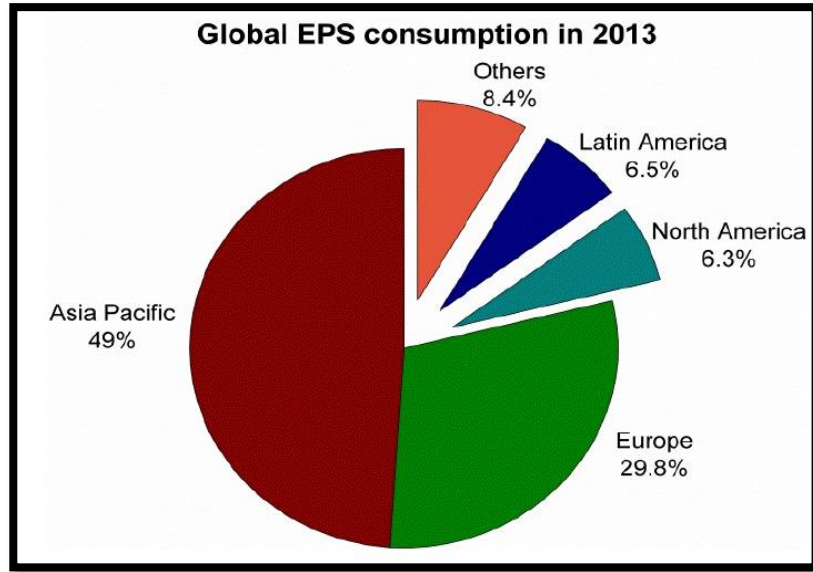
EPS geri dönüşüm oranı yüzdesi dünya çapında istikrarlı bir şekilde büyümeye devam etmekte olup, ABD’de tüketim sonrası EPS geri dönüşümü 1990’da %1,7’den 2012’de %30’a günümüzde çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. EPS geri dönüşüm

teknolojisindeki gelişmeler, işbirliğine dayalı toplama programları ve EPS geri dönüşüm fırsatlarını genişletmeye devam eden yeni pazarlar tarafından desteklenmektedir. Ek olarak, EPS endüstrisi, EPS geri dönüşümünün daha da büyümesini teşvik edecek yeni ve yenilikçi geri dönüşüm teknolojilerinin devam eden gelişimini teşvik etmektedir. Japonya'da, geri dönüşüm oranı 1991'de %12,6'dan 2009'da % 87,5'e yükselmiş, günümüzde bu değerin üstündedir. Güney Kore'de geri dönüşüm oranı da yüksek olup, 1996'da % 33.1'den 2011'de 75.1'e yükselmiştir.



Şekil 3.19. 2011 yılında bölgeye göre (a) küresel eps tüketimi ve (b) kapasiteleri (Lynwood, 2014)

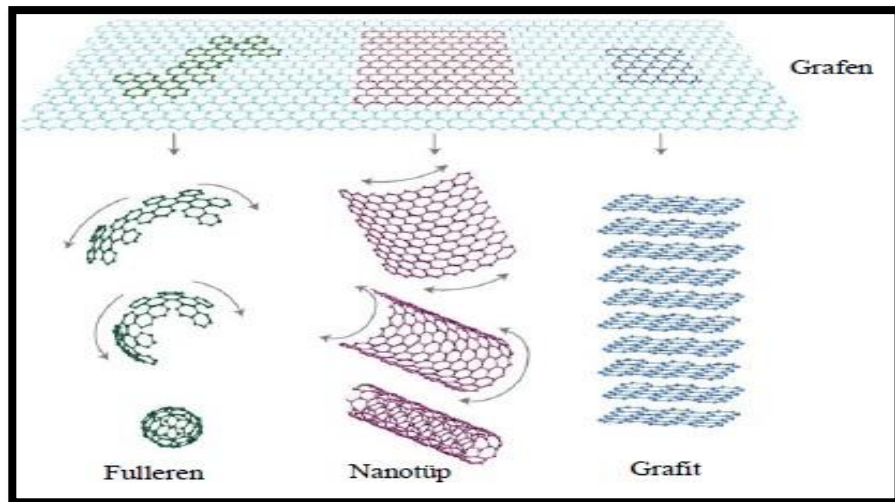
Avustralya'da, ambalajlardan yılda 40.3 ton genleşmiş polistirenin atıldığı tahmin edilmektedir. Avustralya'da yalnızca 2.775 ton EPS toplanmış ve geri dönüştürülmüştür. 2011-2012 için ise geri dönüşüm oranı % 6,9'dur. Brezilya'da geri dönüşüm oranı, temel olarak mekanik geri dönüşüm süreci nedeniyle 2007'de %6,7'den 2009'da %9,3'e yükselmiş, günümüzde bu değerlerin çok daha üstündedir. Şekil 3.20'de 2013 yılına ait EPS tüketimi verilmiş, özellikle asya ve avrupa ülkelerinde yoğun tüketim görülmektedir (Lynwood, 2014).



Şekil 3.20. 2013 yılında bölgelere göre küresel eps tüketimi (Lynwood, 2014)

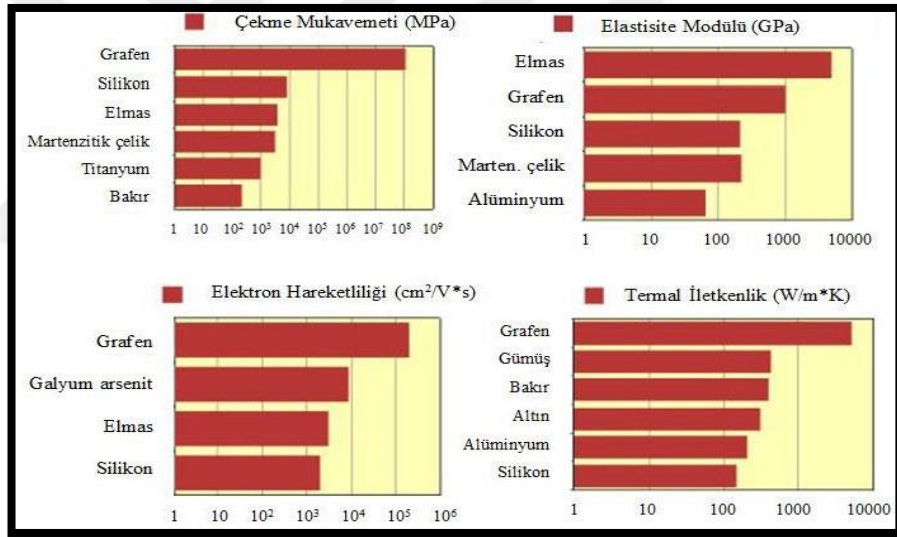
3.5. Grafen Ve Özellikleri

Grafen (Gr) ilk kez 2004 yılında İngiltere'de Andre Geim ve Konstantin Sergeevich Novoselov tarafından ortaya çıkmış ve bilim insanlarına sunulmuştur. Şekil 3.21'de verilen grafenin yapısına bakıldığında karbon elementinin bal peteği örgülü, iki boyutlu sp^2 bağlı karbon atomlarının hegzagonal lattice bir araya gelmesiyle oluşmuş tek tabakalı yapılardır. İki boyutlu grafen malzeme, altı adet karbon halkalarının bir araya gelmesiyle oluşan nanokarbon tabakalarıdır. Grafen, karbon nanotüp ve fullerenden oldukça farklı özelliklere sahip olduklarından dolayı birbirilerinden farklıdır (Şenel, 2015).



Şekil 3.21. Karbon esaslı malzemeler (Randviir, 2014)

Grafen yapısına bakıldığında tek tabakalı olan en ideal grafen yapısıdır. Aynı şekilde birden fazla tabakadan oluşan grafen yapıları aynı oranda önemlidir. İdeal bir tek tabakalı grafenin özelliklerine bakıldığında elastisite modülü 1 TPa, gerçek yoğunluğu 2.25 g/cm³, termal iletkenliği 4840-5300 W/(m°K), kalınlığı 1-2 nm ve tahmin edilen yüzey alanı 2600 m²/gr'dır. Grafenin yapısı incelendiğinde karbon atomlarının iki boyutlu altıgen bir yapıda dizilmiş bu şekli, doğada iki boyutlu tek malzeme örneğini oluşturması aynı zamanda, grafene çok iyi özellikler de kazandırmaktadır. Dijital teknolojide önemli bir noktada bulunan silisyum, grafen ile karşılaştırıldığında, elektronların silisyum içindeki hızlarının, grafen içindeki hızlarına göre 100 kez daha yavaş olduğu tespit edilmiştir. Grafenin özelliklerine bakıldığında grafenin elektrik özellikleri bu muhteşem malzemenin tek iyi özelliği değildir. Grafen bildiğimiz en ince malzemedir ve güçlü karbon bağları, grafeni en güçlü malzeme olarak da bilinmesini sağlamıştır (Adams 2014).

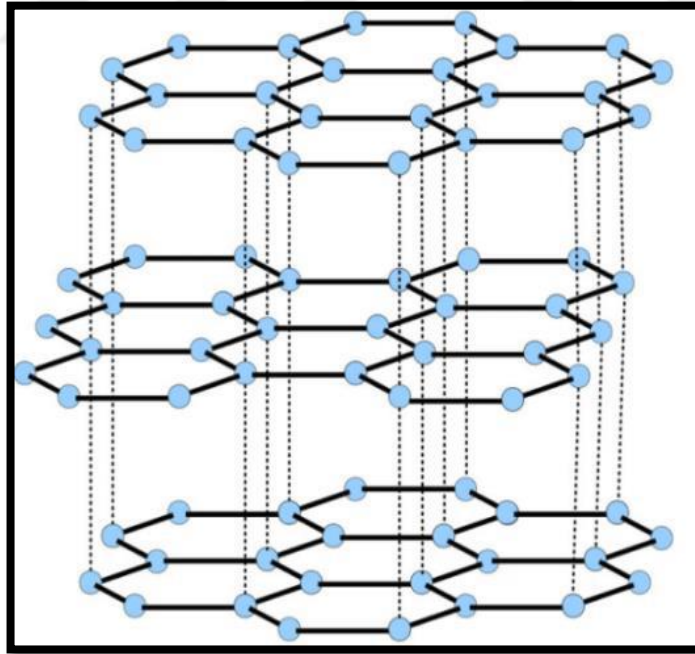


Şekil 3.22. Grafenin özelliklerinin bir dizi diğer malzemelerle karşılaştırılması (Adams, 2014)

Şekil 3.22'ye baktığımızda eğer elastisite modülünü göz önüne alırsak grafen çelikten yaklaşık 100 kat daha fazla elastisite modülüne sahip olup, ısıyı en iyi iletmediği düşünülen elmastan daha iyi ısı iletken olduğu görülmektedir. Grafenin bir başka özelliği esnek olabilme kabiliyeti olup, farklı şekillerde farklı malzemelerin yüzey kaplamasında kullanılabilir. Grafenin yukarıdaki bu olağanüstü özellikleri göz önüne alırsak dünyada ne kadar önemli olduğunu ve bilimin gelişmesinde iyi bir rol oynayacağını bir kez daha görülmektedir. Grafen tıp, biyokimya, telekomünikasyon, enerji depolama, güneş hücreleri, robot yapımı, elektrik ve elektronik sektörü, hava

ve son olarak da otomotiv alanlarda kullanılmaktadır. Grafen malzemenin diğer önemli kullanılan alanlarından biri de süper kapasitörlerdir. Süper kapasitörler, yeniden şarj edilebilir pillere benzer şekilde enerji depolayabilen sistemleridir. Grafenin gelecek de mühim bir rol oynayacağı aşikar olup, organ teknolojisi, biyoteknoloji, kulak, biyoteknoloji göz vb. alanlarda kullanım alanına sahip olacaktır. Grafenin termal özelliklerine bakılırsa bakır gibi yüksek iletkenlikte sahip bir malzemeden daha çok iletken özelliği vardır. Grafen polimerin içine %1 oranında eklenmesinde polimeri iletken hale getirmektedir. Grafenin iyi mukavemet özellikleri olduğundan dolayı en önemli kullanım alanlarından birisi de yüksek mukavemetli kompozit geliştirilmesidir. Grafen malzemesi, magnezyum, titanyum ve alüminyum gibi matris malzemelerine grafen eklenirse uzay ve havacılık, uçak, gemi, hızlı tren, tramvay ve otomotiv gibi alanlarda yeni nesil kompozit üreterek kullanılabilir (Başçı, 2015).

Grafen kristal yapısı sp^2 hibritli bal peteği örgüsünde olup kimyasal açıdan çok reaktif olmayıp kararlı bir malzemedir ve iyi bir iletken özelliklerine sahiptir. Şekil 3.23’de grafen kristal yapısı ve tabakaların şekli gösterilmektedir (Dadev, 2019).



Şekil 3.23. Grafen tabakaları (Dadev, 2019)

Grafen 2004 yılında ilk kez sentezlenmesinden dolayı bu alandaki makale yayınları da 2004 yılından beri yayınlanmaya başlamıştır. Sciencedirect veri tabanı kullanılarak “grafen” yazıldığında bu alandaki yayın sayısının ne kadar çok arttığı

görülmekte olup, grafenin kullanıldığı teknolojiler temel bilimlerin yanında daha çok malzeme bilimi, mühendislik alanlarında enerji, havacılık, savunma gibi sektörlerde yaygın kullanım imkanı vardır.

3.5.1. Grafenin Özellikleri

- Tek-katman, altıgen düzende karbon atomları anlamına gelmektedir
- Grafen bir karbon alotropudur
- Grafen sp^2 bağlı karbon atomlarından oluşmuştur
- Atomları arasında 0.142 nm molekül bağ uzaklığı vardır
- Çelikten 100 ile 300 kat arası daha sağlam olması
- Oda sıcaklığında en iyi iletken olması
- Esnek olması
- En ince ve en hafif malzemedir
- Grafen saydamdır (Şenel, 2015).

3.5.2. Grafenin Kullanım Alanlar

- Bükülebilir telefonlar
- Elektronik kâğıtlar
- Bataryaların ultra hızlı şarj edilmesi
- Hızlı flash hafızalar
- Küçük ve verimli biyosensör cihazlar
- Bataryaların yerini alabilecek süperkapasitörler
- Su geçirmeyen kıyafetler
- Daha sağlam ve hafif uçaklar ve koruma ekipmanları
- Doku yenilenmesinde yardımcı malzeme olarak kullanmak
- Tuzlu suyu, içilebilir suya dönüştürmek
- Doğrudan vücuttaki nöronlara bağlanabilen biyonik cihazlar
- Radyoaktif atıkların daha kolay temizlenebilmesi
- Güçlü ve daha dengeli aletler ve spor ekipmanları üretilmesi
- Enerjinin depolanması ve dağıtımı alanında (Giryan, 2016).

3.5.3. Grafenin Üretim Yöntemleri

Grafen birçok farklı yöntemlerle sentezlenebilir. Bunların öne çıkanları mikromekaniksel olarak grafitin tabakalarının ayrılması (eksfolitasyon), kimyasal

buhar biriktirme yöntemi, grafen oksitin indirgenmesi ve epitaksiyel büyütme olarak sıralanabilir. Bu yöntemlerle ilgili kısa açıklamalar aşağıda verilmiştir:

•**Eksfolatasyon yöntemi:** Grafit, grafen tabakalarının wanderwalls bağları ile birbirine bağlanmış ve bir arada bulunduğu halidir. Dolayısıyla yüksek saflıkta grafit kullanılarak aradaki zayıf bağların, mekanik veya kimyasal enerjiler kullanarak, kırılmasıyla grafen üretilir.

•**Kimyasal buhar biriktirme metodu (CVD):** Grafen üretimi için diğer yöntemlere kıyasla, verimli, uygun, oldukça kaliteli ve tekrarlanabilir bir sentezleme yöntemi olarak kabul edilebilir. Fakat üretim için gerekli olan cihaz ve aletler diğer yöntemlere göre maliyetlidir. Bu yöntem geçiş metalleri üzerine buhar fazındaki karbon atomlarının biriktirilmesi ve ardından ayırıcı bir ajan ile yüzeyden alınması esasına dayanır.

•**Grafen oksitin indirgenmesi:** Grafen oksit, grafit tabakalarının oksitlenmesi ile birbirinden ayrılarak elde edilen tek katlı halidir. Grafenin büyük hacimlerde üretilmesi için önerilen yöntemlerden biri grafitten, çeşitli yöntemler ile elde edilen grafenoksin farklı metotlar kullanarak indirgenmesidir. Bu yöntemin diğer yöntemlere kıyasla iki temel avantajı, ucuz grafit hammadresi kullanılarak daha verimli grafen üretiminin sağlanması ve aynı zamanda üretilen grafitin hidrofilik olması nedeniyle çözeltilerdestabil olarak çözülebilmesidir.

•**Epitaksiyel büyütme:** Grafenin silisyum karbür (SiC) üzerinde büyütülmesine epitaksiyel büyüme denilir. Bu yöntemde büyütme şartlarına uygun bir şekilde SiC alttaşı 1150 ile 2000 derece arasındaki bir sıcaklıkta ısıtılır. Bu işlem sonucu karbon epitaksiyel olarak bir araya gelmeleri ile grafeni oluştururlar. Karbon kaynağı SiC alttaşı olduğundan dolayı oluşan yeni katmanlar, ilk katmanın altında oluşur ve çok katlı grafenler elde edilir. Üretilen grafenin katman sayısı SiC alttaşı kalınlığına bağlıdır. Grafen üretim yöntemleri sadece bu dört yöntem ile sınırlı değil, karbon nanotüplerin aksel açılması ve güncel bir yöntem olarak Arcdis charge Metodu gibi diğer yöntemler ile de grafen üretilir. Bu araştırmada ön planda görülen yöntemler ile ilgili genel açıklamalar özetlenmiştir (K.Yılmaz ve H.Dehghanpour, 2018).

3.6. Aerojel

Aerojel 1960'lardan beri uzay yolculuğunda kullanılan, ancak şu anda tüm endüstrilerde kullanım alanı bulan olağanüstü bir malzeme grubundan bahsetmek

için kullanılan geniş bir terimdir. Aerojel belirli bir kimyasal formüle sahip belirli bir mineral veya malzeme değildir daha ziyade, belirli bir geometrik yapıya sahip tüm malzemeleri kapsamak için kullanılır. Bu yapı, birkaç nanometrelik dallı yapılar arasında yüksek bağlana bilirlige sahip, son derece gözenekli, katı bir köpüktür. Aerojel teknik olarak bir köpük olmasına rağmen, birçok farklı şekil ve formda olabilir. Aerojelin çoğunluğu silikadan oluşur, ancak karbon, demir oksit, organik polimerler, yarı iletken nano yapılar, altın ve bakır da aerojel oluşturabilir. Bununla birlikte, aerojel yapısı içinde çok azı katı malzemedir ve yapının % 99,8'ine kadar havadan başka bir şey yoktur. Bu benzersiz birleşim, aerojele neredeyse hayaletimsi bir görünüm verir; bu nedenle genellikle "donmuş duman" olarak anılır(G.P. Thomas, 2012).



şekil 3.24. Genel aerojel görüntüsü (Anthony, 2013)

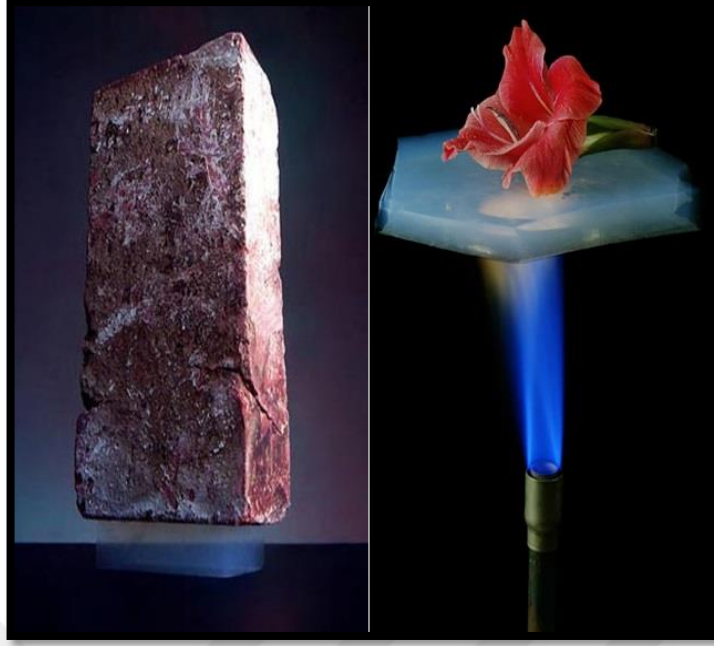
Aerojel, bir jelin içerisindeki sıvı bileşenin hava ile değiştirilmiş olan katı maddelerdir. Duman gibi görüntü verdikleri için donmuş duman veya "mavi duman" diye de adlandırılırlar. İlk olarak Steven Kistler tarafından 1931 yılında silika jel kullanılarak oluşturuldular. Büyük oranda havadan oluşurlar. En önemli özellikleri arasında çok hafif ve çok yalıtkan olmaları gelir. Bu ve diğer özellikleri sebebiyle birçok alanda kullanıma girmişlerdir. İzolasyon sektöründe aerojel ürünleri piyasası 2004'te 25 milyon dolarlık bir büyüklüğe sahipken, bu rakam 2013 yılında 20 katına çıkmış ve 500 milyon dolar seviyesine ulaşmıştır. Çeşitli bilimsel araştırmalarda, tıpta, boyacılık, havacılık, kozmetik ve başka birçok sektörde, ayrıca NASA çalışmalarında da aerojeller kullanılmaktadır (Anonim, 2020).

3.6.1. Aerojel Çeşitleri

- **Silika:** Silika aerogeller en yaygın aerogeller olup, mavi renklidir. Mavi renk, beyaz ışık, ışığın dalga boylarından daha büyük olan aerogelin silika molekülleri ile karşılaştığında ortaya çıkar. Aerojel, daha kısa dalga boylarını, uzun olanlardan daha kolay saçar veya yansıtır. Mavi ve mor ışık en kısa dalga boylarına sahip oldukları için, görünür spektrumun diğer renklerinden daha fazla saçılırlar.
- **Metal oksitler:** Metal oksit aerogeller, metal oksitlerden yapılır ve kimyasal dönüşümler için katalizör olarak kullanılır. Ayrıca patlayıcıların ve karbon nanotüplerin üretiminde de kullanılırlar ve bu aerogeller manyetik olabilir
- **Karbon:** Dumanlı mavi silika aerogellerin aksine, karbon bazlı olanlar siyahtır ve dokunulduğunda odun kömürü gibi hissedilir. Karbon aerogelleri süper kapasitörler, yakıt hücreleri ve tuzdan arındırma sistemleri için kullanılabilir (Anonim, 2010b)

3.6.2. Aerojel Fiziksel Özellikleri

- Düşük ortalama serbest difüzyon yolu
- Yüksek spesifik yüzey alanı
- Düşük ısı iletkenliği
- Düşük ses hızı
- Düşük kırılma indisi
- Düşük dielektirik sabiti
- Yoğunlukları oldukça düşüktür
- %99,8'i havadan oluşmaktadır
- Aerogeller, camla kıyaslandığında 1000 kat daha az yoğunluğa ve gözenekli bir yapıya sahiptir
- Yarı saydamdırlar ve rayleigh saçılımı nedeniyle çeşitli renklerde gözüktürler (G.P. Thomas, 2012)



Şekil 3.25. Aerojel yanma ve ağırlık taşıma şeması (Anonim, 2020c)

3.6.3. Aerojel Kullanım Alanları

- Isı yalıtımı
- Elektronik bileşenler
- Döküm teknolojisi
- Mimari
- Süper hafif kompozitler
- Kozmetik ürünleri
- Eczane
- Spor giyim
- Uzay elbiseleri
- Endüstriyel uygulamalar (aydınlatma, denizaltı boru hatları)
- Ev yapı ve izolasyon(Anonim, 2020b).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Materyal

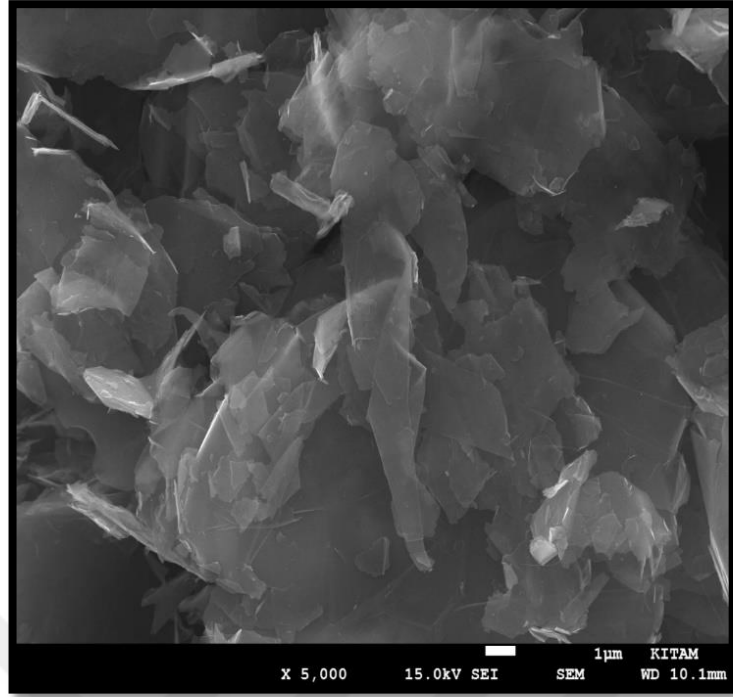
Bu çalışmada, matris malzemesi olarak inşaat atık strafor polistiren (Ps) matris ve takviye malzemeleri olarak grafen nanopartekül ve aerjel kullanılmıştır. Matris ve takviye malzemeleri ile polistiren-grafen (PS-Gr) ve polistiren - aerjel (PS-Aerjel) kompozit malzemeler üretilmiştir. Polistirenin temel mekanik ve termal özellikleri Tablo 4.1.'de verilmektedir.

Tablo 4.1. Polistiren mekanik ve termal özellikleri (Beşergil, 2016)

Özellik	Değer
Kopma Mukavemeti	30 - 40 MPa
Uzama Oranı	1 – 4 %
Sertlik Rockwell	130 HRR
Poisson Oranı	0.325 – 0.33
Cam Değişim Isısı	100 °C
Termal bozulma Sıcaklığı	300 °C
Termal iletkenlik, 0 °C	0,105 W/(m×°K)
Termal iletkenlik, 50 °C	0.116 W/(m×°K)
Termal bozunma sıcaklığı	300 °C
Termal iletkenlik, 0 °C	0,105 W/(m×°K)
Termal iletkenlik, 50 °C	0.116 W/(m×°K)

Karbonun grafit ve elmas gibi gündelik hayattan çok iyi bilinen allotroplarının yanında karbon nanotüp ve fulleren gibi yeni sentezlenen formları da mevcuttur.

Çalışmada kullanılan grafenin SEM görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere grafen yapılar üst üste istiflenmiş ve plaka formunda olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Kullanılan grafenim SEM görüntüsü

Tablo 4.2.'de grafenin genel özellikleri verilmektedir:

Tablo 4.2. Tek Tabakalı Grafenin Özellikleri (Dadev, 2019)

Özellikler	Değer
Hibrit şekli	sp^2
Kristal yapısı	Hegzagonal
Kütlesel yoğunluk (g/cm^3)	~ 0.3
Gerçek yoğunluk (g/cm^3)	2.25
Kalınlık (nm)	1-2
Yüzey alanı (m^2/g)	2600
Termal iletkenliği (W^1/mk)	4840-5300
Elektron hareketliği $cm^2/(V.s)$	$\sim 2,5 \times 10^5$
Elastisite modülü (TPa)	~ 1

Tez çalışmasında takviye malzemesi olarak grafen, Graphene Chemical Industries Company (Grafen Co. Türkiye) firmasından temin edilmiştir. Kullanılan grafenin özellikleri; % 99.5 saflıkta, kalınlığı 5-8 nm, yüzey alanı $120-150 m^2/gr$ 'dır.

Kompozit malzeme üretiminde kullanılan diğer toz takviyesi de silika esaslı aerogel tozudur. Granül formundaki silika esaslı aerogeller yüksek enerjili değirmende öğütme yapılmış ve 43 mikron altına elenmiştir.

Bu çalışmada çözücü sıvı olarak asetilaseton kullanılmıştır. Asetilasetonun bazı özellikleri Tablo 4.3'te fiziksel ve kimyasal özelliklerini verilmiştir:

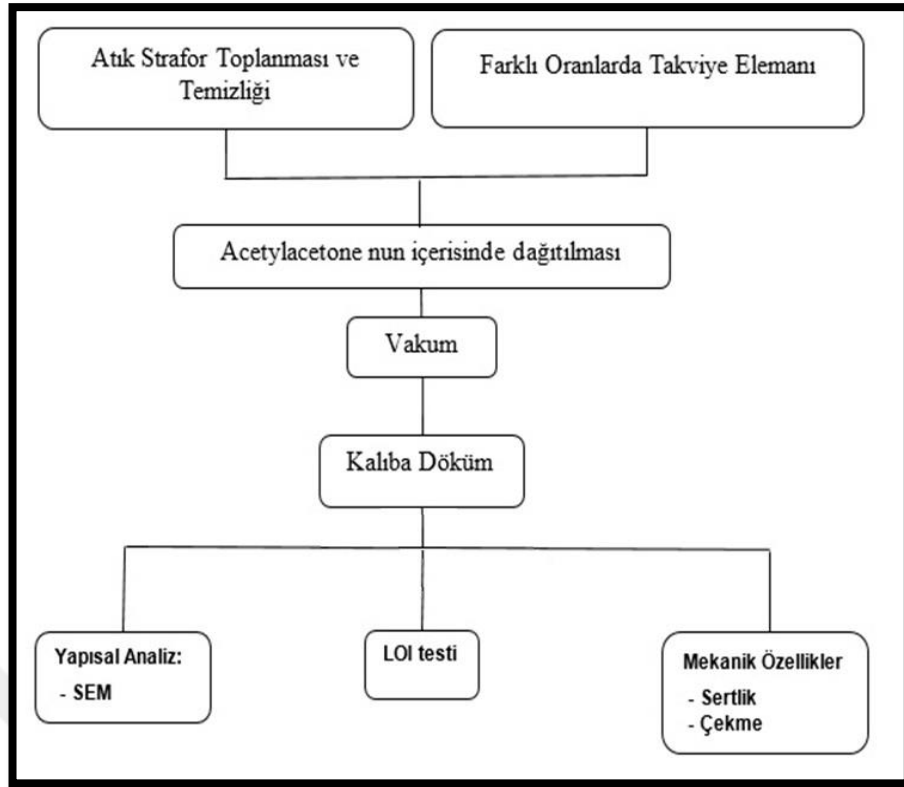
Tablo 4.3. Asetilaseton fiziksel ve kimyasal özellikleri

Özellikleri	Değer
Molar Kütle	100.117 g/mol
Formül	C ₅ H ₈ O ₂
Yoğunluk	0.980 kg/m ³
Kaynama Noktası	140 °C
Alevlenme noktası	34 °C
Kendiliğinden Alevlenme Sıcaklığı	340 °C
Viskozitesi 20°C'de	0.9732 g/cm ³
Yanma Isısı	-6,150 Cal/g
Buharlaşma ısısı 101.3 kPa'da	36.55 kJ/mol

4.2. Yöntem

Şekil 4.2’de akış diyagramı verilen çalışmada atık strafor, asetilasetonda çözündürülerek matris olarak kullanılmıştır. Takviye elemanı olarak ise grafen (Gr) tozu farklı oranlarda (ağ.%0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 1) ve ikinci aşamada da aerogel farklı oranlarda (ağ.% 3, 6, 9) kullanılmıştır. Straforun polistiren kaynağı olarak çözünme sonrası takviyelenmiş, sonrasında gözenek yapmaması için vakumdan geçirilerek kalıba döküm sonrası kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerden test numunesi olarak hazırlanarak, mekanik özellik olarak shore sertliği, çekme testi, termal özellik olarak da yanmazlık (LOI) testi yapılmıştır. Üretilen kompozitlerin mikroyapısı taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir.

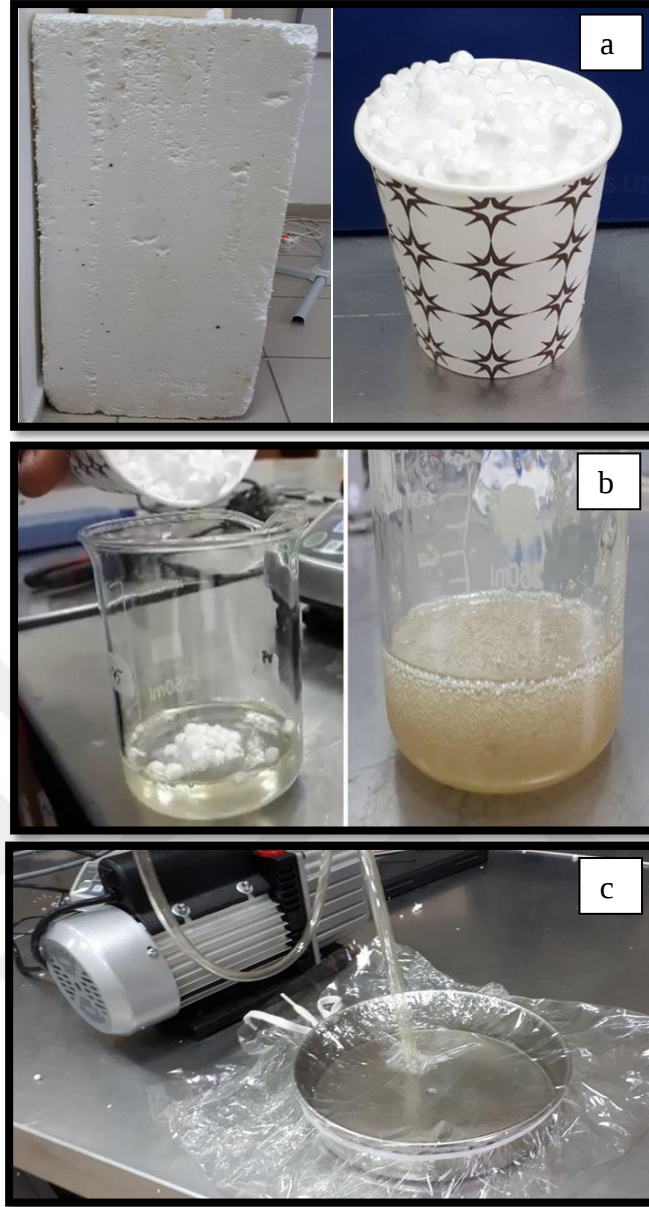
Çalışmada kullanılan PMK kompozit üretim aşamaları Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ps-Gr, Ps-Aerogel, Ps+Gr+Aerogel kompozit üretim aşamaları

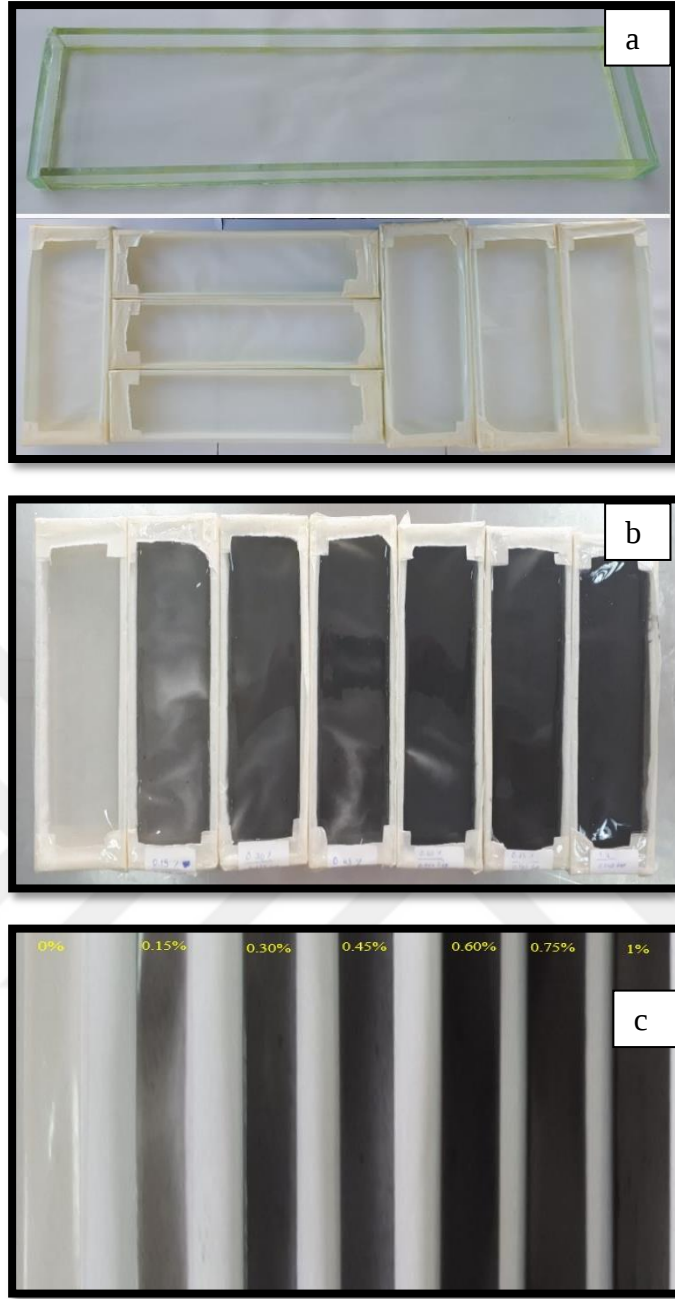
4.2.1. Numune Hazırlama

Numune hazırlamak için ilk olarak inşaat atığı olan blok strafor ürünler küçük boncuklar şeklinde parçalanmıştır. Daha sonra asetilaseton içerisinde çözündürülmüş, çözündürme işlemi sonrası kompozit reçetesine göre takviye elemanları eklenmiş, çözünme ve karıştırma işleminden oluşan hava kabarcığı vakuma alınarak kalıba dökülecek kıvama getirilmiştir (Şekil 4.3a-c).



Şekil 4.3. Kalıplama öncesi numune hazırlama süreçleri: a) PS hazırlama, b) çözme c) vakumlama

Kalıba dökülebilir numune hazırlandıktan sonra kalıp tasarımı yapılmış ve dökülerek kalın plaka formunda örnekler hazırlanmıştır. Kalıpları hazırlamak için $250 \times 70 \times 20$ mm cam kullanılmıştır. Sonraki aşamada gerek takviyesiz gerekse farklı oranlarda (ağ.% 0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75, 1) grafen takviyeli yapılar üretilen kalıplara dökülmüş ve kurumaya bırakılmıştır. Kuruma sonrası örnekler yapılacak teste göre kesilerek test örnekleri hazırlanmıştır (Şekil 4.4 a-c).



Şekil 4.4. Kalıp tasarımı (a), kalıplanmış örnekler (b) ve kesilmiş örnekler (c)

4.3. Çalışmada Kullanılan Ekipmanlar

4.3.1. Tozların Ultrasonik Dağıtıcıyla Karıştırılması

Grafen tozunun asetilaseton içerisinde dağıtılması için ultrasonik homojenizatör Sonics marka ultrasonik homojenizatör ve ultrasonik dağıtıcı probu kullanılmıştır (Şekil 4.5).

Ultrasonik Homojenizatör	
Marka: Sonics	Model: VCX 750
Frekans: 20 kHz	Uzaktan Kumanda
Ağırlık: 6,8 kg	Ölçüler: 235x190x340 mm
Zamanlayıcı: 1-10 sn	Sıvı Miktarı : 1000ml
Dağıtıcı Prob	
Uç Çapı: 25 mm	Tip: Tek Parça
Yoğunluk: Düşük	Hacim: 100-1000 ml
Genlik: 35 μ m	Uzunluk: 122 mm

Şekil 4.5. Ultrasonik dağıtıcı ve özellikleri (Yılmaz, 2019)

4.3.2. Hassas Terazı

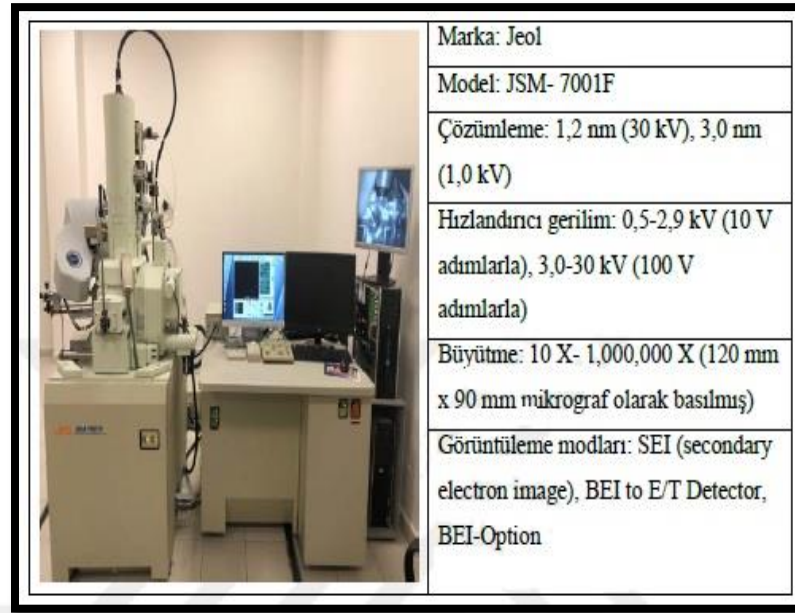
Kullanılan tozların ve üretilen kompozit malzemelerin ağırlık ölçümlerinde Radwag AS 220.R2 marka hassas terazi kullanılmıştır. Cihaz ve özellikleri Şekil 4.4’de verilmiştir. Cihaz özellikleri Şekil 4.6’da verilmiştir.

	Kapasite: 220 g	Okunabilirlik: 0,1 mg
	Minumum Yük: 10 mg	Dara Ağırlığı: -220 mg
	Tekrarlanabilirlik: 0,1 mg	Lineerlik: $\pm 0,2$ mg
	Stabilizasyon Süresi : 3,5 s	Kefe Boyutu: $\varnothing$ 85 mm
	Çalışma Sıcaklığı: +10°C - +40 °C	Net Yük/ Brüt Yük: 5,6/7,7 kg
	Kabin boyutu: 490mm x 400mm x 505 mm	Güç Kaynağı: 12-16 V DC/ 250 mA

Şekil 4.6. Hassas terazi şeması ve özellikleri (Yılmaz, 2019)

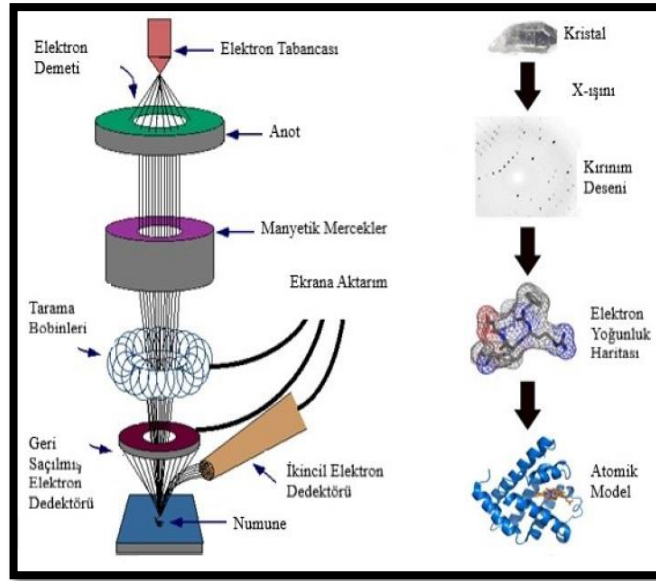
4.3.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Çalışmada kullanılan tozların ve üretilen kompozitlerin analizi yapılması amacıyla OMÜ KİTAM bünyesinde bulunan SEM cihazı kullanılmıştır. Cihaza ait bilgiler Şekil 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.7. Taramalı elektron mikroskobu (Yılmaz, 2019)

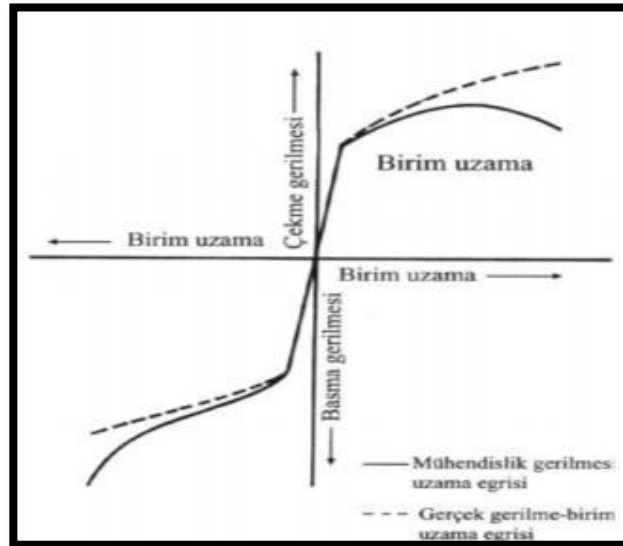
Şekil 4.8’de odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu verilmiştir. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Elektron demeti hücresel tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyalle eşleştirilerek görüntü oluşturmaktadır. SEM ile 1 nanometreden daha yüksek çözünürlüğe ulaşılmaktadır. Standart SEM cihazları yüksek vakumda, kuru ve iletken yüzeyleri incelemek için uygundur. Ancak düşük vakumda, nemli koşullarda, çok düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklıklara değişen koşullarda çalışabilen, çevresel taramalı elektron mikroskobu gibi özelleşmiş cihazlar da mevcuttur. Numune üzerinde elemental kompozisyon tanımlama ve haritalama için Enerji Dispersiv Spektrum (EDS) analizi yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskopunda numune üzerine taramalı elektron demeti gönderilerek analiz gerçekleştirilmektedir. SEM üç temel kısımdan oluşmaktadır. Bunlar; optik kolon, numune ve görüntüleme sistemidir. Optik kolon bölümünde elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilim uygulanan anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için manyetik mercekler, elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri bulunmaktadır. Tüm optik kolon 10^{-4} Pa değerinde tutulmaktadır. Görüntü sisteminde ise, elektron demeti ile numune girişimi sonucunda oluşan çeşitli elektron ve ışımaları toplayan dedektörler bulunmaktadır. Şekil 4.8’de taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Taramalı elektron mikroskobu çalışma prensibi (Yılmaz, 2019)

4.3.4. Çekme Testi Cihazı

Kuvvet ve şekil değiştirme arasındaki bağıntıların incelenmesi bakımından en basit deney çekme deneyidir. Çekme deneyi; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarının (mekanik özelliklerinin) belirlenmesi, mekanik davranışlarına göre sınıflandırılması ve malzeme seçimi amacıyla yapılır. Şekil 4.9’da metalik bir malzemenin çekme ve basma diyagramları görülmektedir.



Şekil 4.9. Metalik bir malzemenin çekme ve basma diyagramları (Yılmaz, 2019)

Hooke kanununa göre gerilme (σ) ve şekil değiştirme (ϵ) ilişkisi aşağıdaki eşitlik’de verilmiştir:

$$(\sigma = E \cdot \epsilon)$$

Bu eşitlikte, E elastisite modülüdür (MPa).

Şekil değiştirme (ϵ) miktarı ise malzemenin boyutsal değişimini ifade eden bir parametredir. % şekil değiştirme ($\% \epsilon$) miktarı, aşağıdaki eşitlik’de belirlenmektedir:

$$\% \epsilon = ((l_s - l_0) / l_0) \times 100$$

Bu eşitlikte, l_s malzemenin çekme testi sonrasındaki son boyu (mm), l_0 ise çekme testi öncesindeki ilk boyudur (mm). Kompozit malzemelerin ve takviyesiz matris malzemesinin mekanik davranışını değerlendirmek ve takviye oranlarının artırılmasıyla çekme mukavemetlerinde meydana gelen değişimleri tespit etmek için çekme deneyi uygulanmıştır.

Şekil 4.10’da verilen ve bu çalışmada kullanılan cihaz, Instron marka olup, 100 kN yük kapasitesi, 0.00005 -3000 mm/dak hız aralığı ve yük ölçüm doğruluğu: +/-%0,5; 1/500 yük hücre kapasitesinin altında okuma kapasitesine sahiptir. Ayrıca, polimer matris kompozit malzemelerin çekme özellikleri için geliştirilen ASTM D3039 standart uygulanmıştır. Sonraki kısımlarda verilen (bölüm 5.2) çekme eğrilerinden elastik modülü hesabı yapılmıştır. Bunun için elastik deformasyon bölgesinde seçilen iki gerilme ve birim şekil değişimi noktaları için değerler belirlenmiş ve $E = \Delta\sigma / \Delta\epsilon$ formülünden hesaplanmıştır. Bölüm 5.2’de verilen sonuçlar için her bir grafik ayrı ayrı çizilip elastik deformasyon bölgesinde hesaplamalar yapılmıştır.



Şekil 4.10. Instron 5982 100 kN zemin modeli çekme cihazı

4.3.5. Sertlik Testi Cihazı (Shore Testi)

Bu çalışmada manuel olarak veya shore-digihand desteği ile birlikte kullanılabilecek sertlik testlerin yapılması için dijital shore test cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.11’de dijital Shore test cihazının şematik şekli verilmektedir.

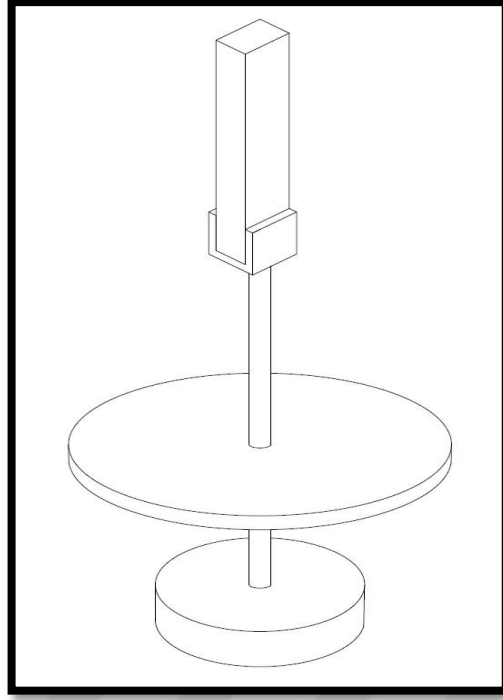


Şekil 4.11. Manuel sertlik kontrolü - shore test cihazının görüntüsü

4.3.6. LOI Testi (Loss on Ignition)

Şekil 4.12’de yanma kaybı (Loss on Ignition, LOI) test düzeneği verilmiş olup, bir polimerin yanmasını yüzde olarak ifade eden birimdir. Bir malzemenin yanma olayının nasıl gerçekleştiğini belirlemek için en kolay yöntemdir. Bu yöntemde yanma öncesi ağırlık kaybı ile belli süre sonucunda yanan örnek ağırlığı ölçülmekte ve yüzde yanma kaybı hesaplanmaktadır. Test prosedürü olarak ASTM D2863 standartı dikkate alınarak testler yapılmıştır. Bu çalışmada örnekler LOI testi için 100mm×12mm×1.5mm boyutlarında hazırlanmış ve yaklaşık 15s boyunca yanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yanma öncesi ve sonrası ağırlıklar bilindiğinden yanma kaybı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmıştır.

$$LOI \% = (M_0 - M_1)/M_0 \times 100$$

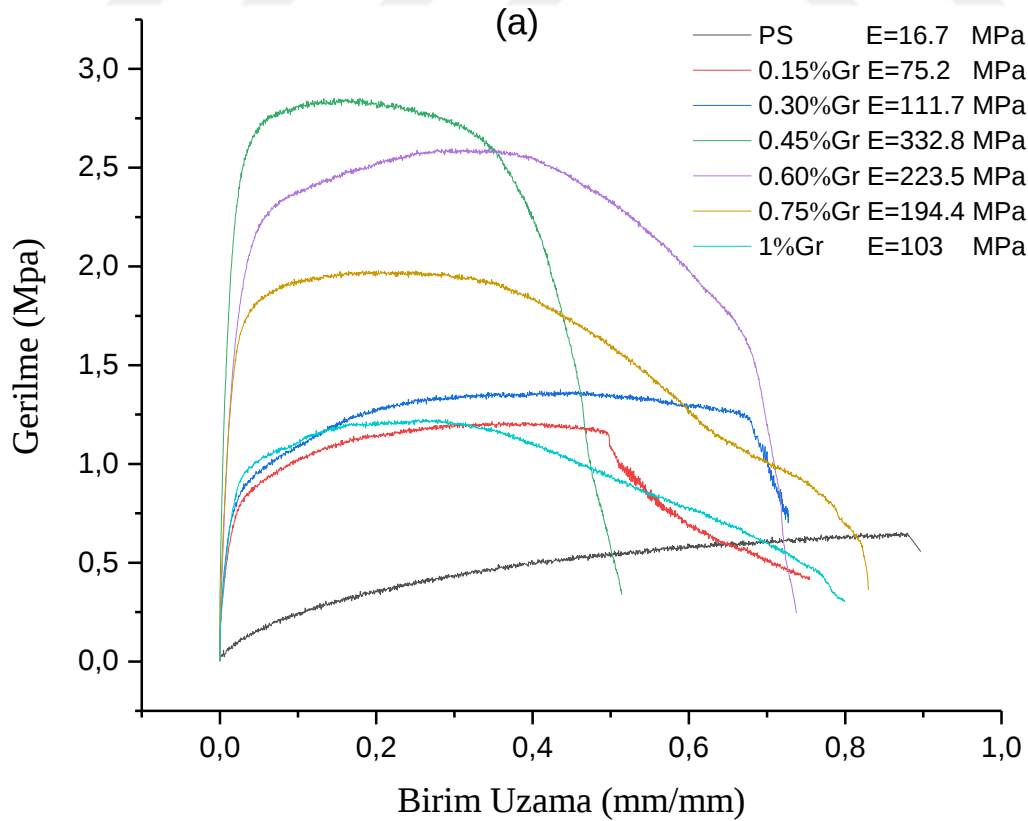


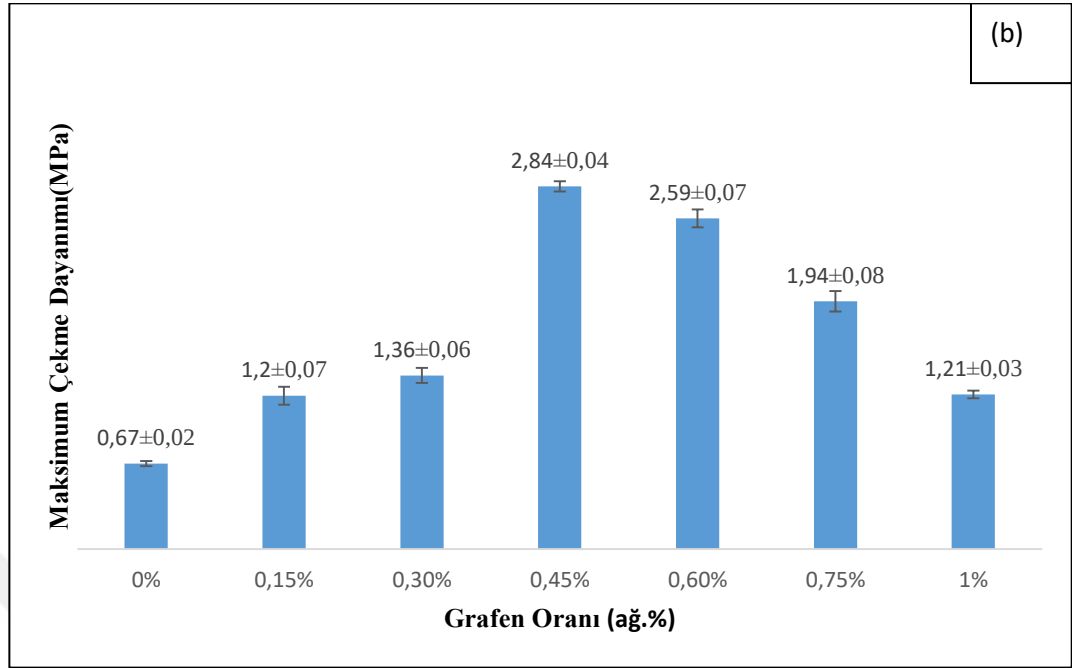
Şekil 4.12. LOI test düzeneği

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Numunelerin Çekme Testi Sonuçları

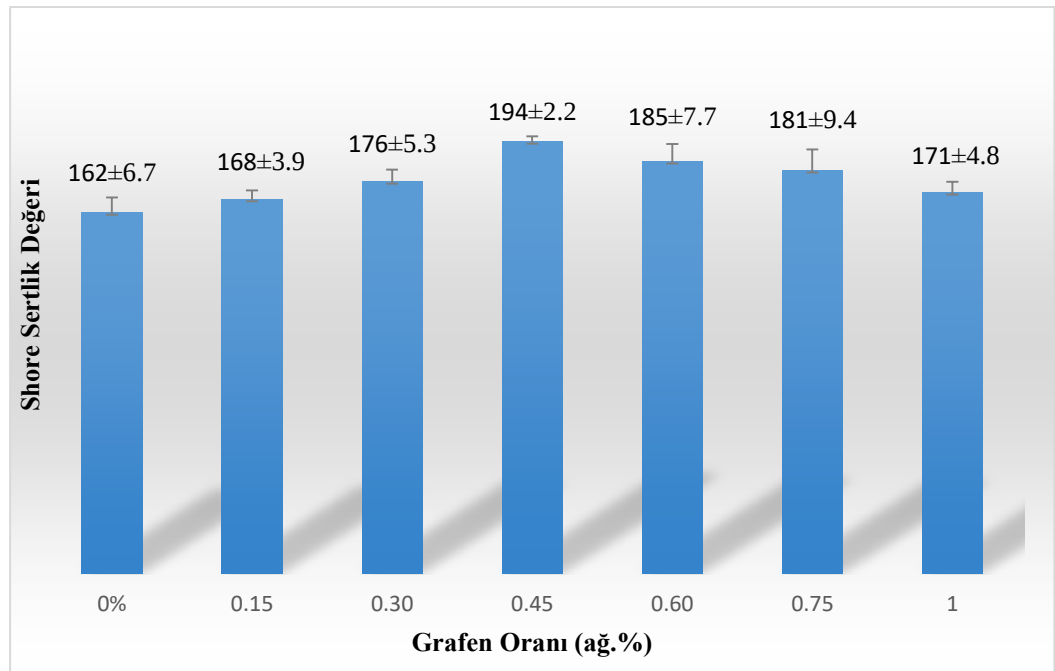
Şekil 5.1a'da gerilme birim uzama eğrisinden verildiği üzere takviyesiz PS örnekler 1MPa'nın altında maksimum dayanım gösterirken, grafenin ağırlık % 0.45'e kadar ortalama maksimum çekme dayanımını (Şekil 5.1b) yaklaşık 3 MPa'ya kadar arttırdığı ve birim uzamanın azaldığı görülmektedir. Bu değerin üzerinde ise mekanik özelliklerin tekrar düştüğü görülmektedir. Saf PS'in elastik modülü yaklaşık 17 MPa olarak bulunmuşken ağırlık % 0.45 grafen içeren PS kompozitin elastik modülü yaklaşık 332 MPa olarak hesaplanmıştır. Artan grafen oranıyla elastik modülünde 103MPa'ya düşüş görülmüştür. Burada grafenin belli bir değere kadar mekanik özelliklere olumlu etki Şekil 5.4'te verildiği üzere arayüz etkileşiminin kuvvetli olması ve yükü test anında grafen üzerinden taşınması verilebilir. Belli bir değerden sonra azalması ise grafenin toplanarak hem arayüz etkileşimini zayıflatması hem de oluşan topraklardan dolayı çekme anında grafen plakaları arasında kaymanın kolay olması verilebilir (Şenel, 2021).





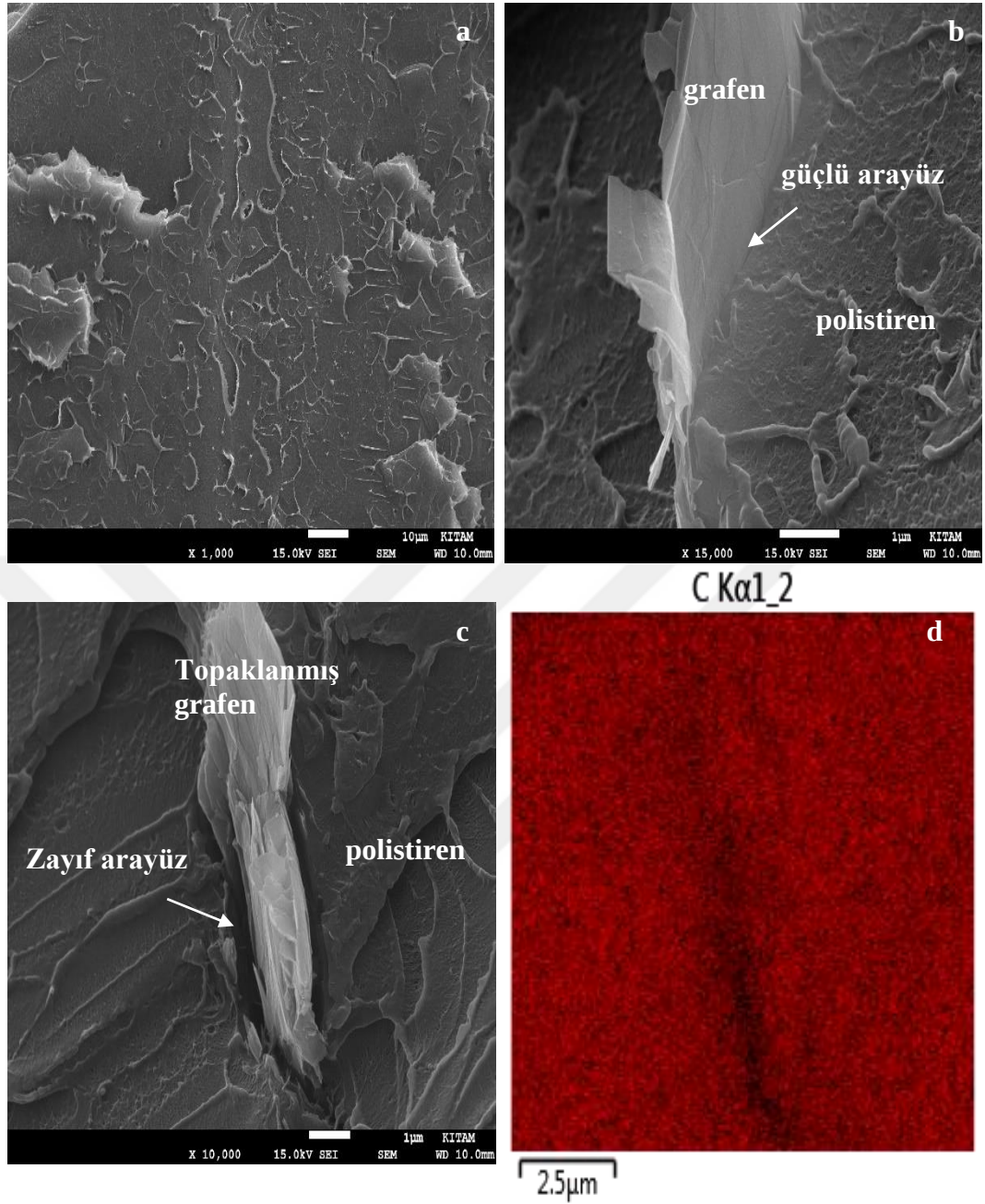
Şekil 5.1. Grafen takviyeli kompozitlerin çekme eğrisi (a) ve ortalama maksimum çekme dayanımları (b)

Üretilen kompozitlerin (10mm × 10mm) sertlik davranışı ise Shore sertlik testi ile yapılmıştır. Sertlik sonuçlarından görüldüğü üzere çekme testine benzer şekilde ağ. %0.45 grafen içeriğine kadar yaklaşık 200 shore sertlik değeri elde ederken, bu oranın üzerinde sertlik değeri düşüş göstermiştir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Grafen takviyeli PS kompozitlerin sertlik değeri

Bunun nedeni SEM görüntülerinden verildiği üzere (Şekil 5.3) belli bir değere kadar takviye elemanının homojen dağılımdan dolayı güçlendirici etki yapması olarak gösterilebilir. Test anında homojen olarak dağılmış grafen yapıları yükü üzerine alarak yük transferi olmakta böylece mekanik özellik artmaktadır. Birim uzmanın azalması ise homojen dağılmış grafen ile PS arasında oluşan güçlü arayüz bağlantısından dolayı (Şekil 5.3b) deformasyon anında kayma zorlaşmakta ve birim uzama azalmaktadır. Artan grafen oranıyla grafenin sahip olduğu nano yapıdan dolayı topaklanma artmakta, Şekil 5.3c’de görüldüğü üzere grafen ile polistiren arasında zayıf arayüz oluşmakta ve bölgesel olarak bu topaklar bir kağıt destesi çekme testi anında kolayca kayabilmektedir. Böylece grafen takviye edici özelliğini kaybedip katı yağlayıcı özelliği baskın olmaktadır. Kayma kolay olduğu için daha düşük yüklerde malzeme deforme olmakta ve çekme dayanımı düşmektedir. Benzer davranışlar özellikle gerek metal matrisli gerekse polimer matrisli kompozitlerde de de görülmüş olup, grafenin bu eğilimi literatürle tutarlıdır (Wang vd., 2019, Şenel vd. 2018, Zhao vd. 2016). EDX analizinden gerek matristen gerekse grafenden gelen karbon atomları homojen dağılım göstermiştir.



Şekil 5.3. Polistiren (a), ağırlık %0.45 grafen içeren polistiren (b), ağırlık %1 grafen içeren polistiren (c) ve grafen içeren kompozitin SEM ve EDX analizi (d).

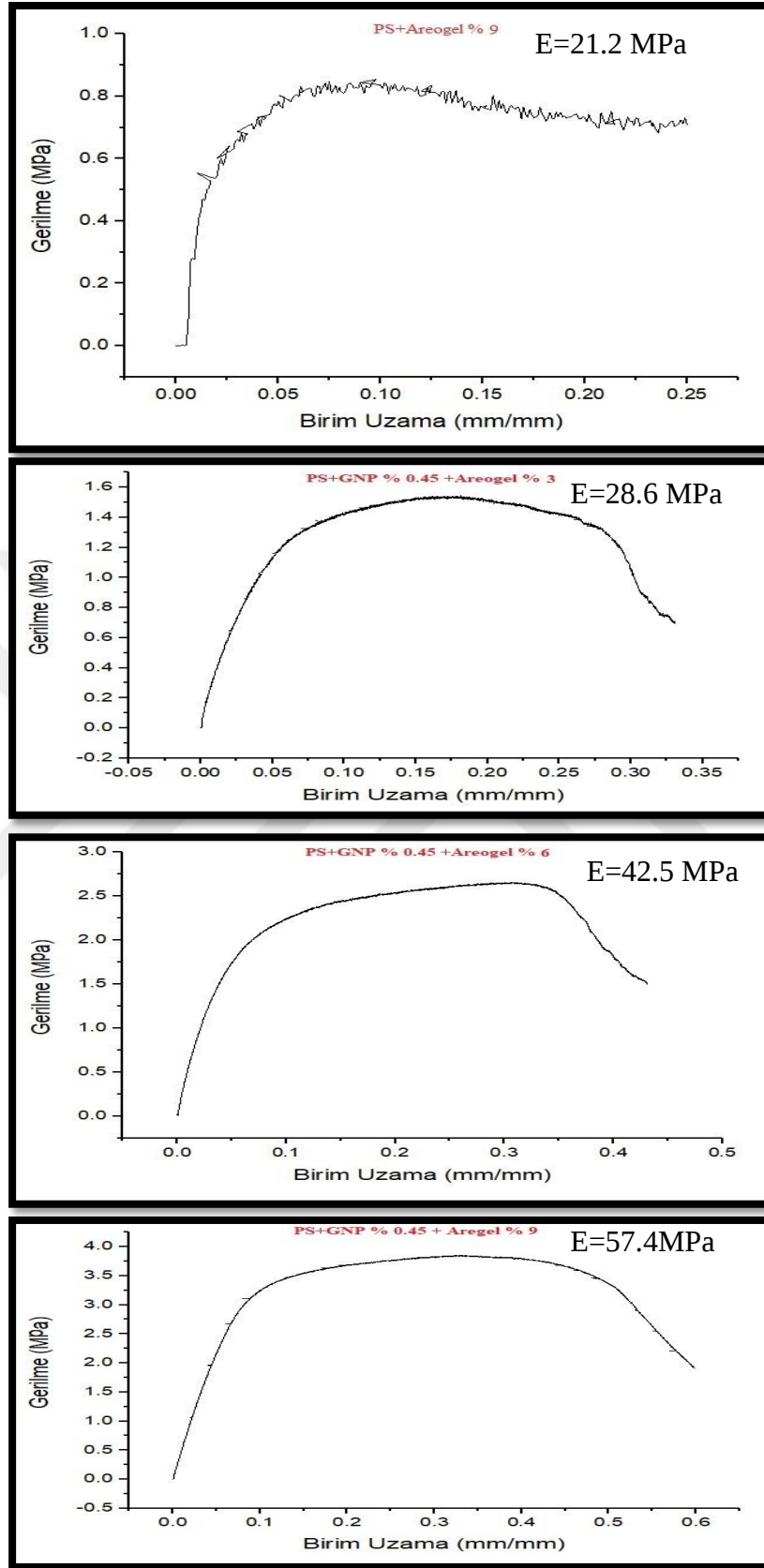
5.2. Polistiren-Aerojel-Grafen Takviyeli Kompozitlerin Çekme ve Sertlik Testleri

Şekil 5.4’de takviyesiz PS, en iyi mekanik özelliğe gösteren grafen takviyeli PS ve aerojel takviyeli PS ve en yüksek mekanik özelliğe sahip grafen oranını içeren kompozite farklı oranlarda aerojel takviyeli kompozitlerin görüntüsü verilmiştir.



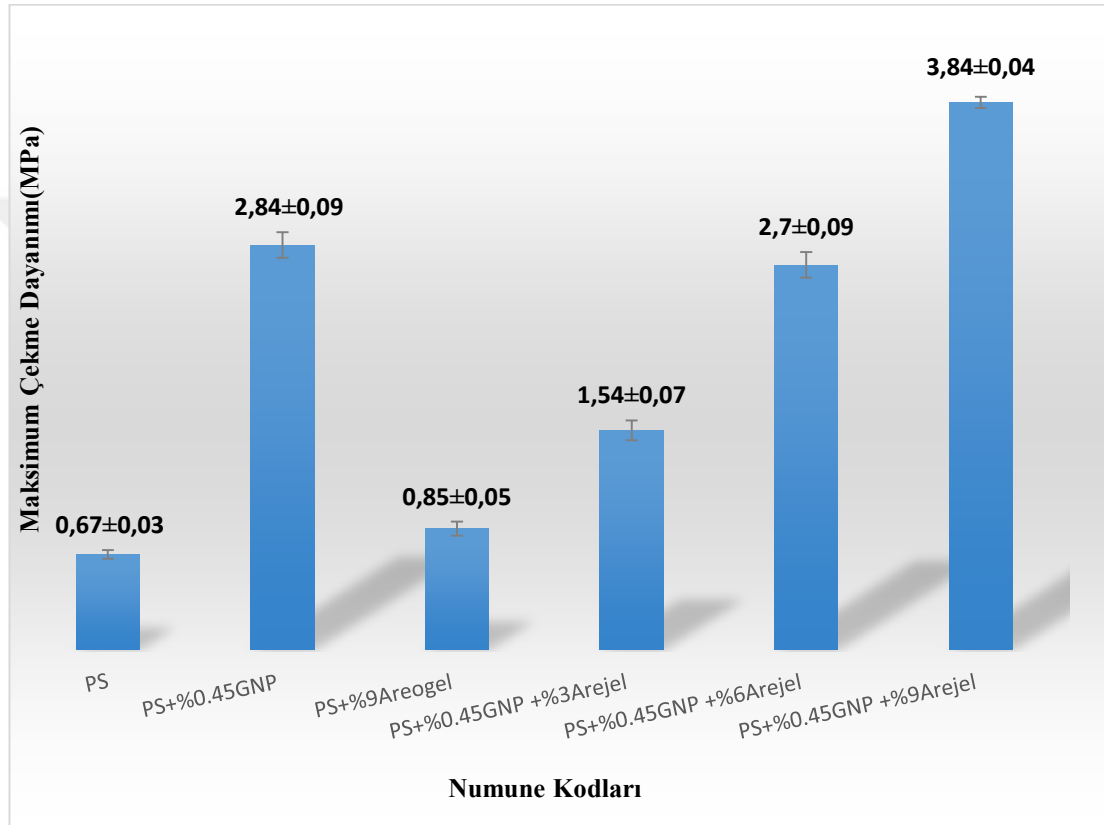
Şekil 5.4. Polistiren-aerogel-grafen takviyeli kompozitlerin çekme örnekleri

Çalışmada farklı oranlarda aerogel (ağ.% 3-9 arası) çalışılmış ve en yüksek mekanik özellik ağ. %9 aerogel içeren örnek vermiştir. Bu değerin üzerinde proses esnasında aşırı topaklanma olduğu için örnek hazırlanamamıştır. Bunun yanında en yüksek mekanik özellik gösteren grafen içeriğine (ağ. %0.45) sahip kompozitlere farklı oranlarda aerogel ilave edilmiştir. Şekil 5.5’de üretilmiş kompozitlerin çekme gerilmesine bakıldığında sadece aerogel içeren kompozite göre (≈ 0.8 MPa) grafen içeren kompozitlerde (≈ 3.5 MPa) artan aerogel miktarıyla yaklaşık dört kat çekme özelliğinde artış görülmüştür. Çekme eğrisinden hesaplanan elastik modüller ise sırasıyla 21.2, 28.6, 42.5 ve 57.4 MPa olarak bulunmuştur.



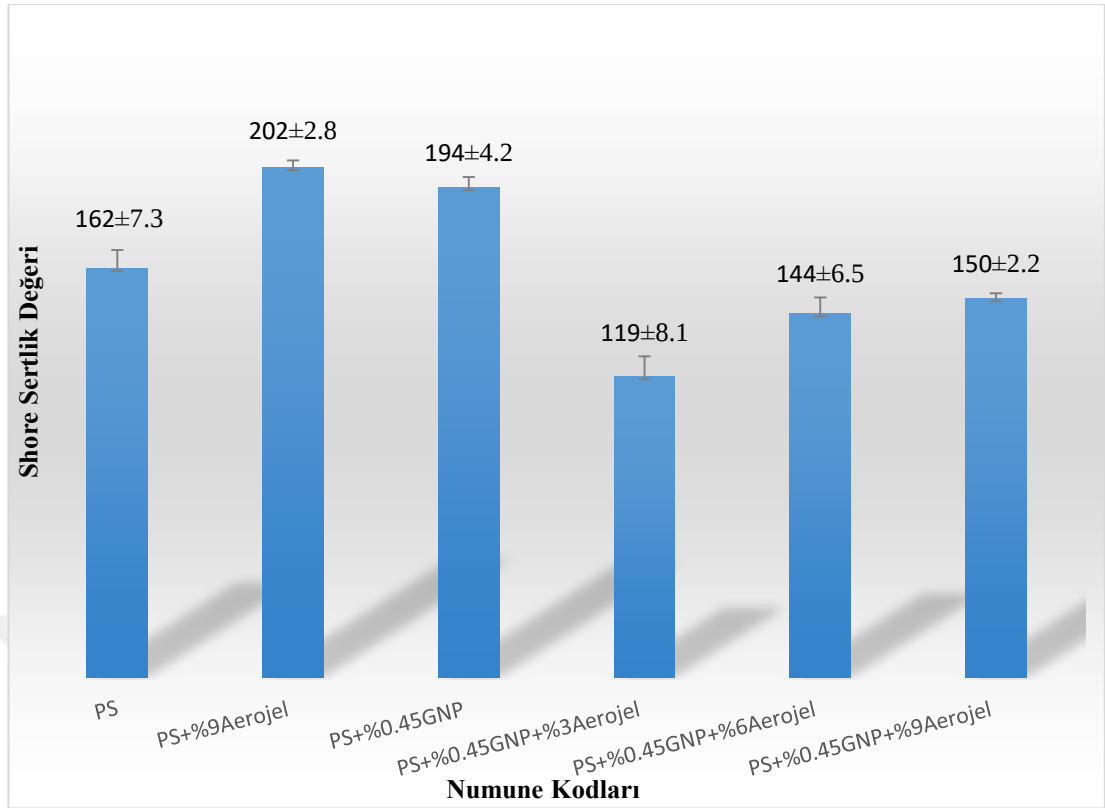
Şekil 5.5. Farklı oranlarda aerogel içeren PS-Gr kompozitlerin çekme testinunmunleri

Şekil 5.6’da ise önceki bölümdeki takviyesiz, ağı.0.45% grafen içeren ve en yüksek çekme dayanımı veren ağı. 9% aerogel, PS-0.45Gr içeren kopozite farklı oranlarad aerogel ilave edilmiş kompozitlerin maksimum çekme dayanımları verilmiştir. Buradan görüldüğü üzere tek başına grafen ilavesi PS’e göre 4 kat maksimum çekme dayanımı sağlarken, aerogelin tek kullanımı yaklaşık 1.2 kat artışa neden olmuştur. Ancak, aerogelin grafenle birlikte kullanımına bakıldığında maksimum çekme dayanımı 0.67 MPa’dan 3.84 MPa’ya kadar artış göstermiştir.



Şekil 5.6. Farklı örneklerin maksimum çekme dayanımlarının karşılaştırılması

Üretilen aerogel esaslı kompozitlerin Shore sertlik sonuçlarından görüldüğü üzere grafen ve aerogel katkısı olduğunda sertlik değeri yaklaşık 200’e kadar artış göstermiştir. Diğer taraftan ağı.0.45 grafen içeren kompozite farklı oranlarda aerogel ilave edildiğinde tek başına takviye kullanımına göre daha düşük sertlik elde edilmiştir (Şekil 5.7).

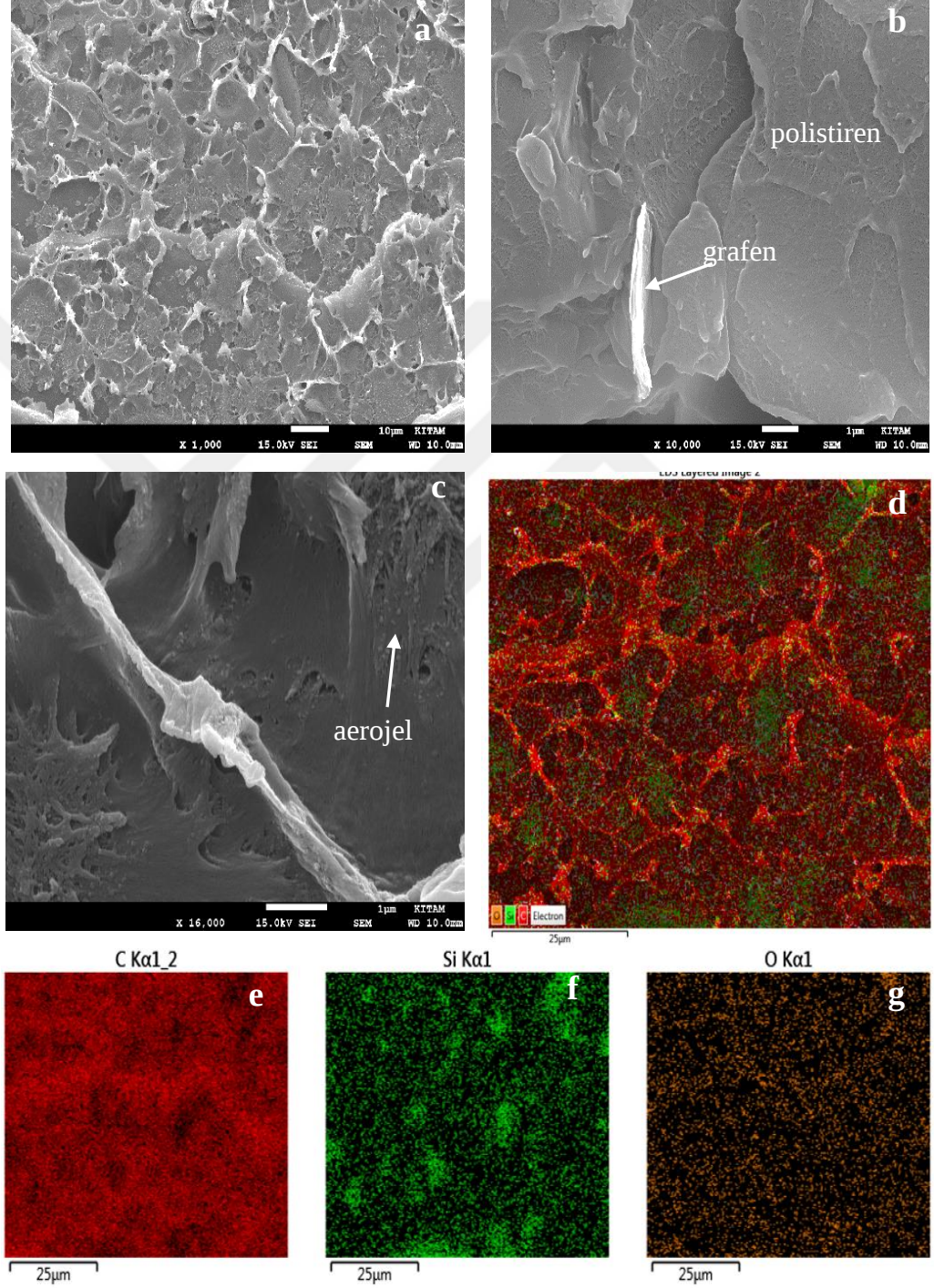


Şekil 5.7. Grafen, aerojel ve grafen-aerojel takviyeli PS kompozitlerin sertlik değerleri

Daha önceki kısımda verildiği üzere grafen belli bir değere kadar (bu çalışmada ağ.% 0.45) yapıda homojen dağılımdan dolayı güçlendirici etki yapmış, artan oranlarda toplanmadan dolayı mekanik yük altında yağlayıcı görevi göstererek mekanik özelliği düşmüştür (Wang vd., 2019, Şenel vd. 2018, Zhao vd. 2016). Ancak maksimum çekme dayanımı sonuçlarından görüldüğü üzere aerojel ilavesi arttıkça mekanik özellik grafenli sisteme göre daha da artmıştır. Bunun nedeni grafenli sistemde test esnasında grafen ile polistiren arayüzünde daha kolay kaymanın meydana gelmesi verilebilir. Grafenli sisteme aerojel ilavesiyle artışın nedeni ise grafen ve polistiren arayüz arasına aerejel yapıları girerek yük altında arayüz deformasyonu daha zor olmaktadır. Grafenli sisteme seramik esaslı aerojelin girmesiyle mekanik test anında takviyelere yük transferi olmakta, yük takviyeler tarafından taşınmaktadır. Ayrıca takviye partikülleri polistirene arayüzde çok iyi tutunmakta ve çekme testi anında polimerin takviyelerden ayrılması zorlaşmaktadır. Grafen ile aerojelin birlikte kullanıldığında sertlik değerinde tek taviyeye göre düşmesi aynı hacim içinde daha fazla partikülün yer alması, olası toplanmalar ve bu toprakların meydana getirdiği gözenekler gösterilebilir. Artan aerojelle artış olması ise aerojelin seramik esaslı bir sert malzeme olması ve partiküller arasındaki arayüz bağlantılarının güçlü olması verilebilir (Dassioz, 2007, Şenel 2021).

Şekil 5.8’de polistiren, grafen ve aerojeli birlikte içeren kompozitlerin düşük ve yüksek büyütme SEM görüntülerinden görüldüğü üzere grafen ve aerojel partiküller yapıda

bulunmaktadır. En yüksek mekanik özelliği veren (PS-ağ.%0.45GNP-ağ.%9Aerojel) kompozisyonunda aerojel partiküller özellikle EDX analizinden homojen olarak dağılmıştır. Karbon ise matris ve grafenden gelmektedir. Aerojelin polistiren içinde dağılımı arayüzde grafenle birlikte varlığı mekanik test esnasında grafen-polimer arasında sürtünmeyi artırdığından mekanik özellikler daha da artmıştır.

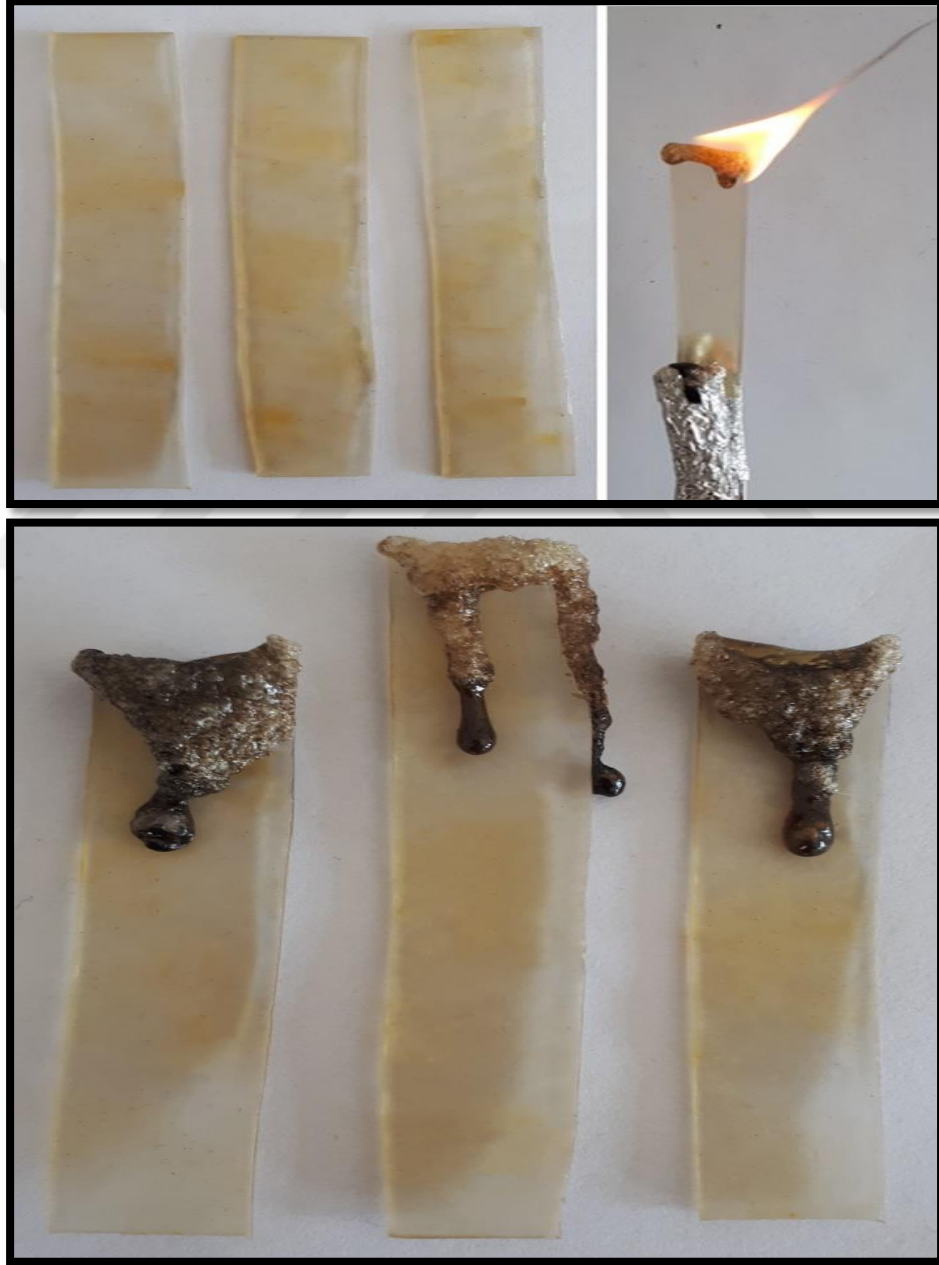


Şekil 5.8. Polistiren-ağ.%0.4grafen-ağ.%9 aerojel içerikli kompozitlerin SEM ve EDX analizi

5.3. Polistiren, Grafen, Aerogel Ve Grafen-Aerogel Takiveyi Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) Testi

5.3.1. Polistiren İçin Yanmazlık (LOI) Testi

Şekil 5.9'da LOI testi için örnekler 100mm×12mm×1.5mm boyutlarında hazırlanmış ve yaklaşık 15s boyunca yanma işlemi gerçekleştirilmiştir. Tablo 5.1'de verildiği üzere ortalama ortalama $\%1.74 \pm 0.64$ yanma kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 5.9. PS örnekler için yanam öncesi ve sonrası görüntüleri

Tablo 5.1. PS numunenin yanma kaybı oranı

Ps	M0	M1	% azalma	Ortalama
Numune 1	1.38	1.36	%1.45	
Numune 2	1.55	1.53	%1.30	%1.74 ±0.64
Numune 3	1.21	1.18	%2.48	

5.3.2. Grafen Takviyeli Polistiren Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) Testi

Benzer şekilde en yüksek mekanik özelliği veren PS-ağ.0.45% grafen içeren kompozit içinde LOI testi yapılmış, yanma öncesi ve sonrası görüntüleri aşağıda verilmiştir (Şekil 5.10). Tablo 5.2’de yapıya grafen ilavesi yapıldığı zaman saf polistirene göre yaklaşık 3 kat yanma oranının arttığı görülmüştür.



Şekil 5.10. PS-Ağ.0.45 % Gr içeren kompozitin yanma öncesi ve sonrası görüntüsü

Tablo 5.2. Ps+Gr (%0.45) numunenin yanma kaybı oranı

PS+%0.45Gr	M0	M1	Yüzde azalma	Ortalama
Numune 1	0.93	0.88	%5.38	
Numune 2	0.86	0.82	%4.65	%5.06 ±0.37
Numune 3	0.97	0.92	%5.15	

5.3.3. Aerojel Takviyeli Polistiren Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) Testi

Şekil 5.11’te PS içinde aerojel takviyesi içeren kompozit içinde LOI testi yapılmış, yanma öncesi ve sonrası görüntüleri aşağıda verilmiştir. Tablo 5.3’de yapıya farklı oranlarda aerojel ilavesinin olması artan aerojel miktarına bağlı olarak yanmazlık özelliği iyileşmiştir. Ağ. 9% aerojel içeren PS kompozit takviyesiz PS’e göre yaklaşık 3 kat, grafenli takviyeye göre ise yaklaşık 9.4 kat oranlarda yanmazlık özelliği iyileşmiştir.



Şekil 5.11. PS-Aerojel içeren kompozitin yanma öncesi ve sonrası görüntüsü

Tablo 5.3. Aerojel takviyeli kompozitlerin yanma kaybı oranı

PS + %3Aerojel	M0	M1	Yüzde azalma	Ortalama
Numune 1	1.31	1.29	%1.52	%1.38 ±0.13
Numune 2	1.45	1.43	%1.38	
Numune 3	1.60	1.58	%1.25	

PS + %6Aerojel	M0	M1	Yüzde azalma	Ortalama
Numune 1	1.90	1.88	%1.05	%1.19 ±0.12
Numune 2	2.32	2.29	%1.29	
Numune 3	2.40	2.37	%1.25	

PS + %9Aerojel	M0	M1	Yüzde azalma	Ortalama
Numune 1	1,51	1,50	%0.62	%0.54 ±0.08
Numune 2	1,81	1,80	%0.55	
Numune 3	2,18	2,17	%0.46	

5.3.4. Grafen-Aerojel Birlikte Takviyeli Polistiren Kompozit İçin Yanmazlık (LOI) Testi

PS içinde aerojel ve grafen takviyesi birlikte yapılarak kompozit üretimi yapılmıştır. LOI testi yanma öncesi ve sonrası görüntüleri aşağıda verilmiştir. Tablo 5.4’de grafen oranı ağırlık %0.45 olan sabit PS kompozisyonuna farklı oranlarda aerojel takviyenmiştir. Görüldüğü üzere aerojel takviyesiyle yanma daha zor olmakta olup, aerojel yanmazlık özelliğine olumlu katkı vermektedir. Takviyeli PS ile kıyaslandığında yaklaşık 0.84 kat daha iyi yanmazlık özelliği sağlamıştır.

Tablo 5.4. Aerojel takviyeli PS-0.45Gr kompozitlerin yanma kaybı oranı

PS+%0.45Gr +%3Aerojel	M0	M1	Yüzde azalma	Ortalama
Numune 1	1.57	1.53	%2.55	%3 ±0.36
Numune 2	1.56	1.51	%3.20	
Numune 3	1.54	1.50	%2.60	

PS+%0.45Gr +%6Aerojel	M 0	M 1	Yüzde azalma	Ortalama
Numune 1	1.64	1.60	%1.49	%2.18 ±0.60
Numune 2	1.59	1.55	%2.51	
Numune 3	1.56	1.52	%2.56	

PS+%0.45Gr +%9Aerojel	M0	M1	Yüzde azalma	Ortalama
Numune 1	1.34	1.32	%1.10	%1.42 ±0.11
Numune 2	1.53	1.50	%1.9	
Numune 3	1.56	1.54	%1.28	

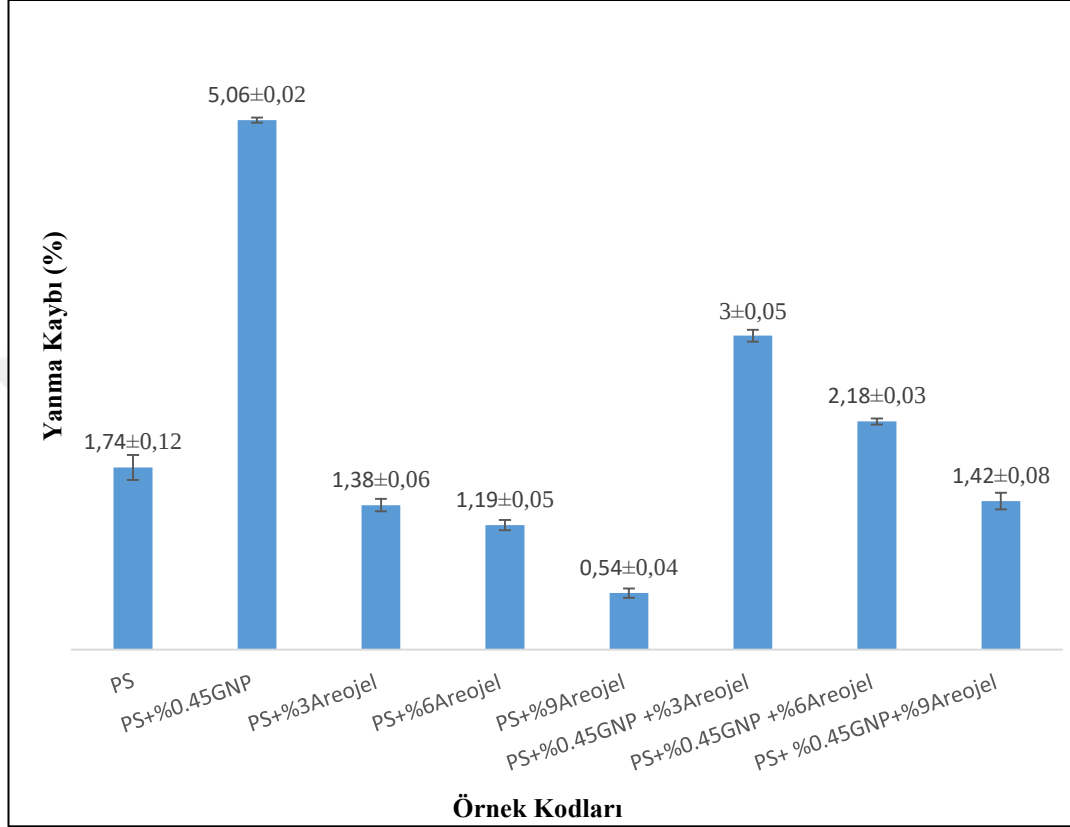
Yanmazlıkla ilgili bütün sonuçlar Şekil 5.12’de karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere sadece grafen takviyesi varlığında malzemenin yanma oranı artmaktadır. Bunun nedeni grafenin polistirene göre daha yüksek termal iletkenlik değerine (grafen: 5000 W/mK, polistiren: 0.12 W/mK) sahip olmasıdır(Li vd. 2017, Simson vd. 2020). Ek olarak, literatürde birçok çalışmada grafen ve grafen oksit yapıların polimer matrislerine yanmazlık özelliği kattığı bilinmektedir. Ancak, grafen katmanları arasında güçlü etkileşimlerden dolayı, grafen plakalar kolayca üst üste istiflenir ve yanma dahil diğer bütün üstün özelliklerini tam olarak kompozit malzemeye veremezler. Bu nedenle, organik olarak grafenin grafen oksite veya farklı kimyasallarla yüzeyinin modifiye edilmesi gerekmektedir (Wang vd. 2020).

Bu nedenle grafen ve türevi olan grafen oksit malzemeler tek başına kullanmak yerine daha çok bu malzemelerin yanmazlık işlevselliğini artırmak için farklı malzemelerle proses edilmektedir. Wang vd. tarafından yapılan çalışmada grafen oksite yanmazlık katmak için fosfor esaslı 10-dihydro-9-oxygen-heterooxy-10-phosphoro-10-oxygen kullanarak hidroksilasyon işlemi yapmış ve polistirende kullanmıştır. Sonuçlardan grafen oksitin fonksiyonelleştirilmesi ile polistirenin yanma davranışı net bir şekilde azalmıştır. Yuan vd. yapmış oldukları çalışmada farklı yanma senaryoları altında grafen katkılı polipropilenin yanma davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışmadan grafen ilavesi yavaş alevli yanma senaryosu için polipropilenin yanmazlığını zayıflatmıştır. Grafen nanoplakalar polimere takviye edildiğinde bazı gazların salınımını engellemiş buda yanmazlığı olumsuz etkilemiştir. Çalışmada düşük oranda grafen ilavesi yanma sonucu oluşan kömürümsü karbon kalıntısının şişmesine ve sistemin daha iyi yalıtılmasına neden olmuştur. Grafen oranının daha da artması polimerin yanma davranışını olumsuz etkilemiştir (Yuan vd., 2017).

Yapılan çalışmalardan görüldüğü üzere özellikle grafen tek başına kullanıldığında kalıntı oksijen atomlarının artması ve yüksek oksidasyon derecesinden dolayı grafenin kristal yapısında bozulmalara neden olmakta buda düşük termal kararlılığa ve alev geciktirme verimini zayıflatmaktadır. Başka bir ifadeyle grafenin oksidasyon derecesinin azaltmak için çok fonksiyonlu yanma önleyici kimyasallarla proses edilmesi gerekmektedir (Cai vd. 2017). Bu tez çalışmasında da grafen yanma önleyici özelliğini artırmaya yönelik herhangi kimyasal prosese maruz bırakılmaması nedeniyle kalıntı oksidasyon derecesinin yüksek olması grafenli kompozitlerin yanmazlık özelliğinin kötüleşmesine neden olabilir. Çalışmanın ileriki süreçlerinde grafen miktarına bağlı olarak kalıntı oksijen miktarı tayini ve oksidasyon derecesinin tespiti literatüre katkı sunacaktır. Bu konu üzerine nerdeyse yok denecek kadar az çalışma mevcuttur.

Ayrıca sadece arojel katkısı yapıldığında yanmazlık oranı polistirene göre çok çok daha düşük olmaktadır. Buda kullanılan arojelin termal iletkenliğinin çok düşük olması (0.013 W/mK) ile alakalıdır (Kim vd. 2015). Arojel grafenle birlikte kullanıldığında bu etki daha da net görülmektedir. Yanmazlık oranı grafen ile arojel birlikte kullanıldığında sadece grafen takviyeliden düşük arojel takviyeliden yüksektir. Yani arojel sahip olduğu oldukça düşük termal iletkenlik değerinden

dolayı yanmayı geciktirmektedir. Bunun nedeni TG eğrilerinin yorumlanmasında da verildiği aerogelin silika esaslı olması, yüksek gözenekli ve oldukça düşük termal iletkenliğe sahip olması nedeniyle yanma esnasında ısı transferine karşı fiziksel bariyere sebep olmaktadır. Buda yanmazlığı olumlu olarak etkilemiştir.

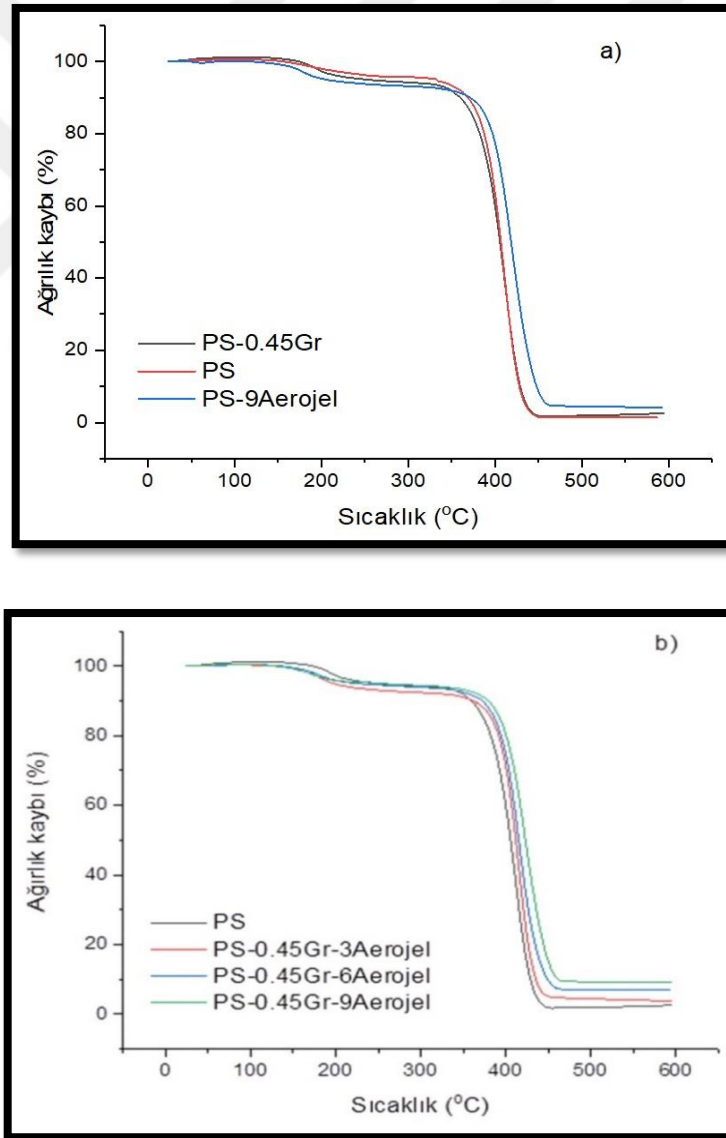


Şekil 5.12. Örneklerin yanmazlık sonuçlarının karşılaştırılması

5.3.5. Üretilen Kompozitlerin Termal Analizleri

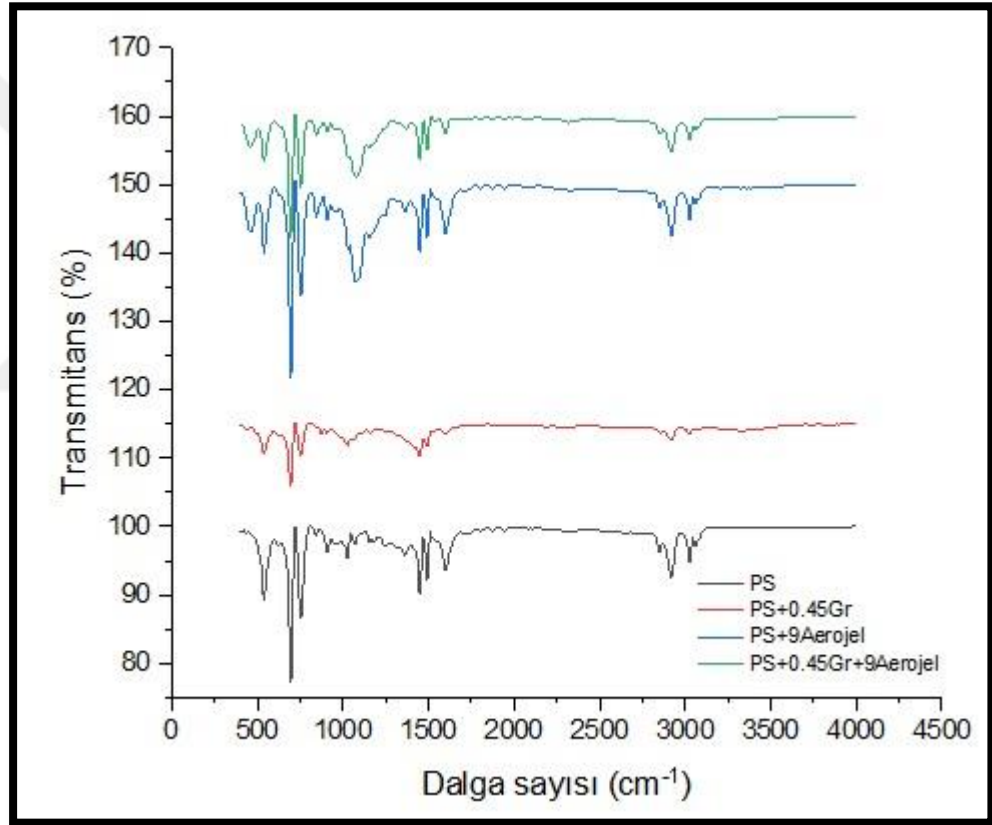
Şekil 5.13'te takviye elemanlarının termal özelliklere etkisinin daha net anlaşılması için TG analizi yapılmıştır. Yanma sonrası kül kalıntısı (char residue) daha küçük uçucu parçalara ayrılamayan ve TG analizinin en yüksek sıcaklığında geriye kalan karbonlu malzemedir. Takviye elemanının polimer matrisli kompozitlerin yanmaya olan etkisi daha çok yanma sonrası kalıntı miktarına göre yapılmaktadır (Cai vd. 2017, Yuan vd.2017). Bu çalışmada ise yaklaşık 400 °C'ye kadar ihmal edilebilir bir düşüş görülürken, bu sıcaklığın üzerinde bozunma (dekompozisyon) daha yüksektir. Yaklaşık 350-460 °C arasında önemli ölçüde yanmadan dolayı bozunma meydana gelmiştir. PS ve ağ.0.45% grafen içeren PS kompozitler için yanma sonrası kalıntı miktarı yaklaşık 450 °C'de 1.25% olduğu görülmektedir. Ağırlıkça %9 aerogel içeren kompozitte ise yaklaşık 460 °C'de kalıntı miktarı yaklaşık 5% olarak tespit

edilmiştir. Bu sonuçlar, aerogelin polimer matrisine dahil edilmesiyle termal kararlılığın önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermektedir. Şekil 5.13b’de ise aerogel ilavesinin yanma davranışına etkisi net olarak görülmektedir. Şekilde görüldüğü üzere aerogel miktarı arttıkça maksimum ağırlık kaybı oranı yavaş yavaş azalmakta, kalan kalıntı karbon içeriği kademeli olarak artmaktadır. Aerogel ilavesi ısı iletimini ve bozunma gösteren yanma ürünlerini önemli ölçüde engellemektedir. Bunun nedeni aerogelin seramik kökenli amorf silika esaslı olması, yüksek gözenekli ve termal olarak oldukça yalıtkan olması nedeniyle bozunmayı yavaşlatmakta buda hem termal yalıtıma neden olmakta hem de ısı transferine karşı fiziksel bariyere sebep olmaktadır (Mohamed vd. 2017, Zhu vd. 2020) . Bu sonuçlar yanmazlık testi ile uyumluluk göstermiştir.



Şekil 5.13. Grafen, arejel, grafen-aerogel takviyeli polistiren kompozitlerin TG analizleri

Şekil 5.14’de ise örneklere yapılan FTIR analizi verilmiştir. Polistiren genel olarak vinil benzen polimerizasyonu ile oluşturulmuş organik bir termoplastik malzemedir. Yapılan FTIR analizinde PS örnekler için literatürle birebir uyumlu olup, literatüre göre daha çok 2800-3100 cm^{-1} arası pikler C-H titreşimine ait olup benzen halkalarına ait ($=\text{CH}$) gruplarından gelmektedir. 1300-1600 cm^{-1} arası pikler ise C-C pikleri olarak literatürde verilmiştir. Benzer şekilde 530-760 cm^{-1} arası pikler ise ($=\text{CH}$) gruplarından gelen C-H pikleri olarak raporlanmıştır (Sabbar vd. 2019, Yang vd. 2020) . Aerojel yapı içeren kompozitler için yapılan FTIR analizinde genel yapı polistiren piklerinden oluşmakta olup yaklaşık 1100 cm^{-1} de olan pik silikadan gelen Si-O-Si bağından gelmektedir (Li vd. 2014).



Şekil 5.14. Grafen, arejel, grafen-aerojel takviyeli polistiren kompozitlerin FTIR analizleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında atık strafor matris malzeme, takviye olarak da farklı oranlarda grafen ve aerogel kullanılarak kompozitler üretilmiştir. Takviye elemanlarının mekanik ve yanma özelliklerine olan etkisi incelenmiş ve sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

6.1. Polistiren Matrisli Grafen Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Sonuçları

Tez çalışmasında grafen, ağırlıkça % 0, 0.15, 0.30, 0.45, 0.60, 0.75 ve 1 oranlarında polistiren matris kompozitlere takviye edilmiştir. Grafen katkısının kompozitlerin, çekme mukavemeti, Shore sertlik testi ve yanma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Sonuçlardan:

- Takviyesiz polistiren örneğinin maksimum çekme dayanımı 0.67 MPa iken, en iyi sonucu veren ağırlıkça %0.45 grafen içeren kompozit için 2.84 MPa elde edilmiştir. Shore sertlik testi sonucunda ise ağırlıkça %0.45 grafen için en yüksek değer 194 olarak elde edilmiştir. Grafenin bu değerin üzerine çıktığında çekme dayanımında ve sertlik değerinde düşüş gözlenmiştir.

- Bu kompozitlerin yanma test sonuçlarından ise grafen takviyeli kompozitlerin yanma kaybı %5.04 olarak tespit edilmiş, bu değer polistirene (%1.74) göre çok daha yüksek çıkmıştır. Başka bir ifadeyle grafen yanma hızını artırmıştır

6.2. Polistiren Matrisli Aerogel Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Sonuçları

Tez çalışmasının ikinci aşamasında, ağırlıkça farklı oranlarda (ağırlıkça % 3-6-9) aerogel ilavesi polistiren kompozite yapılmış, üretim sonrası aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Takviyesiz polistiren örneğinin maksimum çekme dayanımı 0.67 MPa iken, en iyi sonucu veren ağırlıkça %9 aerogel içeren kompozit için bu değer en yüksek 0.85 MPa olarak tespit edilmiştir. Ağırlıkça % 9 aerogel içeren kompozit için en yüksek sertlik değeri 202 olarak test edilmiştir.

- Aerogel takviyeli polistiren kompozitlerde yanmazlık testi sonucunda artan aerogel takviyesiyle ağırlıkça %9 aerogel için polistirene göre yanma oranı %1.74 ten %0.54'e gerilemiştir. Aerogel yanmazlığı artırıcı rol oynamıştır.

6.3. Polistiren Matrisli Grafen-Aerogel Takviyeli Kompozitlerin Deneysel Sonuçları

Tez çalışmasının diğer aşamasında mekanik özellik olarak en iyi özelliği veren grafen oranına (ağ. %0.45) farklı oranlarda erojel takviyesi yapılarak kompozitler üretilmiş, mekanik ve yanmazlık testleri yapılmıştır. Aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Takviyesiz polistiren maksimum çekme dayanımı 0.67 MPa, ağ.9% aerogel içeren kompozit için 0.85 MPa ve ağ.%0.45 grafen içeren kompozit için 2.84 MPa elde edilmiştir. Polistiren ağ. % 0.45 grafen içeren kompozite ağ.%3-6-9 aerogel ilavesi yapılmış çekme dayanımı sırasıyla 1.54, 2.7 ve 3.84 MPa olarak tespit edilmiştir. Takviyesiz polistirenin shore sertliği 162 iken aerogel takviyesiyle 150 civarı ölçülmüştür.

- Yanmazlık testi sonucundan ise takviyesiz polistirenin yanma kaybı 1.74 %, ağ.9% aerogel içeren kompozit için 0.54% ve ağ.%0.45 grafen içeren kompozit için 5.04% elde edilmiştir. Polistiren ağ. %0.45 grafen içeren kompozite ağ.%3-6-9 aerogel ilavesiyle yanmazlık %1.42 olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak belli bir değere kadar grafen takviyesi mekanik özellikler üzerine olumlu etki yaparken, yanmazlık özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Diğer taraftan optimum miktarda grafen içeren kompozisyona aerogel takviyesinin yapılması hem mekanik hemde yanmazlık konusunda polistirene göre daha yüksek sonuç vermiştir. Aerogel tek başına kullanıldığında daha çok yanmazlık özelliğinin gelişmesine katkı vermiştir.

6.4. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar

Bu çalışmanın devamında aşağıdaki çalışmalar yapılabilir.

- Üretilen kompozit malzemelerin ses yalıtım özellikleri incelenebilir.
- Üretilen kompozitlerin hidrofobik özellikleri incelenebilir.
- Üretilen kompozitlerin termal ve elektriksel iletkenliği incelenebilir.
- Aynı çalışma yoğun form yerinde gözenekli formda çalışılabilir.

KAYNAKLAR

- Akdoğan Eker, A. (2008). Plastik Matrisli Kompozitler. Ders notları. Erişim tarihi: 04.11.2008
- Anonim., (2010a). *Polystyrene properties*. [http:// zeus.phys.uconn.edu / wiki / images /Polystyrene - properties.pdf](http://zeus.phys.uconn.edu/wiki/images/Polystyrene-properties.pdf) (Erişim tarihi: Eylül 2010)
- Anonim., (2010b). *Aerojel*. [https:// science. howstuffworks .com /aerojel.htm](https://science.howstuffworks.com/aerojel.htm) (Erişim tarihi: 14.04. 2010)
- Anonim., (2013). *Strong And flexible Aerojel*. [https://roadtoabundance. Wordpress.com/strong-and-flexible-aerojels-aerojel-org/](https://roadtoabundance.wordpress.com/strong-and-flexible-aerojels-aerojel-org/) (Erişim tarihi: March 6, 2013)
- Anonim., (2017a). *Ucak yapiminda-kullanilan-malzemeler*. [https:// www. muhendisbeyinler. net/ucak yapiminda-kullanilan-malzemeler](https://www.muhendisbeyinler.net/ucak-yapiminda-kullanilan-malzemeler) (Erişim tarihi: 09/10/2017).
- Anonim., (2017b). *Polistiren nedir ve kullanım alanları nelerdir*. [https://www.techworm.com/polistiren-PS-nedir- kullanim-alanlari-nelerdir](https://www.techworm.com/polistiren-PS-nedir-kullanim-alanlari-nelerdir) (Erişim tarihi: 09/10/2017)
- Anonim., (2018a). *Polimer ve kullanım alanları*. [https://www.sihirlifasulyeler.com /birim/ polimerler-ve-kullanim-alanlari](https://www.sihirlifasulyeler.com/birim/polimerler-ve-kullanim-alanlari) (Erişim tarihi: 22.01.2018)
- Anonim., (2018b). *Filament winding a cost effective composites process* . [https://www.thecompositeshub-india.com/filament-winding--a-cost effective-composites-process](https://www.thecompositeshub-india.com/filament-winding--a-cost-effective-composites-process) (Erişim tarihi :06/03/2018)
- Anonim., (2020a). *Wikipedia.org*.(<https://tr.wikipedia.org/wiki/Aerojel>). 21 Haziran 2020
- Anonim., (2020b). *Aerojel*. [https://www.slideshare.net/SheenThomson /aerojel -64981751](https://www.slideshare.net/SheenThomson/aerojel-64981751)(Erişim tarihi: December 1, 2020)
- Anonim., (2020c). *Stiren-Vinilbenzen*. <http://www.turkchem.net/stiren-vinilbenzen.html> (Erişim tarihi: 06 Ocak 2020)
- Anthony, S., (2013). The Wonderful World Of Wonder Materials. Extreme Tech . Erişim tarihi: August 27, 2013
- Archana S. Patole., Shashikant P. Patole., Hyuck Kang., Ji-Beom Yoo., Tae-Ho Kim.,and Jeong- Ahn,H., (2010). A Facile Approach To The Fabrication Of Graphene/Polystyrene Nanocomposite By İn Situ Microemulsion Polymerization. Journal of ColLOId and Interface Science 350 (2010) 530–537
- Arıcasoy, O. (2006). *İstanbul Ticaret Odası Kompozit Sektör Raporu*. Erişim tarihi: Aralık, 2006, <https://www.yumpu.com/tr/document/view/23585208/kompozit-sektor-raporu-2006-ito>
- Ataş, C. (2018). Kompozit Malzemelere Giriş. Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Dokuz Eylül Üniversitesi
- Ateş Kut, T. (2005). Cam Elyaf Teknolojisi. Cam Elyaf Takviyeli Plastik Sanayicileri Derneği Ctp-Sander. Gebze / Kocaeli . Erişim tarihi: 18 mayıs 2005.
- Başçı, M. (2015). Geleceğin Malzemesi Grafen, Birleşim Dergisi, sayı 177, s. 156-165.
- Beşergil, B. (2016). *Kompozitler*. Gazi Kitabevi. 730, Türkiye
- Cai, w., Feng, X., Wang, B., Hu, W., Yuan, B., Hong, N., and Hu, Y. (2017). A Novel Strategy To Simultaneously Electrochemically Prepare And Functionalize Graphene With A Multifunctional Flame Retardant, Chemical Engineering Journal 316 (2017) 514–524

- Chen, Y., Zhang, X., Liu, E., He, CH., Shi, CH., Li, J., Nash, PH., and Zhao, N. (2016). Fabrication Of İn-Situ Grown Graphene Reinforced Cu Matrix Composites. Scientific Reports 6, Article number: 19363 (2016)
- Dadev, R. (2019). *Grafen Takviyeli Kalsiyum Fosfat Esaslı Seramik Köpük Malzemelerin Yapay Kemik Amaçlı Üretimi Ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Makine Ana Bilim Dalı. 2019 Samsun
- Dassioz, G. (2007). A Review Of The Pull-Out Mechanism In The Fracture Of Brittle-Matrix Fibre-Reinforced Composites. January 2007. Advanced Composites Letters 161(1) DOI:10.1177/096369350701600102
- Durgun, İ., ve Arge, T. (2014, Mayıs). “El Yatırma Yöntemi İle Kompozit Parça Üretimi”. *Konferans: 7. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu - MTS7 - Çankaya Üniversitesi: Ankara / Türkiye*.
- Evcin, A. (2017). Polimer Malzemeler. *Afyon kocatepe üniversitesi*. Erişim: 14.05.2017, <http://blog.aku.edu.tr/evcin/dersler/polimer-malzemeler>
- García, T., Gracia, I., Duque, G., Lucas, A.D., and Rodríguez, J.F. (2009). Study Of The Solubility And Stability Of Polystyrene Wastes In A Dissolution Recycling Process. Waste Management 29 (2009) 1814–1818
- Giryan, C. (2016). Grafen Nedir ve Özellikleri ve Kullanım Alanları. *Bilim ve Teknoloji*. Erişim tarihi: 19 Kasım 2016. <https://www.tech-worm.com/grafen-nedir-ozellikleri-kullanim-alanlari>
- Gürbüz, M. ve Mutuk, T. (2018). Effect Of Process Parameters On Hardness And Microstructure Of Graphene Reinforced Titanium Composites. Journal of Composite Materials, 52:4, 543-551.
- Gürbüz, M., T. Mutuk, T., ve Uyan, P. (2021). Mechanical, Wear and Thermal Behaviors of Graphene Reinforced Titanium Composites. Metals and Materials International volume 27, pages744–752
- Khagendra Kumar, Y., and Singh Lohchab, D. (2016). Influence of Aviation Fuel on Mechanical Properties of Glass Fiber-Reinforced Plastic Composite. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology Vol. 3, Issue 4, April 2016
- Kumar, H. G., P., and Xavier, M. A. (2014). Graphene Reinforced Metal Matrix Composite (GRMMC): A Review, Procedia Engineering, vol. 97, p. 1033-1040
- Li, et al., (2017). Thermal Conductivity of Graphene-Polymer Composites: Mechanisms, Properties and Application. Polymers 2017, 9, 437; doi:10.3390/polym9090437
- Li, Z., Cheng, X., He, S., Shi, X., Gong, L., and Zhang, H. (2016). Aramid Fibers Reinforced Silica Aerogel Composites With Low Thermal Conductivity And Improved Mechanical Performance. Volume 84, May 2016, Pages 316-325
- Liu, J., Wu, M. X., Yang, Y., Yang, G., Yan, H. X. and Jiang, K.L. (2018). Preparation And Mechanical Performance of Graphene Platelet Reinforced Titanium Nanocomposites For High Temperature Applications. Journal of Alloys and Compounds, 765, 1111-1118
- Lynwood, C., (2014). Polystyrene Synthesis, Characteristics And Applications. Chemistry Research And Applications. Published by Nova Science Publishers, Inc. New York
- Min Li, K., Jiang, J., Cong Tian, S., Jing Chen, X., and Yan, F. (2014). Influence of Silica Types on Synthesis and Performance of Amine–Silica Hybrid Materials Used for CO₂ Capture. 118, 2454–2462

- MinKim, H., JiNoh, Y., Yu, J., YunKim, S., and RyouNYouna, J. (2015). Silica Aerogel/Polyvinyl Alcohol (PVA) Insulation Composites With Preserved Aerogel Pores Using Interfaces Between The Superhydrophobic Aerogel And Hydrophilic PVA Solution. Volume 75, August 2015, Pages 39-45.
- Mohamed, R., Syed Mustaffa, S., Nurazzi Norizan, M., and Raja Mohamed, R. (2017). Thermal Degradation and Flammability of Aerogel Incorporated UPR/EPS Composites with Organic Nanocrystal Presence, National Symposium on Polymeric Materials 2017 (NSPM 2017) AIP Conf. Proc. 1985, 030018-1–030018-7
- Mutuk, T., ve Gürbüz, M. (2021). Si3N4/Graphene Binary Particles Reinforced Hybrid Titanium Composites And Their Characterization. International Journal of Materials Research, 8 / 2021
- Onat,A. (2015). Kompozit Malzemeler. Sakarya Meslek Yüksekokulu Makina ve Metal Teknolojileri Bölümü Metalurji Programı.
- Öztop, B. (2017). *Atık Alüminyum Kullanarak Grafen Ve Silisyum Nitrür Takviyeli Kompozit Üretimi Ve Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabirlik Dalı, 123, Samsun.
- Qing Bir, S., Li Meng, F., Zhen Zheng, Y., Han, X., Tao, X., and Feng Chen, J. (2014). High Efficiency And Stability Of Quasi-Solid-State Dye-Sensitized ZnO Solar Cells Using Graphene Incorporated Soluble Polystyrene Gel Electrolytes. Journal of Power Sources 272 (2014) 485e490
- Randviir, E. P., Brownson, D. A. C., and Banks, C. E. (2014). A Decade of Graphene Research: Production, Applications and Outlook, Materials Today, vol. 17, no. 9, p. 426-432.
- Sabbar, A., Mohammed, H.S, Ibrahim, A.R., and Saud, H.R. (2019). Thermal and Optical Properties of Polystyrene Nanocomposites Reinforced with Soot, Oriental Journal Of Chemistry, 2019, Vol. 35, No.(1): Pg. 455-460
- Simson, A., vd. (2020). Thermal Conductivity And Conditioning Of Grey Expanded Polystyrene Foams Polymers. Vol. 39(6) 238–262
- Şenel, M. (2018). *Grafen-Seramik Tanecik Takviyeli Alüminyum Matrisli Hibrit Kompozitlerin Toz Metalurjisi Metoduyla Üretimi, Mekanik Ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi*. Doktora Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabirlik Dalı, Samsun
- Şenel, M., ve Gürbüz, M. (2020). Microstructure And Wear Behaviour Of Graphene–Si3N4 Binary Particle-Reinforced Aluminium Hybrid Composites. Bulletin of Materials Science volume 43, Article number: 148 (2020)
- Şenel, M., ve Gürbüz, M. (2021a). Investigation on Mechanical Properties and Microstructure of B4C/Graphene Binary Particles Reinforced Aluminum Hybrid Composites. Metals and Materials International volume 27, pages2438–2449 (2021)
- Şenel, M., ve Gürbüz, M. (2021b). Investigation On Mechanical Properties and Microstructures of Aluminum Hybrid Composites Reinforced With Al2O3/Gnps Binary Particles. Arch. Metall. Mater. 66 (2021), 1, 97-106
- Şenel, M., ve Gürbüz, M. (2021c). Synergistic Effect Of Graphene/Boron Nitride Binary Nanoparticles On Aluminum Hybrid Composite Properties. Advanced Composites and Hybrid Materials (2021)
- Şenel, M., Gürbüz, M., ve Koç, E., (2018). Fabrication And Characterization Of Synergistic Al-Sic-Gnps Hybrid Composites, Composites Part B: Engineering, 154, 12 / 2018,
- Şenel, M., Gürbüz, M. ve Koç, E., (2015). Grafen Takviyeli Alüminyum Matrisli Yeni Nesil Kompozitler. Mühendis ve Makine, 56:669, 36-47.

- Thomas, G.P. (2012). What is Aerogel Theory, Properties and Applications. Azo Materials. Erişim Tarihi : Aug 22 2012
- Vasiliev, V and Morozov, E. V. (2001). Mechanics and Analysis of Composite Materials, 1. Basım, Elsevier Science Ltd. 2001
- Wang, j., Na Guo, L., Ming Lin, W., Chen, J., Lian Liu, CH., Da Chen, SH., Zhang, SH., and Tian Zhen, T. (2019). Effect Of The Graphene Content On The Microstructures And Properties Of Graphene/Aluminum Composites. New carbon materials, volume 34, issue 3, jun 2019, doi: 10.1016/s1872-5805(19)60016-8
- Wang, X., Tan,D., Chu,Z., Chen,L., Chen,X., Zhao, J., and Chen, G. (2016) .Mechanical Properties Of Polymer Composites Reinforced By Functionalized Graphene Prepared Via Direct Exfoliation Of Graphite Flakes İn Styrene., RSC Adv., 2016, 6, 112486 DOI: 10.1039/c6ra24479c
- Wang, Y., Qing, Y., Sun, Y., Zhu, M., and Dong, SH. (2020). A Study On Preparation Of Modified Graphene Oxide And Flame Retardancy Of Polystyrene Composite Microspheres, Designed Monomers And Polymers. 2020, Vol. 23, No. 1, 1–15
- Wu, H., Chen, Y., Chen, Q., Ding, Y., Zhou, X., and Gao, H. (2013). Synthesis of Flexible Aerogel Composites Reinforced with Electrospun Nanofibers and Microparticles for Thermal Insulation. Volume 2013, Article ID 375093
- Xu, Z. S., Shi, X. L., Zhai, W. Z., Yao, J., Song, S. Y. and Zhang, Q.X. (2014). Preparation And Tribological Properties Of Tial Matrix Composites Reinforced By Multilayer Graphene.Carbon. 67, 168-177.
- Yang, J., Wu, M., Chen, F., Fei, Z., and Zhong, M. (2011). Preparation, Characterization, And Supercritical Carbon Dioxide Foaming Of Polystyrene/Graphene Oxide Composites. J. Of Supercritical Fluids. 56 (2011) 201–207.
- Yang, L., and Zhen, W. (2020). Synthesis of Graphene Oxide-Polystyrene Graft Polymer Based on Reversible Addition Fragmentation Chain Transfer and Its Effect on Properties, Crystallization, and Rheological Behavior of Poly (Lactic Acid), Advances in Polymer Technology Volume 2020, Article ID 9364657, 16 pages
- Yastımoğlu, F., ve özkan, A. (2017). Tekrarlanan Yükler Altında Kompozit Malzemelerin Yapılarının İncelenmesini Amaçlayan Deney Aygıtı Tasarımı. Düzce Üniversitesi Birlik ve Teknoloji Dergisi, 5 (2017) 56-66
- Yığıt, B., Göktürk, K., ve Özçelik., S. (2006). Polistiren Üretim ve Uygulama Alanları. Kimya-Metalurji Fakültesi, Yıldız Teknik Üniversitesi. İstanbul, 2006
- Yılmaz, Ö. (2019). *Atık Alüminyum İçecek Kutuları Kullanarak Grafen/Sic Takviyeli Kompozitlerin Üretimi Ve Mekanik Karakterizasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Samsun.
- Yılmazoğlu, Ü. (2004). Kompozit Malzemelerin Elasto-Plastik Davranışının İncelenmesi, Birtirme projesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir
- Yılmaz, K. ve Dehghanpour, H. (2018). Grafen Özelliklerinin Araştırılması ve Çimento Esaslı Malzemelerde Katkı Maddesi Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi. March 2018
- Yoda, S., Takeshita, S., Ono, T., Tada, R., and Ota, H. (2021). Development of a New Silica Aerogel-Polypropylene Foam Composite as a Highly Flexible Thermal Insulation Material. Front. Mater. 8:674846. doi: 10.3389/fmats.2021.674846
- Yuan, B., Fan, A., Yang, M., Chen, X., Hu, Y., Bao, CH., Jiang, S., Niu, Y., Zhang, Y., He, S., and Dai, H. (2017). The Effects Of Graphene On The F L A M M A B İ L İ T A N

- D Fire Behavior Of Intumescent Flame Retardant Polypropylene Composites At Different Flame Scenarios. *Polymer Degradation And Stability*. 143 (2017) 42e56
- Zhang, T., Li, X., Kang, S.H., Qin, L., Yan, W., and Miao, J. (2013). Facile Assembly And Properties Of Polystyrene Microsphere/Reduced Graphene Oxide/Ag Composite. *Journal of Colloid and Interface Science* 402 (2013) 279–283
- Zhang, T., Huang, W., Zhang, N., Huang, T., Yang, J., and Wang, Y. (2017). Grafting Of Polystyrene Onto Reduced Graphene Oxide By Emulsion Polymerization For Dielectric Polymer Composites: High Dielectric Constant And Low Dielectric Loss Tuned By Varied Grafting Amount Of Polystyrene. *European Polymer Journal* 94 (2017) 196–20
- Zhao, J., Liu, Y., Cheng, J., Wu, S.H., Wang, Z., Hua, H., and Zhou, C. (2017). Reinforced Polystyrene Via Solvent-Exfoliated Graphene. Received: 20 March 2017. DOI 10.1002/pi.5435
- Zhao, W., Xin, Q., Qiao, L., Zou, J., Shao, J.P., and Wu, G. (2018). Microstructure And Mechanical Properties Of Graphene Nanoplates Reinforced Pure Al Matrix Composites Prepared By Pressure Infiltration Method. *Journal of Alloys and Compounds*, 732, 748-758.
- Zhu, J., Zhao, F., Xiong, R., Peng, T., Ma, Y., Hu, J., Xie, L., and Jiang, C.H. (2020). Thermal Insulation And Flame Retardancy Of Attapulgite Reinforced Gelatinbased Composite Aerogel With Enhanced Strength Properties Composites Part A: Applied Science And Manufacturing Volume 138, November 2020, 106040
- Zor, M. (2018). Kompozit Malzemelerle İlgili Genel Bilgiler. Kompozit Malzeme Mekaniği – Ders Notları . dokuz eylül üniversitesi – makina mühendisliği bölümü. Erişim tarihi: 10.01.2018

ÖZ GEÇMİŞ

İran da Mühendislik Fakültesi, Makina Bölümünden lisansı bitirdi. Sonra Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesin de Yüksek Lisansı başladı ve 2015 yılında mezun oldu. 2015 yılında OMÜ doktora programını girdi. İyi derecede Farsça, Azerice, Türkçe ve İngilizce bilmektedir. 02.11.2021

İletişim Bilgileri

ORKİT ID: <https://orcid.org/0000-0002-6728-3987>

