

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



MUNZUR
ÜNİVERSİTESİ
2008

FARKLI AMAÇLAR İÇİN HAZIRLANAN KOMPOZİTLERİN ISIL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hasan Kaan BERENT

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK

TUNCELİ - 2019

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI AMAÇLAR İÇİN HAZIRLANAN KOMPOZİTLERİN ISIL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Hasan Kaan BERENT
(162107103)

Anabilim Dalı: Makina Mühendisliği

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK

TUNCELİ – 2019

**T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

FARKLI AMAÇLAR İÇİN HAZIRLANAN KOMPOZİTLERİN ISIL ANALİZİ

**Hasan Kaan BERENT
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Bu tez .../.../2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından **oybirliği/oyçokluğu** ile kabul edilmiştir.

İmza:.....

İmza:.....

İmza:.....

Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK
(Munzur Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Faruk CAN
(Dicle Üniversitesi)

Dr. Öğr. Üyesi Erhan FIRAT
(Munzur Üniversitesi)

DANIŞMAN

ÜYE

ÜYE

Bu tez, Enstitümüz Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Prof. Dr. Numan YILDIRIM
Enstitü Müdürü
İmza ve Mühür

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Son yıllarda, hızla gelişen bilim ve teknoloji, polimer ve farklı amaçlar için hazırlanan kompozitlerin araştırılmasını ve kullanımını yaygınlaştırmıştır. Polimer esaslı kompozit malzemeler otomotiv, inşaat, elektronik, mobilya, medikal ve paketlenme gibi farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çağımızın gereği ve hızla gelişen üretim zincirinin bir halkası olarak, yüksek ısı performans istenen uygulamalarda uygun malzeme tedarik edilmesi büyük önem taşımaktadır. Giderek artan bu ihtiyacı karşılayabilmek için daha etkin ısı transferi sağlayan malzemelere gereksinim duyulmaktadır. Bu gelişmeler doğrultusunda, malzemelerin enerji verimliliği ve ısı transferini iyileştirme açısından çalışmalar hız kazanmaktadır. Bu sebeple, bu tür malzemeler üzerinde çalışılarak daha etkin bir ısı transferi sağlanıp, optimum enerji verimliliği hakkında veri elde edilmesi öngörülmektedir. Son yıllarda, ilgi çeken konulardan bir tanesi olan, polimer veya polimer esaslı kompozit malzemeler, diğer malzemelerle mukayese edildiğinde daha yüksek ısı iletkenlik ve daha uygun fiziksel özelliklere sahip oldukları için ısı verimi iyileştirmek amacıyla sektörde daha etkin malzemeler olarak kullanımları düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında, yukarıda sayılan etkenler birlikte değerlendirildiğinde, %20-30-40-50-60 Polipropilen (PP), %20-30 Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE) ve %20-30 yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen bütün kompozitlerin kararlı rejim yöntemiyle ısı iletim katsayıları belirlenmiş ve sonuçlar literatürde bulunan seri, paralel, geometrik ortalama, Russel ve Maxwell metodlarıyla kıyaslanmıştır. Yapılan deneysel analizler sonucu kompozitlerin fiziksel özellikleri belirlenmiş ve Ansys R19 programında kompozitlerin termal analizleri yapılmıştır. Son olarak deneysel ve nümerik analiz sonuçları karşılaştırılmış ve üretilen kompozitler için kullanım alanları önerilmiştir. Temin edilen saf polipropilen malzemesinin 0.12 W/mK olan ısı iletim katsayısının, deney numuneleri arasında takviye fazı %60 olan polipropilen kompozitinde 0.054 W/mK değerine kadar kademeli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Takviye işlemi AYPE ve YYPE malzemeleri içinde uygulanmış ve elde edilen kompozitlerin aynı şekilde ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. Deney sonuçlarından elde edilen verilere göre Ansys programında yapılan analizlerin, sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Tez aşamasında yapılan bu çalışmaların, malzemelerin ısı karakteristیکlerinin belirlenmesi adına bilime, uygulamaya ve topluma yarar sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Polimer Esaslı Kompozitler, Isıl Performans, Enerji Verimliliği

ABSTRACT

Thermal Analysis of Composites Prepared for Different Purposes

In recent years, rapidly developing science and technology has led to increase in research and use of composites prepared for polymer and different purposes. Polymer-based composite materials are widely used in different industries such as automotive, construction, electronics, furniture, medical and packaging. As a necessity of our age and a part of rapidly developing production chain, it is of great importance to supply the appropriate material in the applications where high thermal performance is desired. As a necessity of our age and a ring of rapidly developing production chain, it has great importance to supply the appropriate material in the applications where high thermal performance is desired. More efficient heat transfer materials are needed in order to meet the increasing need. In the light of these developments, the studies in terms of improving energy efficiency and heat transfer of materials are accelerated. For this reason, it is aimed to obtain more effective heat transfer by working on such materials and to achieve data on optimum energy efficiency. In recent years, polymer or polymer based composite materials, which are one of the subjects of interest, are thought to be used as more active materials in the sector in order to improve thermal efficiency as they have higher thermal conductivity and more appropriate physical properties compared to other materials.

In this study, %20-30-40-50-60 Polypropylene (PP), %20-30 Low Density Polyethylene (LDPE) and %20-30 High Density Polyethylene (HDPE) composite were produced. Heat conduction coefficients were determined by the steady - state process of all composites produced and the results were compared with the series, parallel, geometric mean, Russel and Maxwell methods in the literature. As a result of experimental analysis, the physical properties of composites were determined and thermal analyzes of composites were made in Ansys R19 program. Finally, the results of experimental and numerical analysis were compared with each other and the application areas were proposed for the composites. It has been observed that the heat conduction coefficient of the pure polypropylene material, which is 0.12 W/mK, was gradually decreased to 0.054 W/mK in the polypropylene composite with a reinforcement phase of 60% between the test samples. Reinforcement process was applied in LDPE and HDPE materials and heat conduction coefficients of composites were also determined. According to the data obtained from the experimental results, it was observed that the analyzes carried out in the Ansys program were consistent with the results. It is thought that these studies in the thesis stage will benefit to the science, the practice and the society in order to determine the thermal characteristics of the materials.

Key Words: Polymer Based Composites, Thermal Performance, Energy Efficiency

TEŞEKKÜRLER

Tez çalışmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösteren ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Erdem IŞIK’a, sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen eşim Ceylan BERENT’e teşekkürü bir borç bilirim.

Bu süreçte maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan başta babam Kasım BERENT olmak üzere aileme ve tüm arkadaşlarıma da sonsuz teşekkür ederim.

Hasan Kaan BERENT
TUNCELİ - 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET.....	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜRLER.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Literatür Taraması	1
1.2. Polimerler	4
1.3. Polimerlerin Sentezi (Polimerizasyon)	7
1.3.1. Katılma Polimerizasyonu	7
1.3.2. Basamaklı (Kademeli) Polimerizasyon	7
1.4. Polimerlerin Sınıflandırılması	8
1.4.1. Elde Edilişine (Kaynağına) Göre Polimerler	8
1.4.1.1. Doğal Polimerler	8
1.4.1.2. Sentetik Polimerler	9
1.4.1.3. Yarı-Sentetik Polimerler	9
1.4.2. Monomer Dizilimine Göre Polimerler	10
1.4.2.1. Homopolimer	10
1.4.2.2. Kopolimer	10
1.4.2.2.1. Ardışık Polimer	10
1.4.2.2.2. Blok Polimer	10
1.4.2.2.3. Graft (Aşı) Polimer	11
1.4.3. Zincir Şekillerine Göre Polimerler	12
1.4.3.1. Düz (Lineer) Zincirli Polimerler	12
1.4.3.2. Dallanmış Polimerler	12
1.4.3.3. Çapraz Bağlı Polimerler	12
1.4.4. Zincir Yapılarının Geometrik Dizilişine Göre Polimerler	13
1.4.4.1. Amorf Yapılı Polimerler	13
1.4.4.2. Kristal Yapılı Polimerler	14
1.4.5. Kimyasal Yapılarına Göre Polimerler	14
1.4.5.1. Organik Polimerler	14
1.4.5.2. İnorganik Polimerler	15
1.4.6. Fiziksel Özelliklerine Göre Polimerler	15
1.4.6.1. Termoplastikler	15
1.4.6.2. Termosetler	16
1.4.6.3. Elastomerler	17
1.5. Mühendislikte Sık Kullanılan Polimerler	18
1.5.1. Epoksi	18
1.5.2. Selüloz	19
1.5.3. Poliüretan	20
1.5.4. Alçak (Düşük) Yoğunluklu Polietilen	21

1.5.5. Yüksek Yoğunluklu Polietilen.....	21
1.5.6. Polietilen Tereftalat	21
1.5.7. Poliamid Naylon	22
1.5.8. Polipropilen.....	23
1.5.9. Polivinilklörür.....	23
1.5.10. Akrilonitril Bütadiyen Stiren	24
1.5.11. Polistren	24
1.6. Kompozit Malzemeler	26
1.7. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması	28
1.7.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma.....	29
1.7.1.1. Metal Matrisli Kompozitler	29
1.7.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler (SMK).....	29
1.7.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler	30
1.7.2. Takviye (Katki) Malzemesine Göre Sınıflandırma	31
1.7.2.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler	31
1.7.2.1.1. Cam (Fiber) Lifler	31
1.7.2.1.2. Aramid Lifler (Kevlar)	32
1.7.2.1.3. Karbon Lifler	33
1.7.2.1.4. Asbest Lifler	33
1.7.2.1.5. Çelik Lifler.....	34
1.7.2.1.6. Bor Lifler	35
1.7.2.2. Parçacık Takviyeli (Taneli) Kompozitler	36
1.7.2.3. Tabakalı Kompozitler	36
2. MATERYAL VE METOT	38
2.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri	38
2.1.1. Termoset Kompozit Üretim Yöntemleri.....	38
2.1.1.1. El Yatırma Yöntemi.....	38
2.1.1.2. Püskürtme Yöntemi	39
2.1.1.3. Basma ve Transfer Kalıplama Yöntemi	40
2.1.1.4. Soğuk Presleme Yöntemi	40
2.1.1.5. Filament (İplik) Sarma Yöntemi.....	41
2.1.1.6. Pultrüzyon (Profil Çekme) Yöntemi.....	41
2.1.1.7. Tabakalı Birleştirme	42
2.1.1.7.1. Basınçlı Torba Kalıplama.....	42
2.1.1.7.2. Vakum Torba Kalıplama	42
2.1.1.7.3. Otoklavda Torba Kalıplama	43
2.1.2. Termoplastik Kompozit Üretim Yöntemleri	44
2.1.2.1. Ekstrüzyon Yöntemi	44
2.1.2.2. Enjeksiyon Kalıplama.....	47
2.1.3. Termoset ve Termoplastik Kompozit Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması	50
2.2. Malzemelerin Isı İletim Katsayılarının Belirlenmesi	51
2.3. Malzemelerin Isı İletim Katsayısı Hesaplanmasında Kullanılan Teorik Metotlar	54
2.3.1. Seri Model	54
2.3.2. Paralel Model.....	54
2.3.3. Geometrik Ortalama Model	54
2.3.4. Maxwell Modeli.....	55

2.3.5. Fricke ve Burgers Modeli	56
2.3.6. Raghavan Modeli	56
2.3.7. Bruggeman ve Landauer Modeli	57
2.3.8. Lewis ve Nielsen Modeli	57
2.3.9. Russel Modeli	58
2.3.10. Cheng ve Vachon Modeli	59
2.3.11. Weiner Modeli	60
2.4. Isı İletim Katsayısı Hesaplanmasında Kullanılan Deneysel Metotlar	60
2.4.1. Kararlı (Sürekli) Rejim Yöntemleri	60
2.4.1.1. Lineer (Eksenel) Akış Yöntemi	61
2.4.1.2. Karşılaştırmalı Kesme Çubuk Yöntemi	61
2.4.1.3. Radyal Akış Yöntemi	64
2.4.2. Geçici Rejim Yöntemleri	64
2.4.2.1. Hot-Wire (Kızgın Tel) Yöntemi	64
2.4.2.2. Lazer-Flash Yöntemi	65
2.4.2.3. Sıcak Tel (İğneli Prob) Yöntemi	66
2.4.2.4. Angström Yöntemi	67
2.4.2.5. 3ω Yöntemi	67
3. BULGULAR	69
3.1. Isı İletim Katsayısı Sonuçları	69
3.2. Termal Analiz Sonuçları	74
3.2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	74
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	82
5. KAYNAKLAR	84
ÖZGEÇMİŞ	88

SEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Etilenin polietilene dönüşümü.....	4
Şekil 1. 2. Polietilen molekülünün gösterim biçimleri	5
Şekil 1. 3. Polimerizasyon Yöntemleri	7
Şekil 1. 4. Kaynağına göre polimerler şematik gösterimi.	8
Şekil 1. 5. Selülozdan glikoz elde edimi	9
Şekil 1. 6. Ardışık polimer dizilimi.	10
Şekil 1. 7. Blok polimer dizilimi	11
Şekil 1. 8. Graft (Aşı) polimer dizilimi.	11
Şekil 1. 9. Monomer dizilimine göre polimerlerin sınıflandırılması.....	11
Şekil 1. 10. Düz zincirli polimerlerin zincir yapısı.....	12
Şekil 1. 11. Dallanmış zincirli polimerlerin zincir yapısı.....	12
Şekil 1. 12. Çapraz bağlı polimerlerin zincir yapısı	13
Şekil 1. 13. Amorf yapılı polimerin mercek altında görünümü	13
Şekil 1. 14. Amorf yapılı polimerin mercek altında görünümü	14
Şekil 1. 15. Zeolit	15
Şekil 1. 16. Termoset reçine örnekleri.....	17
Şekil 1. 17. Termoplastik elastomer oluşumu	18
Şekil 1. 18. Reaksiyon esnasında epoksi malzemenin üç boyutlu bağlanması	19
Şekil 1. 19. Selüloz zincirinin gösterimi	20
Şekil 1. 20. Termoplastik poliüretan (TPU) ve poliüretan köpük (Termoset)	20
Şekil 1. 21. Polietilen tereftalat sentezi	22
Şekil 1. 22. Plastik Sektöründeki Fabrikaların Makine ve Teçhizat Dağılımı	25
Şekil 1. 23. Plastik Hammadde Üretimi	25
Şekil 1. 24. Kompozit malzeme oluşumu.....	26
Şekil 1. 25. Sürekli ve kesikli fiber kompozitlerin mikroskopik görünümü.	27
Şekil 1. 26. SiC metal matrisli kompozit malzemesi	29
Şekil 1. 27. Polimer matrisli kompozit üretimi iş akış şeması	30
Şekil 1. 28. Takviye malzemesi olarak kullanılan cam lifi görüntüsü	32
Şekil 1. 29. Kevlar moleküler yapısı	33
Şekil 1. 30. Asbest ham maddesi.....	34
Şekil 1. 31. Çelik liflerin şekilleri.....	35
Şekil 1. 32. Bor elyafın elde edilmesi.....	35
Şekil 1. 33. Parçacık takviyeli kompozitin mikroskopik görüntüsü	36
Şekil 2. 1. El yatırma yöntemi	39
Şekil 2. 2. Püskürtme yöntemi.....	39
Şekil 2. 3. Basma ve Transfer Kalıplama.	40
Şekil 2. 4. Filament sarma yöntemi	41
Şekil 2. 5. Pultrüzyon yöntemi şematik gösterimi.....	42
Şekil 2. 6. Vakum kalıplama işlemi.....	43
Şekil 2. 7. Otoklav çalışma prosesi.	43
Şekil 2. 8. Ekstrüzyon makinesi	45
Şekil 2. 9. Yoğunluk ölçer ve hassas ölçüm terazisi	46
Şekil 2. 10. Ekstrüzyon işlemi ile üretilen cam fiber takviyeli kompozitin oluşumu	47
Şekil 2. 11. Enjeksiyon kalıplama prosesi.....	48

Şekil 2. 12. Enjeksiyon kalıplama makinesi.....	49
Şekil 2. 13. Enjeksiyon kalıp ünitesi	49
Şekil 2. 14. Enjeksiyon kalıplama işlemi ile elde edilen kompozit malzemeler	50
Şekil 2. 15. Isı iletim katsayısı ölçüm yöntemlerinin şematik gösterimi.....	53
Şekil 2. 16. Russell ısı iletkenlik modeli	58
Şekil 2. 17. Lineer ısı iletim katsayısı belirleme düzeneği	61
Şekil 2. 18. Karşılaştırmalı kesme çubuk deney düzeneği	62
Şekil 2. 19. Isı iletim katsayısı ölçüm düzeneği	63
Şekil 2. 20. Sistemin kararlı hale gelmesinin beklenmesi	63
Şekil 2. 21. Radyal ısı iletim ölçüm sistemi	64
Şekil 2. 22. Kızgın tel yönteminin çalışma prensibi.....	65
Şekil 2. 23. Lazer-Flaş yönteminin şematik gösterimi.	66
Şekil 2. 24. İğneli prob cihazı.....	66
Şekil 2. 25. 3ω metodu şematik gösterimi.....	67
Şekil 3. 1. CTPP kompozitlerin ısı iletim katsayılarının karşılaştırılması	72
Şekil 3. 2. CTAYPE kompozitlerin ısı iletim katsayılarının karşılaştırılması	73
Şekil 3. 3. CTYYPE kompozitlerin ısı iletim katsayılarının karşılaştırılması	73
Şekil 3. 4. Kompozit malzeme üzerine mesh atılması.....	75
Şekil 3. 5. %20 CTPP kompozitinin yüzey sıcaklık dağılımı	76
Şekil 3. 6. %20 CTPP kompozitinin doğrusal ısı akışı dağılımı	76
Şekil 3. 7. %30 CTPP kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı	77
Şekil 3. 8. %40 CTPP kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı	77
Şekil 3. 9. %50 CTPP kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı	78
Şekil 3. 10. %60 CTPP kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı	78
Şekil 3. 11. %20 CTAYPE kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı	79
Şekil 3. 12. %30 CTAYPE kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı	80
Şekil 3. 13. %20 CTYYPE kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı.....	81
Şekil 3. 14. %30 CTYYPE kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı	81

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1. Polimerlerin üretim yılına göre tarihsel gelişimi.....	6
Tablo 1. 2. Termoset ve termoplastik malzemeler arasındaki farklar	17
Tablo 1. 3. Bazı PA naylon türlerinin yoğunlukları	22
Tablo 1. 4. Cam lifleri türleri ve bazı fiziksel özellikleri	32
Tablo 2. 1. Deney malzemelerinin yoğunlukları.....	46
Tablo 2. 2. Termoset ve termoplastik kompozit üretim yöntemlerinin karşılaştırılması ...	51
Tablo 2. 3. Bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları	53
Tablo 2. 4. Bazı ölçüm yöntemlerinin özellikleri.....	68
Tablo 3. 1. Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri	69
Tablo 3. 2. %20 CTPP'nin sistemdeki sıcaklık dağılımları	70
Tablo 3. 3. Üretimi yapılan kompozitlerin ısı iletim katsayıları	71
Tablo 3. 4. CTPP kompozitlerinin teorik model ve deneysel metot sonuçları.....	71
Tablo 3. 5. CTAYPE kompozitlerinin teorik model ve deneysel metot sonuçları.....	72
Tablo 3. 6. CTYYPE kompozitlerinin teorik model ve deneysel metot sonuçları.....	72

SEMBOLLER LİSTESİ

A: Alan (m^2)

ABS: Akrilonitril Bütadiyen Stiren

AYPE: Alçak Yoğunluklu Polietilen

C_p : Özgül ısı (kJ/kgK)

CTAYPE: Cam Takviyeli Alçak Yoğunluklu Polietilen

CTPP: Cam takviyeli Polipropilen

CTYYPE: Cam Takviyeli Yüksek Yoğunluklu Polietilen

d: Levha kalınlığı (m)

dx: Isı transferinin gerçekleştiği uzunluk (m)

dT: Sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)

EPS: Ekstrüde Polistren

F: İki malzemenin ortalama sıcaklık farkı oranı

k: Isı İletim Katsayısı (W/mK)

k_{ef} : Efektif ısı iletim katsayısı (W/mK)

k_g : Gözenekli malzemenin ısı iletim katsayısı (W/mK)

k_m : Matris malzemenin ısı iletim katsayısı (W/mK)

K: Kelvin sıcaklık birimi

K_R : Bilinen malzemenin ısı iletim katsayısı (W/mK)

K_S : Bilinmeyen malzemenin ısı iletim katsayısı (W/mK)

L: Uzunluk (m)

MMK: Metal Matrisli Kompozitler

n: Deneysel geometrik gözenek sabiti

P: Porozite oranı

PA: Poliamid

PE: Polietilen

PET: Polietilen Tereftalat

PMK: Polimer Matrisli Kompozitler

PP: Polipropilen

PS: Polistren

PU: Poliüreta

PVC: Polivinilklorür

r: Yarıçap (m)

SMK: Seramik Matrisli Kompozitler

TPU: Termoplastik Poliüretan

u: Isı Geçirgenlik Katsayısı (W/m^2K)

YYPE: Yüksek Yoğunluklu Polietilen

Q: Isıl Enerji (W)

°C: Celcius Sıcaklık Birimi

λ : Isı İletim Katsayısı (W/mK)

λ_f : Takviye Malzemenin Isı İletim Katsayısı (W/mK)

λ_p : Polimer Malzemenin Isı İletim Katsayısı (W/mK)

v_f : Katkı Malzemesi hacimsel oranı

v_g : Gözenek Hacim Oranı

δ : Matris geometri formu

ϕ : Boşluk oranı

$\Delta T_{1,2}$: Sıcaklık farkı ($^{\circ}C$)

ρ : Yoğunluk (gr/cm^3)

1. GİRİŞ

Polimer ve kompozit malzemelerle ilgili gerek yurt içi gerekse yurt dışında birçok çalışma yapılmaktadır. Fakat ülkemizde ki çalışma örnekleri yurt dışındaki çalışmalara göre nispeten sınırlı kalmıştır. Polimer ve kompozit malzemeler, yapı sektöründen havacılık ve uzay araştırmalarına, enerji sektöründen gıda sanayiye kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Bu malzemeler üzerinde yapılan bilimsel çalışmalar günümüz teknolojisi ile birlikte değerlendirildiğinde gelişmelerin devam ettiği gözlemlenmektedir.

Literatürdeki sınırlı bilgilerden dolayı bu çalışmada; mühendislikte sık kullanılan polimer malzemeler olan polipropilen (PP), alçak yoğunluklu polietilen (AYPE), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) ve 3 mm kırık cam fiber takviye malzemesi çeşitli hacimsel oranlarda birleştirilerek kompozit malzeme üretimi yapılmıştır. Toplam 9 adet üretimi gerçekleştirilen farklı numunelerin, deneysel olarak ısı iletim katsayısı tayin edilmiş ve teorik olarak ısı iletim katsayısı hesaplayan formüllerle karşılaştırılmıştır. Daha sonra bu kompozitlerin modellenmesi, Ansys programında hazırlanıp malzemelerin termal analizi yapılmıştır. Yapılan deneysel ve nümerik analizler mukayese edilmiş, takviye oranlarına göre malzemelerin özelliklerinde ki değişimler irdelenmiştir.

1.1. Literatür Taraması

İşiker ve Yeşilata (2017), yaptıkları çalışmada kompozit yapı malzemelerinin ısı performansının hesaplanmasındaki güçlüklerle dikkat çekmiştir. Günümüz teknolojisindeki mevcut ısı iletim katsayısı ölçer cihazlardan, homojen yapıda bulunan malzemeler için bile düşük doğrulukta sonuçlar elde edildiğinden bahsetmiştir. Yaptıkları çalışmada farklı lif takviyeli betonlarla, homojen beton malzemesini mukayese etmiş ve mutlak ısı iletim katsayısını bulmak için yeni bir yöntem geliştirmiştir. Sonuç olarak bu yöntemle tüm numunelerin, eski yöntemlere göre ısı iletim katsayılarının daha doğru sonuç elde edildiğinden bahsetmiştir.

Pehlivanlı (2016), çalışmasında PP'nin üstün malzeme özelliklerinden bahsetmiştir. PP'nin yapı alanlarında yalıtım malzemesi olarak kullanıldığını ve PP esaslı kompozitlerle,

borik asit hammaddesinin ısı iletim katsayısını daha iyi duruma getirerek enerji verimliliği elde edilebileceğinden söz etmiştir. Bu nedenle çalışmada % 0.5-2.5 leri arasında değişen borik asit takviyeli polimerik kompozitler üretmiştir. Ekstrüzyon ile elde edilen kompozit malzemelerden son olarak enjeksiyon yöntemiyle sıcak şekillendirme işlemi gerçekleştirilip, deney numuneleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmayla PP esaslı kompozit malzemeler içerisinde parçacık takviye elemanı olarak kullanılan borik asidin ısı iletim katsayısını düşürücü etkide olduğu gözlemlenmiştir.

Kumlutaş ve Tavman (2003), katkı malzemesi olarak alüminyum oksit tanesi kullanılan polimer esaslı kompozitlerin ısı iletim katsayısını farklı hacimsel birleşimlerde deneysel olarak irdelenmiştir. İlk olarak matris fazı olarak kullanılan toz polietilenle, toz halinde tedarik edilen alüminyum oksit taneleri belirli oranlarda birleştirilerek deney numuneleri elde edilmiştir. Toz halinde birleştirilen karışımlar belirli sıcaklık ve basınç altında sıkıştırılıp ölçüm yapılacak kompozit numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan örnekler belirli sıcaklık aralıklarında ölçüm yapabilen cihaz yardımıyla ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. Son olarak elde edilen veriler, literatürdeki teorik sonuçlarla karşılaştırılıp irdelenmiştir.

Yeşilata ve ark. (2007), yapı sektörünün vazgeçilmez malzemesi olan beton malzemelerin ısı iletim katsayılarının düşük olmasından dolayı doğru ölçüm hassasiyetinin çok güç olması ve ölçüm yapılan malzeme boyutlarının genelde büyük olmasından dolayı test süresinin çok uzun sürdüğünü belirtmiştir. Bu çalışmada, beton matrisli kompozit malzemelerin ısı ölçümlerinin mevcut tekniklerle zor olduğunu bundan dolayı laboratuvarında geliştirdikleri basit ve ekonomik bir ısı ölçüm yöntemiyle yaptıkları ölçümlerin daha hassas sonuçlar verdiğini belirtmiştir.

Özdemir ve ark. (2018), PP esaslı kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak odun unu ve sepiolit minerali kullanarak malzemenin ısı iletim katsayısını iyileştirmeyi hedeflemiştir. Çift vidalı ekstrüzyon makinesi ile bu üç malzeme birleştirilerek odun plastik kompozit elde edilmiştir. Üretilen numune üzerinde ısı iletim katsayısının belirlenmesinin yanında çeşitli testler yardımıyla termal özellikleri de belirlenmiştir. Son olarak elde edilen numunelerin içerisinde ki sepiolit minerali yüzdesi arttıkça kompozit malzemelerin termal ve ısı iletim katsayısı özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir.

Yang ve ark. (2015), yaptıkları çalışmada polimer nanokompozitlerin tek başlarına hareket eden bireysel bileşenlerle elde edilemeyen eşsiz fizyokimyasal özellikler gösterdiklerini belirtmiştir. Bu gözden geçirme makalesinde temel olarak, polimer nanokompozitlerin; enerji depolama, savunma sistemi ve güvenlik endüstrisi gibi çok yönlü uygulamalar için ümit vaat eden potansiyelleri nedeniyle araştırılması gerektiğine değinmiştir.

Huang ve ark. (2018), gerçekleştirdikleri bir çalışmada, polimerlerin ısı iletkenliğini arttırmanın son 20 yıl içerisinde çok aktif şekilde araştırılan bir konu olduğuna değinmiştir. Bu makale, polimerlerin termal taşıma mekanizmaları üzerindeki moleküler seviye anlayışını, polimer morfolojisini, zincir yapısı ve zincirler arası bağlanması açısından sistematik olarak özetlemiştir. Nanoyapılı polimerlerin ve polimer nanokompozitlerin ısı iletkenliğini arttırmaya yönelik gerekçeler belirtilmiştir. Son olarak, yüksek ısı iletken polimer ve polimer nanokompozitlerdeki ana gelişmeler ve değerlendirmeler belirtilmiştir.

Chen ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada, termal dengenin; cihazların performansı, kullanım ömrü ve güvenilirliği açısından kritik öneme sahip olduğunu belirtmiştir. Bu durumun üstesinden gelebilmek için arttırılmış ısı iletkenliğe sahip yeni polimer bazlı kompozitlerin temel tasarım prensipleri ele alınmıştır. Isı iletim katsayısını iyileştirmek için polimer esaslı kompozitlerin mikro yapısının incelendiği son gelişmelere dikkat çekmiştir. İncelemeler içerisinde ayrıca ısı iletkenliği iyi olan polimer kompozitlerin bazı yeni uygulamaları özetlenmiştir.

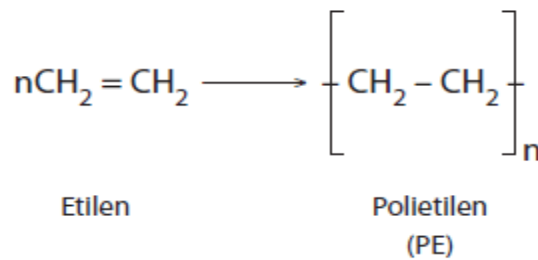
Jenarthanan ve ark. (2018), yaprak yayının kolay üretim maliyeti ve iyi yük taşıma kapasitesi nedeniyle ticari araçlarda yaygın olarak kullanılan en eski bileşenler olduğunu belirtmiştir. Aracın performansını kaybetmeden yakıt ekonomisini iyileştirmenin en etkili yolu aracın ağırlığını azaltmaktır. Dolayısıyla, otomotiv endüstrisinde kompozit malzemelerin kullanımı kademeli olarak artmaktadır. Bu araştırma makalesinde, yaprak yay malzemesi olarak karbon-cam epoksi kompozit malzemesi önerilmiştir. Numune, gerilme mukavemeti, darbe dayanımı ve eğilme dayanımı için imal edilmiş ve mekanik olarak test edilmiştir. Yaprak yayının modellenmesi ayrıca FEA Ansys 16.2 kullanarak yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Baydar ve ark. (2011), yapmış oldukları çalışmada eskiden kompozitlerde matris olarak termoset fazının yoğun olarak kullanıldığını ama günümüz teknolojisiyle birlikte malzemenin davranış özelliklerinin değişiminin zaruri bir hal almasından dolayı artık termoplastik matrisli kompozitlerin kullanımının yaygınlaştığını vurgulamıştır. Bu sebeple çalışmalarında termoplastik malzeme olan PP ile takviye olarak sürekli E tipi cam fiber malzeme kullanmışlardır. Üretilen malzemeler, mekanik ve fiziksel özelliklerini belirlemek için bir dizi teste tabi tutulmuştur. Sonuç olarak maleik anhidrit bazlı kompozitin mukavemetinin, uyumlaştırıcı kullanılmayan kompozite oranla %65 daha iyi olduğu tespit edilmiştir.

Özel ve ark. (2015), gerçekleştirdikleri bu çalışmada polimer esaslı betonların farklı plaka sıcaklıklarında ve kompozit içerisinde farklı hacimsel birleşme oranlarını gözeterek ısı iletim katsayısı değişimlerini gözlemlemiştir. Çalışmada iki farklı termoset, takviye elemanı olarak kum ve termoplastik olarak PP kullanarak polimer beton numuneleri hazırlanmıştır. Bütün fazlar için beş farklı plaka sıcaklığında ve üç farklı hacimsel bileşimde ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. Sonuç olarak, polimer beton bileşen oranları ve plaka sıcaklıklarının artmasıyla ısı iletim katsayısının değiştiği gözlemlenmiştir.

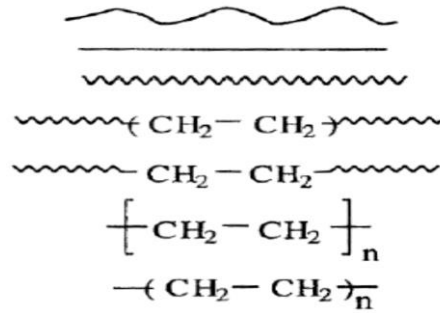
1.2. Polimerler

Polimerler birden fazla molekülün kovalent bağlarla bir araya gelerek oluşturduğu büyük molekül zincirleridir. Monomer denilen küçük moleküller birbirleri arasında polimerizasyon tepkimesine uğrayarak kimyasal bağ zincirleri oluştururlar ve yeni oluşan bu molekül zincirine polimer denmektedir. Şekil 1. 1’de etilen monomerlerinin polietilene dönüşümü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. 1. Etilenin polietilene dönüşümü (Saçak, 1998).

Etilen monomerinin, polimerizasyon tepkimesine uğraması sonucu yukardaki şekilde görüldüğü üzere polietilen elde edilir. Polietilen polimerizasyonunda görüldüğü gibi diğer tüm polimerizasyon tepkimelerinde de birçok mikro molekül birbirleri arasında kimyasal bağ yaparak uzun polimer zincirleri oluşturur. Bundan dolayı polimer zinciri, makro molekül ve polimer molekülü kavramları birbirleri yerine kullanılabilir. Lineer bir polietilen molekülü Şekil 1.2'deki gibi farklı biçimlerde gösterilebilir (Saçak,1998).



Şekil 1. 2. Polietilen molekülünün gösterim biçimleri (Saçak, 1998).

Polimer malzemeler, monomerler veya tepkimeye girebilecek reaktif fonksiyonel malzemelerle gerekli bağlantılar sağlanarak kimyasal tepkimelerle elde edilebilir. Polimer malzemeler genellikle yüksek molekül ağırlıklı, uygun camsı sıcaklıklarda, hem eriyik hem de çözelti halinde yüksek viskoziteye sahip, sünek malzeme özelliği sergiyebilen malzemelerdir. Polimerler bu eşsiz özellikleriyle birçok endüstri alanında kullanılmaktadır. Örneğin, gıda ambalajlarında, ev eşyalarında, tıbbi cihazlarda ve inşaat malzemelerinde uygun mühendislik özelliklerinden dolayı polimerler tercih edilmektedir (Kumar ve Gupta, 2003).

Polimer malzemelerin yaygın kullanılmalarının sebepleri hafif, yüksek dayanımlı, güvenli ve düşük maliyetli olmalarıdır. Hemen hemen tüm endüstri alanlarında kullanılabilirler. Polimer matrisli malzemeler, farklı şekillerde üretiltiklerinden dolayı tasarımlarında herhangi bir ölçüt yoktur ve bu sebeple kullanıldığı alanın gereksinimlerine göre üretilirler. Yani istenilen mühendislik uygulamasına göre; sert, esnek, takviyeli, takviyesi, pürüzsüz veya gözenekli halde kolayca üretilirler.

Polimer molekülleri, monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilir. Polimerlerin malzeme olarak işlenebilmesi için bazı ön uygulamalar gerekmektedir çünkü polimerler çoğu zaman tek başlarına işlenemezler. Genellikle istenilen özellikleri elde etmek için uygun takviye malzemesi ve bu malzemelerin doğru şekilde yapılandırılması gerekmektedir. Polimerizasyonun ana parametreleri ise ısı, basınç ve zamandır (Biron, 2007).

Polimerik kompozit malzeme üretiminde polimer esaslı malzeme, takviye ve benzeri dolgu malzemeleriyle karıştırılarak ön ürün hazırlanır. Plastik şekillendirme yöntemlerinden başlıcaları olan ekstrüzyon, enjeksiyon ve kalıplama yöntemleri ile ürün elde edilir. Bu üretim yöntemlerinden herhangi biriyle imal edilen ürün “plastik” olarak tanımlanır (Savaşçı ve ark., 2002).

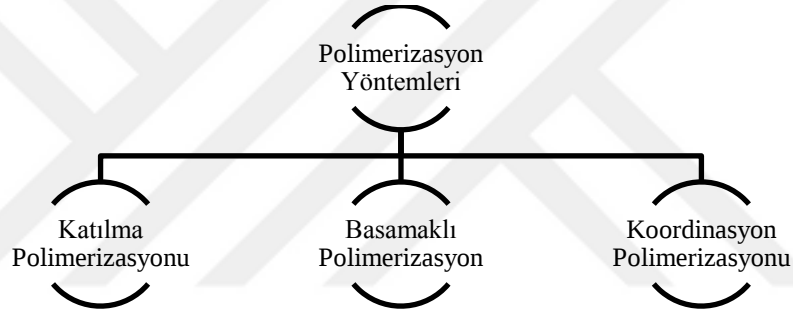
Polimer malzemeler eski zamanlardan çağımıza kadar mevcut teknolojik koşullarla birlikte geliştirilmiştir. Tablo 1.1’de üstün özellikleriyle öne çıkan polimerlerin üretim yıllarına göre tarihçesi verilmiştir.

Tablo 1.1. Polimerlerin üretim yılına göre tarihsel gelişimi (Ram, 1997).

Polimer	Yıl
Selüloz	1870
Anilin-Formaldehit	1926
Selülozik asetat	1927
Polimetil metakrilat	1931
Polivinilklorür	1936
Polistren	1938
Alçak Y. Polietilen (AYPE)	1939
Melamin	1939
Teflon	1943
Polietilen tereftalat (PET)	1945
Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS)	1946
Epoksi	1947
Poliüretan	1953
Yüksek Y. Polietilen (YYPE)	1954
Polikarbonat	1958
Polipropilen	1959
Polibütilen	1965
Aromatik Poliamid (Kevlar)	1972
Polieterimit	1982
Termotropik polyester	1984

1.3. Polimerlerin Sentezi (Polimerizasyon)

Monomer molekülleri kovalent bağlarla bir araya gelerek polimere dönüşür ve bu olaya polimerizasyon denir. Polimerizasyon, polimerleşme ve polimer sentezi gibi ifadelerle de tanımlanabilir. Polimer üretiminde kullanılan yöntemler üretim işlemleri göz önüne alınarak basamaklı polimerizasyon ve katılma polimerizasyonu adı altında ikiye ayrılır. Polimer sentezine, uygun katalizör kullanılarak gerçekleştirilen koordinasyon polimerizasyonu katılma polimerizasyonlarının bir türevidir fakat nispeten farklı bir polimerizasyon çeşidi olarak sınıflandırılabilir. Koordinasyon polimerizasyonunda, sentezlenen polimerdeki monomer dizilimi kontrol edilebilmektedir. Şekil 1.3'te polimerizasyon yöntemlerinin şematik olarak sınıflandırılması gösterilmiştir (Saçak,1998).



Şekil 1. 3. Polimerizasyon Yöntemleri (Saçak, 1998).

1.3.1. Katılma Polimerizasyonu

Katılma polimerizasyonu, monomer moleküllerin uygun koşullar altında ki mol kütesine bağlı miktarlarda sentezlenmesiyle yan ürün oluşturmaksızın gerçekleşmektedir. Katılma polimerizasyonunun gerçekleşmesi için uygun sıcaklık ve basınç temel unsurlardır. Katılma polimerizasyonu ile elde edilen termoplastik malzemelerde tek tür monomer kullanılmışsa homopolimer, farklı monomerlerin sentezi ile oluşturulması halinde ise kopolimer olarak adlandırılır (Yaşar, 2001).

1.3.2. Basamaklı (Kademeli) Polimerizasyon

Basamaklı polimerizasyon karışık işlevselliğe sahip iki monomerin kimyasal tepkimeye girmesiyle oluşur. Basamaklı polimerizasyon mekanizması için temel unsur

birleşme meydana gelirken gerçekleşen yoğuşma tepkimesidir. Yoğuşma tepkimesi sonucu ortamdan genelde su ve küçük bir molekül ayrılarak polimer oluşmaktadır (Ram, 1997).

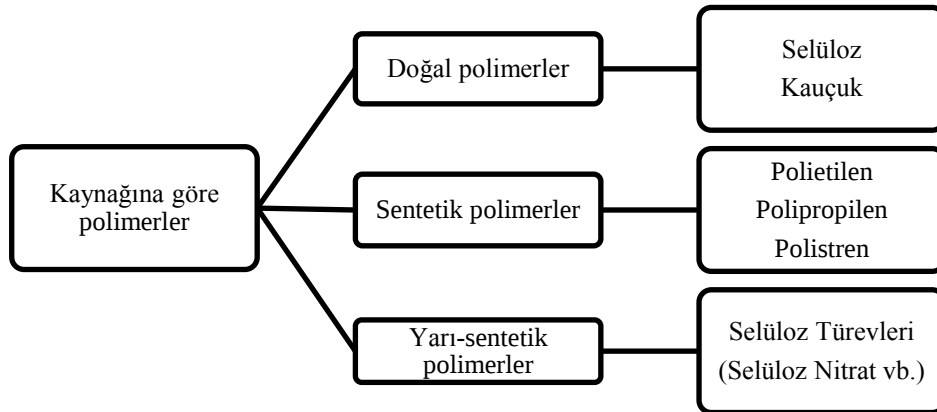
1.4. Polimerlerin Sınıflandırılması

Polimerler; kaynaklarına, kimyasal bileşimlerine, ısı ve çözücüye karşı davranışlarına, fiziksel durumlarına ve sentez yöntemlerine göre farklı şekillerde sınıflandırılabilirler.

1.4.1. Elde Edilişine (Kaynağına) Göre Polimerler

Polimerler, doğal veya sentetik olmak üzere iki farklı formda olabilir. Doğada bulunan polimerlerin (doğal polimer) farklı sentezleri ile üretilen polimerlere yarı-sentetik polimerler denir. Doğal selülozdan elde edilen selüloz türevleri yarı-sentetik polimerlere örnek olarak verilebilir (Pişkin, 1987).

Elde edilişine (kaynağına) göre polimerlerin şematik gösterimi temel olarak Şekil 1.4'teki gibidir.

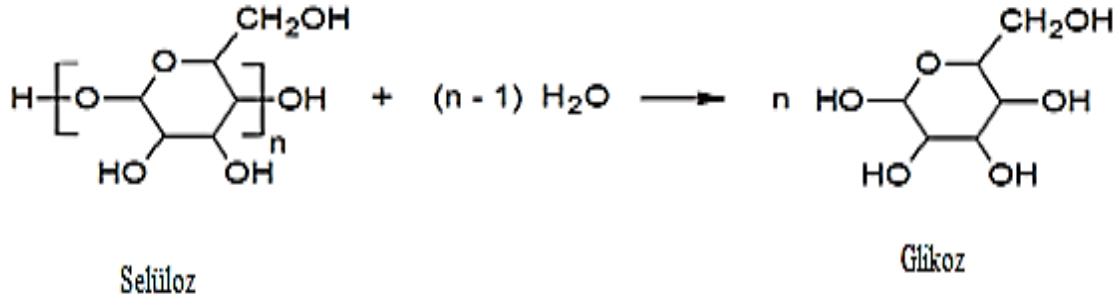


Şekil 1. 4. Kaynağına göre polimerler şematik gösterimi (URL-1, 2019).

1.4.1.1. Doğal Polimerler

Doğal polimerler, doğada kendiliğinden bulunan veya doğal olaylar esnasında oluşan polimerlerdir ve eski çağlardan bugüne dek insanlar hemen hemen her dönem doğal polimerleri farklı alanlarda kullanmışlardır. Birçok farklı formda doğal polimerler

mevcuttur. Bitkilerin temel bileşeni olan selüloz doğal bir polimerdir ve pamuk gibi birçok ürünün ana malzemesidir. Selülozdan glikoz sentezi Şekil 1.5'te ki gibi ifade edilir.



Şekil 1. 5. Selülozdan glikoz elde edimi (Ram, 1997).

1.4.1.2. Sentetik Polimerler

Bazı ön uygulamalarla, doğal polimerlerin ana kimyasal yapılarında değişim yapılarak farklı özelliklere sahip polimerler elde edilebilir. Bu işlemler sonucu oluşan polimerler, “sentetik polimerler” olarak adlandırılır. Sentetik polimerlerin polimerizasyonunda ön ürün olarak çoğu zaman petrol kullanılmaktadır. Bu polimerlerin tarihi gelişimine bakıldığında ise ilk sentezlenen türevi bakalittir. Bakalit polimeri, üretildikten sonra sentetik polimerler endüstride birçok kullanım alanına girmiştir. Daha sonra Polietilen (PE), Polistren (PS) ve Polivinilklorür (PVC) gibi en çok bilinen sentetik polimerler üretilmiştir. Günümüz teknolojisiyle birlikte yeni sentetik polimerler üretilmeye ve geliştirilmeye devam etmektedir.

1.4.1.3. Yarı-Sentetik Polimerler

Sentetik polimerlerin alt grubu olarak değerlendirilen yarı sentetik polimerler, sentetik polimerlerin polimerizasyonuna benzer bir sentez işlemiyle elde edilirler. Bu polimerler, doğal polimerlerin kimyasal yapıları kısmen değiştirilerek elde edildiklerinden yarı sentetik polimer olarak ifade edilirler. Örneğin, doğal polimer grubundaki selülozun alt grubu olan selüloz hidroksil çözünmez karaktere sahiptir. Fakat selüloz hidroksil uygun çözücüler yardımıyla çözünerek selüloz triasetat maddesi elde edilebilir.

1.4.2. Monomer Dizilimine Göre Polimerler

1.4.2.1. Homopolimer

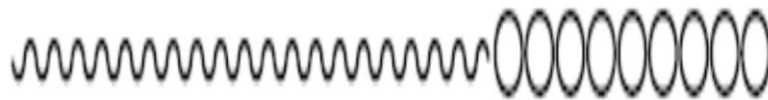
Aynı monomerlerin birbirleri arasında bağ yaparak oluşturduğu polimerlere denir. Yapısında farklı molekül bulundurmazlar ve saf olarak nitelendirilebilirler. Otomotiv sanayiden gıda ve inşaat sektörüne kadar birçok alanda yaygın olarak kullanılırlar. PE ve PP, homopolimerlere örnek olarak verilebilir.

1.4.2.2. Kopolimer

İki veya daha fazla monomerin polimerize olması ile oluşan polimerlerdir. Kopolimerler, elastomerlerde yaygın olarak kullanılır. Kopolimerler birbirleri arasında yaptıkları bağ çeşitlerine göre sınıflandırılabilirler (Ram, 1997).

1.4.2.2.1. Ardışık Polimer

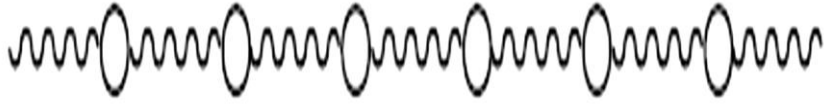
İki polimerin bir araya gelerek (hiçbiri kendi başına polimerleşemez) tek bir kopolimer sentezlenmesi durumudur. Ardışık polimer konfigürasyonu Şekil 1.6'daki gibidir.



Şekil 1. 6. Ardışık polimer dizilimi (Kumar ve Gupta, 2003).

1.4.2.2.2. Blok Polimer

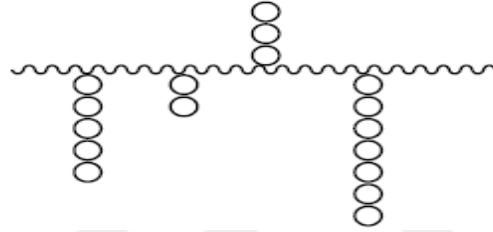
Birden çok monomerin, monomer besleme prensibi ile bir araya gelerek sentezlenmesi ile ortaya çıkan polimerlerdir. Monomer besleme karışımı yeterince büyükse bu polimer blok polimer olarak adlandırılır. Mevcut gösterimi Şekil 1.7'deki gibidir.



Şekil 1. 7. Blok polimer dizilimi (Kumar ve Gupta, 2003).

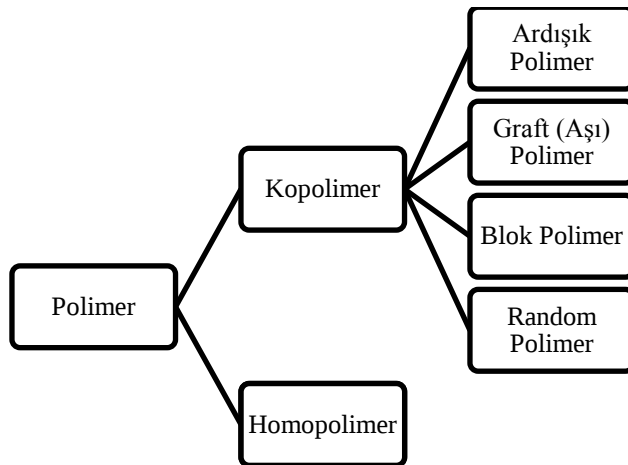
1.4.2.2.3. Graft (Aşı) Polimer

Kopolimerizasyon ile çok çeşitli polimerler elde edilebilir. Bu polimerlerden biri ise aşı polimerlerdir. Aşı polimerler ana zincirine farklı bir monomerin tekrarlandığı yan grupların eklendiği polimerlerdir. Şekil 1.8’de gösterildiği üzere ana zincirine ek diğer zincirden oluşan bir dal gibi görülür (Ram, 1997).



Şekil 1. 8. Graft (aşı) polimer dizilimi (Kumar ve Gupta, 2003).

Monomer dizilimine göre polimerlerin genel olarak sınıflandırılması Şekil 1.9’daki gibidir.



Şekil 1. 9. Monomer dizilimine göre polimerlerin sınıflandırılması (URL-1, 2019).

1.4.3. Zincir Şekillerine Göre Polimerler

Birden fazla monomerin birleşimiyle oluşan polimerlerin, monomerler arası bağlanma biçimleri farklı modifikasyonlarda olabilir. Bundan dolayı polimerler, monomerlerin birbirlerine bağlanmasıyla oluşan zincirlerin çeşitliliklerine göre 3 farklı formda sınıflandırılabilirler.

1.4.3.1. Düz (Lineer) Zincirli Polimerler

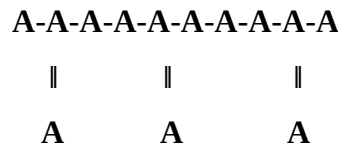
Bu polimerlerin yapısı düz bir zinciri andırmaktadır. Ana zincirlerin başka bağlarla teması hiçbir zaman yoktur. Örnek olarak “YYPE” düz zincirli bir polimer zinciridir. Düz zincirli polimerin zincir yapısı Şekil 1.10’daki gibidir.



Şekil 1. 10. Düz zincirli polimerlerin zincir yapısı (URL-1, 2019).

1.4.3.2. Dallanmış Polimerler

Bazı polimerlerin ana zincirlerine ek olarak kendi kimyasal yapısını değiştirmeyecek şekilde farklı polimer zincirleri kovalent bağlarla bağlanabilir. Bu polimerlere, dallanmış polimerler denir. Bu polimerlerin dallanmış zincirleri polimer sentezi esnasında yan ürün oluşması sonucu meydana gelir. Yan dallar farklı uzunluklarda olabilmesinin yanı sıra bu yan dalların üzerine farklı dizilimlerde gelebilir. Dallanmış polimerlerin zincir yapısı Şekil 1.11’deki gibidir.

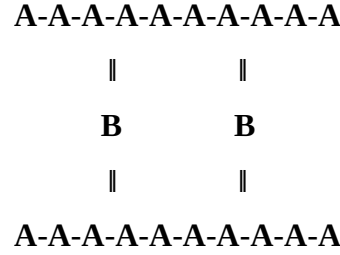


Şekil 1. 11. Dallanmış zincirli polimerlerin zincir yapısı (URL-1, 2019).

1.4.3.3. Çapraz Bağlı Polimerler

İki polimer zincirinin farklı boyuttaki zincir parçaları ile birbirleri arasında kovalent bağlar yapması ile oluşan polimerlerdir. Bu tür polimerlerde çapraz bağ sayısı çok fazladır.

Bu nedenle ağ yapılı polimer yapısı oluşur. Çapraz bağlı polimerler çözünmezler, fakat uygun çözücülerde şişirilebilirler. Polimerlerde çapraz bağın yoğunluğu arttıkça malzemenin polimerlerin çözücüdeki şişme derecesi azalır. Çapraz bağlı polimerlerin zincir yapısı Şekil 1.12'deki gibidir.

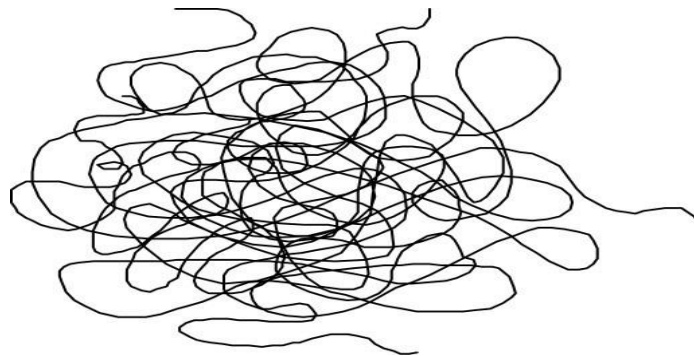


Şekil 1. 12. Çapraz bağlı polimerlerin zincir yapısı (Basan, 2016).

1.4.4. Zincir Yapılarının Geometrik Dizilişine Göre Polimerler

1.4.4.1. Amorf Yapılı Polimerler

Molekül zincirleri görsel olarak karmaşık şekilde iç içe girmiş yün yumakları halindedir. Moleküller arası herhangi bir kristalleşme ya da çapraz bağ oluşumu yoktur. Molekül zincirleri kendi aralarında rastgele bir dizinim oluşturur. Fiziksel olarak görünüşleri cama benzer ve şeffaftırlar. Metilmetakrilat, amorf yapılı polimerlere örnek olarak verilebilir. Amorf yapıya sahip polimerlerin molekül zincirlerinde çekme zorlamaları etkisi altında, çekme yönüne doğru bir yönelim gözlemlenmektedir. Bu nedenle çekme mukavemetleri yüksektir. Amorf yapılı polimerlerin mercek altında görünüşleri Şekil 1.13'teki gibidir (Akdoğan, 2014).

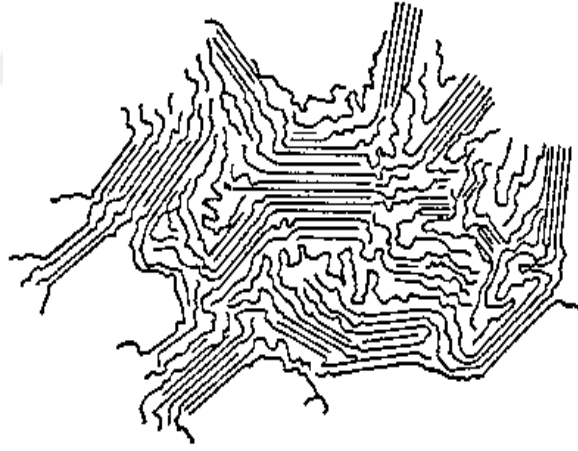


Şekil 1. 13. Amorf yapılı polimerin mercek altında görünümü (Mazumdar, 2001).

1.4.4.2. Kristal Yapılı Polimerler

Polimer zincirlerinin tamamı ya belirli düzende ya da kristalin haldedir. Diğer bir deyişle, molekül zincirleri birbirlerine göre üç boyutlu bir düzeni andıran düzenli bir yapıdadır. Kristalin yapı, belirli bir sıcaklığa getirilen polimer eriğin veya polimerik çözeltinin soğutulmasıyla elde edilir. Kristalin yapının meydana gelmesi, molekül zincir şekline (doğrusal, dallanmış veya çapraz bağlı) ve moleküler çekim kuvvetine bağlıdır (Akdoğan, 2014).

Polimerlerin özellikleri üretim esnasında oluşacak zincir yapısı ve polimer sentezi esnasında ki deney koşullarına göre farklılık gösterebilir. Polimerler genel itibariyle amorf yapıda bulunurlar ve belirli bir ergime sıcaklıkları yoktur. Deney esnasında sıcaklığın artmasıyla birlikte ergime gerçekleştiğinde viskozite gittikçe azalır ve malzeme akıcı bir hale gelir. Mikroskopik olarak kristalin yapı polimerler Şekil 1.14'teki gibi görünmektedir.



Şekil 1. 14. Amorf yapı polimerin mercek altında görünümü (Mazumdar, 2001).

1.4.5. Kimyasal Yapılarına Göre Polimerler

1.4.5.1. Organik Polimerler

Organik polimerler kimyasal yapısında temel olarak karbon atomu bulundurlar. Karbon atomunun yanı sıra hidrojen, oksijen ve azot atomları içerirler. Organik polimerler, polimerleri oluşturan monomer zincirlerindeki atomsal yapıya göre homozincir ve

heterozincir olmak üzere ikiye ayrılırlar. Polimer zincirindeki atomlar aynı tür ise homozincir farklı tür ise heterozincir polimer olarak ifade edilirler (Akdoğan, 2014).

1.4.5.2. İnorganik Polimerler

İnorganik polimerlerin kullanım alanları organik polimerler kadar yaygın değildir. Yapılarında karbon atomu yerine periyodik cetveldeki dördüncü ve altıncı grup elementleri bulunmaktadır. En çok bilinen inorganik polimerler, alümina silikat ve polimerizasyonda suyun arıtılmasında kullanılan Şekil 1.15'teki zeolittir.



Şekil 1. 15. Zeolit (URL-2, 2019).

1.4.6. Fiziksel Özelliklerine Göre Polimerler

1.4.6.1. Termoplastikler

Termoplastikler, tarih boyunca kullanılan plastik kelimesinin tam olarak karşılığıdır. Mevcut polimerler içerisinde en yaygın kullanım alanına sahip olan malzemelerdir. Termoplastikler kimyasal yapı olarak çapraz bağ içermezler sadece lineer ve dallanmış monomer zincirlerinden oluşurlar. Isı etkisi ile yumuşar ve erirler, yeniden şekillendirilebilirler. Kolay şekillendirilebilmelerinin sebebi polimer zincirleri arasındaki bağların zayıf oluşudur. Oda sıcaklığında katı halde bulunurlar. Uygun çözücülerde kolayca çözünürler. Plastikler kristalin ya da amorf yapılarda olabilirler. Amorf bir polimerde, zincirler arasındaki dizilim gelişigüze ve belli bir düzen göstermez. Termoplastiklerin yapısında genelde kristalin ve amorf bölgeleri birlikte bulunurlar, yani yarı kristalindirler. Bu nedenle kristalin termoplastikler tanımı yarı kristalin termoplastikleri de kapsar. Termoplastiklerin kristalin oranı mühendislikteki kullanım

alanlarına göre farklılık gösterir. Bir polimerin kristalizasyon yeteneği dallanma şekline, moleküler düzene, molekül içi ve moleküller arası etkileşimleri gibi pek çok faktöre bağlıdır (Saçak, 1998).

Kristalin oranı termoplastik malzemeler için önemli bir faktördür. Moleküller arası etkileşim yarı kristalin zincir yapısında oldukça güçlü bir düzen ve dizilim eğilimindeyken, amorf termoplastiklerde tam tersi karmaşık bir yapı eğilimindedir. Amorf düzendeki polimerlerin ısıtılması malzemenin katı haldeyken ergiyip viskoz bir sıvıya dönüşmesini sağlar. Yarı kristal düzendeki polimer malzeme de ise ısı, kristalin malzemenin viskoz bir sıvıya dönüşmesini sağlar. PP ve PE en çok bilinen termoplastiklerdendir (Marşoğlu, 1986).

1.4.6.2. Termosetler

Termosetler yoğun çapraz bağ içeren üç boyutlu sert polimerlerdir. Termoplastikler gibi lineer veya dallanmış molekül zincirleri içermezler. Elastomerler gibi ısı ile ergitilip tekrar şekillendirilemezler. Termoplastik malzemelere göre termosetler rijit malzemelerdir. Yüksek sıcaklıklarda zincir ve bağ kırılmaları sonucu bozunurlar, bu nedenle geri dönüştürülmeleri mümkün değildir. Termoset polimerler şekillendirilmeden önce sıvı akışkan halindedir. Ön ürün ile farklı takviye ve dolgu maddelerini içeren termoset malzemeye dönüşecek olan bu akışkan sıvı reçine olarak adlandırılır. Bu nedenle termoset polimerler yerine termoset reçineler tanımlaması daha yaygın kullanılır. Ön ürün ise yarı sentetik, akma özelliğini koruyan malzemelerdir. Ön polimerle birlikte çeşitli katkı ve dolgu maddeleri içeren reçine, ısı sonucu çapraz bağlı yapıya dönüştürülerek termoset ürün elde edilir (Saçak, 1998).

Termoset polimerlerde sentez işlemi, uygun deney yöntemi ile oda sıcaklığında gerçekleştirilmektedir. Uygun çapraz bağ zincirlerinin sağlanabilmesi için yapılması gereken sentez yöntemi analiz edilerek doğru bir şekilde belirlenmelidir. Termoset polimerleri, doğru sentez yöntemiyle üretildikten sonra farklı etkileşimlerle istenmeyen bir ön ürün elde edilmesini önlemek için sentezin gerçekleştiği sıcaklığa göre daha yüksek bir sıcaklıkta ekstra bir işlem daha geçirmesi gerekmektedir (Marşoğlu, 1986). Termoset reçine biçimleri Şekil 1.16'da gösterilmiştir.



Şekil 1. 16. Termoset reçine örnekleri

Termoplastik ve termoset polimerler sıcaklık ve basınç altında değişimlere uğrayabilirler. Fakat termoplastik polimerler geri dönüşümü mümkün olan, termoset polimerler ise ergitildikten sonra tekrar işlenemeyen malzemelerdir. Tablo 1.2’de bu polimerlerin avantajları ve dezavantajları gösterilmiştir.

Tablo 1. 2. Termoset ve termoplastik malzemeler arasındaki farklar (Mazumdar, 2001).

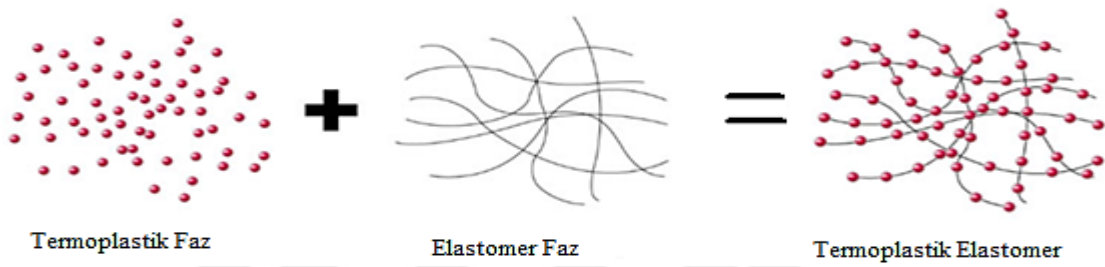
Termoplastikler	Termosetler
Sıcaklık ve basınç altında yumuşarlar, tamir edilebilirler.	Yüksek sıcaklıkta bozunurlar.
Yüksek gerinmelere karşı toleranslıdır.	Düşük gerinmelerde dahi koparlar.
Uzun süre bekletilebilirler.	Düşük raf ömürlerine sahiptirler.
Tekrar işlenebilirler.	Tekrar işlenemezler.
Kısa kürlenme zamanına sahiptirler.	Uzun kürlenme zamanına sahiptirler.
Üretimleri nispeten zahmetlidir.	Üretimi termoplastiklere göre zahmetsizdir.
Çözücü dirençleri yüksektir.	Çözücü dirençleri kötüdür.

1.4.6.3. Elastomerler

Elastomerler sünek ve elastik malzemelerdir. Endüstride daha çok kauçuk olarak adlandırılırlar. Mekanik özellikleri sayesinde mühendislik malzemeleri arasında geniş yer kaplarlar. Elastomer malzemelerde çekme işlemi gerçekleştiğinde uzama gerçekleşir ve üzerinde ki yük ortadan kaldırıldığında eski boyutuna tekrar döner. Polimer zincirlerinde

sahip oldukları düşük çapraz bağ bu özelliklerini oluşturur. Elastomerlerin üzerine binen çekme etkisiyle, mikroskobik düzeyde polimer zincirleri birbirleri üzerinden kayarak yer değiştirir fakat içerisinde bulunan çapraz bağlar kalıcı deformasyonu engeller ve malzeme üzerinde ki yük etkisi ortadan kalkınca eski şekline döner. Elastomer zincir yapısında çapraz bağ oluşumu sonrası erime söz konusu olamaz (Saçak, 1998).

Termoplastik fazla elastomer faz birlikte sentezlenerek termoplastik elastomer Şekil 1.17'deki gibi elde edilebilmektedir.



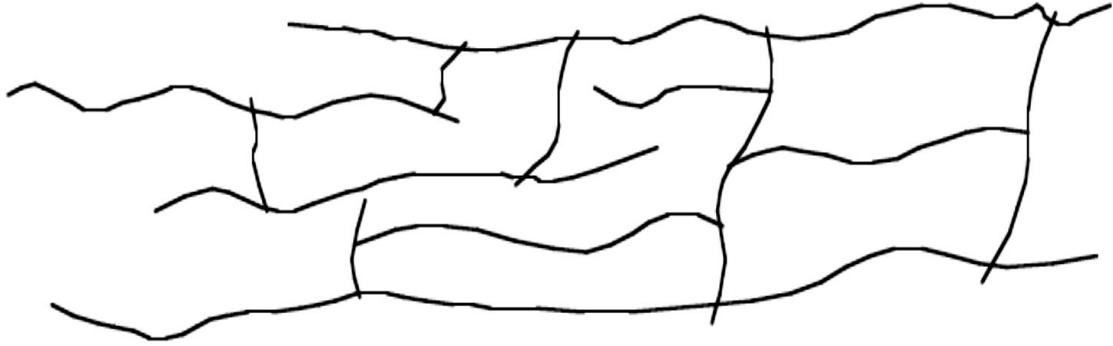
Şekil 1. 17. Termoplastik elastomer oluşumu (URL-3, 2019).

1.5. Mühendislikte Sık Kullanılan Polimerler

1.5.1. Epoksi

Epoksi, termoset polimerler sınıfında olup uygun mühendislik özellikleri sayesinde birçok işlemde kullanılan reçinelerdir. Mükemmel yapışma özellikleri ile bilinirler. Epoksiler; uzay ve havacılık sanayiden, gıda sektörüne kadar geniş kullanım alanına sahip reçine malzemeleridir. Farklı malzeme özellikleri gerektiren işlemlerde ise epoksiler farklı formlarda üretilmektedir. Yani epoksiler, başka bir malzeme içerisine belirli hacimsel oranlarla birleştirilerek kullanılabilirler. Epoksi malzemenin kimyasal özellikleri değiştirilerek, kürlenme süresi, işlenme sıcaklığı, malzemenin tokluğu ve yapışma süresi iyileştirilebilir. Bir epoksi grubu iki karbon ve bir oksijen atomundan oluşan üç üyeli bir halkadır. İçerisine seyreltici veya esnekleştiriciler katılarak viskozitesi azaltılabilir veya malzemenin tokluğu değiştirilebilir. Çapraz bağlama reaksiyonu esnasında sertleştirici malzemeler kullanılarak moleküller birbirleri arasında Şekil 1.18'deki gibi bağ oluşturur. Bu çapraz bağlar üç boyutlu ağ şeklindedir. Tüm sertleştiriciler bünyesinde farklı fiziksel ve kimyasal özellikler bulundurduğu için reaksiyona giren kürlerin oranları uygun

sertleştirici veya katalizör seçimi ile kontrol edilebilir. Kür oranı arttıkça işlem döngüsü kısalır bu yüzden yüksek hacimsel oranlarda üretim gerçekleşir. Epoksi matrisli kompozitler oda sıcaklığından yüksek sıcaklıklara kadar iyi performans gösterirler. Epoksiler genelde 90-120 °C sıcaklıkta optimum özellikler gösterirler fakat literatürde 200 °C ye kadar optimum özelliklere sahip olan epoksi malzeme çalışmaları mevcuttur. Epoksiler, katı, sıvı ve katı-sıvı karışık formda bulunabilirler. Filament sarmada, pultrüzyon ve el yatırma gibi kompozit üretim yöntemlerinde sıvı epoksiler kullanılabilir. Katı halde ise yapıştırma amacıyla epoksi kapsülleri kullanılabilir. Epoksi reçineler polyester ve vinilesterlere göre daha maliyetlidir. Bu nedenle malzemeye sağlayacağı üstün özelliklere bağlı kullanımı kaçınılmaz değilse ekonomik sebeplerden dolayı tercih edilmezler. Epoksiler kırılğan malzemelerdir fakat birçok uygulamada ihtiyaçları karşılamak için epoksi reçineye termoplastik ilave edilerek güçlendirilmiş epoksiler elde edilebilir (Mazumdar, 2001).

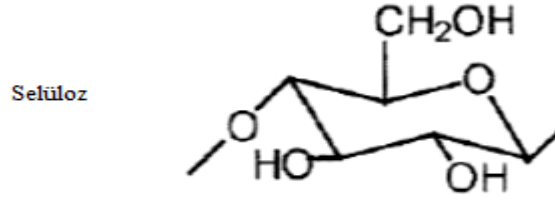


Şekil 1. 18. Reaksiyon esnasında epoksi malzemenin üç boyutlu bağlanması (Mazumdar, 2001).

1.5.2. Selüloz

Selüloz bilinen en eski doğal polimerlerdendir. 1800’li yıllardan beri endüstride kullanılan pamuk yün keten ve kağıt gibi malzemelerin hammaddesini oluşturmaktadır. Günümüzde ise selülozun farklı şekillerde sentezlenmesiyle selüloid, rejenere selülozik lifler, rejenere selüloz tabaka ve levhalar, selüloz asetat lifler ve selülozun tam nitrolanması işlemi ile selüloz triasetat geliştirilmiştir. Şekil 1.19’da selüloz monomerlerin birbirine bağlanımı gösterilmektedir. Yüzey parlaklığı, dış çevre etkilerine dayanım, düşük ısı iletim katsayısı, yüksek direnç ve dielektrik özellikleri gibi üstün malzeme özelliklerine sahip olan selüloz polimerleri, sektörün vazgeçilmez malzemeleridir. En yaygın kullanım

alanları arasında ise tekstil malzemeleri, kağıt üretim fabrikaları ve ambalaj (paketleme) sektörü gelmektedir (Saçak, 1998).



Şekil 1. 19. Selüloz zincirinin gösterimi (Saçak, 1998).

1.5.3. Poliüretan

Poliüretanlar (PU), polioller ve polimerik izosiyanatların uygun dolgu malzemesi ve katalizör kullanılarak kimyasal olarak sentezlenmesiyle elde edilir. PU ilk olarak 1950’li yıllarda kauçuk yerine kullanılmıştır. PU temel olarak organik polimerdir, Şekil 1.20’de görüldüğü üzere hem termoset hem de termoplastik şekilde elde edilebilir. Termoplastik bazlı PU zincir yapısını doğrusal moleküller oluşturur. Termoset malzemede ise zincir yapısı çapraz bağlı atomları içerir. PU malzemelerin aşınma, yıpranma ve kimyasal dirençleri çok iyidir. Aynı zamanda yüksek tokluk ve esneklik özellikleri mükemmeldir. Poliüretanlar, genelde enjeksiyon kalıplama metodu ile elde edilir. Poliüretan kaplama teknikleri geliştikçe bu malzemeler endüstride sık kullanılmaya başlanmıştır. PU malzemesi otomotiv endüstrisinde (tampon kirişleri vb.) ve inşaat sektöründe yalıtım özelliklerinden dolayı sık kullanılmaktadır (Mazumdar, 2001).



Şekil 1. 20. Termoplastik poliüretan (TPU) ve poliüretan köpük (Termoset)

1.5.4. Alçak (Düşük) Yoğunluklu Polietilen

İlk olarak üretimi 1979 yılına dayanan ve polietilen ailesinde bulunan alçak yoğunluklu polietilen (AYPE), temel olarak yapısında olefin bulunduran bir kopolimerdir. Yapısında bulunan kristaline göre yoğunluğu $0.91-0.95 \text{ gr/cm}^3$ arasında değişmektedir. Diğer polimerlere göre nispeten yeni sayılmasına rağmen endüstride kullanılan polietilen hacminin üçte birini kapsamaktadır. Gaz fazında veya uygun çözücülerde diğer plastiklere göre daha düşük basınçlarda üretilmesi ve iyileştirilmiş termal özellikleri ekonomik açıdan AYPE'yi üretim açısından daha avantajlı kılmaktadır. AYPE'nin başlıca kullanım alanları ise ekstrüzyon ürünleri, endüstriyel ambalaj, tarım ve inşaat sektörleridir. AYPE, saf polietilene göre daha düşük yoğunlukta olmasına rağmen %65-70 kristalin derecesine sahiptir. Yapılan araştırmalarda polietilen malzemesinin yoğunluğunun düşmesiyle bazı mühendislik özelliklerinin iyileştiği gözlemlenmiştir. Bu sebeple, yoğunluğu $0.9-0.915 \text{ gr/cm}^3$ aralığında bulunan çok (alçak) düşük yoğunluklu polietilen (ÇAYPE) malzemesi üretilmiştir (Ram, 1997).

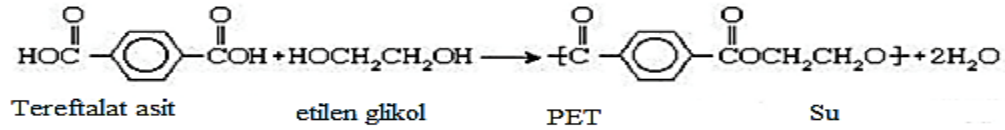
1.5.5. Yüksek Yoğunluklu Polietilen

Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), AYPE ile aynı kimyasal yapıya sahiptir. Ancak molekül yapısı olarak farklı lineer zincirler bulundurduklarından YYPE, AYPE'ye göre daha düşük dallanma ile daha yüksek kristalliteye sahiptir. 0.94 gr/cm^3 ile 0.95 gr/cm^3 arasında değişen yoğunluğa sahiptir ve AYPE'ye göre daha serttir. YYPE; 1954 yılında daha önce kullanılmamış katalizörler yardımıyla, etilen monomerlerin, düşük basınçta polimerizasyonu ile üretilmiştir. Ayrıca Sterio-spesifik olarak adlandırılan bu tekniğin mucidi Dr. Zieglerdir. YYPE, tıpkı AYPE'ler gibi ekstrüzyon, enjeksiyon ve şişirme gibi yöntemlerle elde edilebilir. Geniş kullanıma alanına sahip olan YYPE malzemeler genelde yalıtım malzemesi, beyaz eşya imalatı ve basınç dayanıklı boru yapımında kullanılır (Ram, 1997).

1.5.6. Polietilen Tereftalat

Polietilen tereftalat (PET) plastik malzemesi 1945'te geliştirilen tereftalik asit ve glükolünün polimerizasyon yöntemi ile elde edilmiştir. PET, kristalin düzende bir

polimerdir. % 40'ın üzerinde kristallenme oranına sahiptir. 265 °C erime sıcaklığına ve 80 °C camsı geçiş sıcaklığına sahiptir. Poliamid (PA) olarak bilinen naylonla bazı kullanım alanları benzerlik göstermektedir. Naylona göre daha sert ve dayanıklıdır fakat gerilme mukavemeti ve tokluk özellikleri açısından yetersizdir. Ortalama moleküler ağırlıkları ise 20000 civarındadır. En çok kullanıldıkları üretim yöntemi enjeksiyonlu kalıplamadır. Son yıllarda PET kullanımındaki büyük artış onu en çok geri dönüştürülen polimerler arasında ilk sıralara getirmiş ve popüler bir ticari polimer haline getirmiştir. Yoğun olarak kullanıldıkları alan ise gıda ve kimya endüstrisidir. Şekil 1.21'de PET'in polimerizasyonu şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 1. 21. Polietilen tereftalat sentezi (Ram, 1997).

1.5.7. Poliamid Naylon

Poliamidler (PA), diamin momomerlerinin yoğunlaşma reaksiyonuna girmesiyle kademeli polimerizasyon sentezi ile üretilmiştir. İlk kez 1936 yılında Dupont Company şirketi tarafından Poliamid Nylon 6-6 adı verilerek üretilmiştir. Bu yüzden günümüzde insanlar, birçok polimeri hala naylon olarak ifade etmektedir. Fakat naylon ismi sadece PA malzemeler için kullanılmaktadır. 1936 tarihinden bu yana birçok naylon türü geliştirilmiştir. Bunlar sırasıyla 6-6, 6, 6-10, 6-12, 11, 12'dir. İlk üretilen PA Nylon 6-6 bileşeni monomer, adipik asit, benzen veya fenoldür. Bu ön ürünler etil alkol kullanılarak çözülür ve naylon 6-6 tuzu oluşur. Daha sonra 210-220 °C de havasız ortamda uygun basınç altında çözeltide polimerizasyon işlemi gerçekleşir. PA genellikle tekstil sanayisinde kullanılır. Bazı PA'ların özgül yoğunlukları Tablo 1.3'te belirtilmiştir (Ram, 1997).

Tablo 1. 3. Bazı PA nylon türlerinin yoğunlukları (Ram, 1997).

PA türü	Yoğunluk (gr/cm ³)
Nylon 6	1.14
Nylon 6-6	1.14
Nylon 6-10	1.08
Nylon 11	1.05
Nylon 12	1.02

1.5.8. Polipropilen

Polipropilen (PP) ilk olarak 1959 yılında streospesifik özelliklerin gelişmesiyle birlikte poliolefindeki üçüncü polimer malzemesi olarak yerini almıştır. Yüksek kristallik derecesine sahiptir. Sert, saydam ve dayanıklı malzemedir. Ziegler'in buluşuna paralel olarak benzer katalizörler kullanılarak türetilmiştir. PP polimerizasyonu çoğunlukla 30-80 °C sıcaklıkta ve 12 atm basınçta gerçekleşir. Erime sıcaklıkları 130-170 °C arasındadır. Ziegler'in buluşundan önce PP malzemesi kullanışsız, mekanik ve ısı özelliklere sahip olmayan şekilsiz bir materyal olarak bilinmekteydi ama stereo-specific özellikler sayesinde mükemmel mühendislik malzemesi özelliklerine sahip plastiklere dönüşmüştür. PP malzemeler, PE malzemelere göre daha düşük olmakla birlikte yaklaşık 0.9 gr/cm³ civarı bir yoğunluğa sahiptir buda malzemeye daha fazla avantaj sağlamaktadır. Bu avantajlardan bazıları üstün mekanik, kimyasal ve ısı özelliklerdir. Sıcaklığa karşı diğer malzemelere göre daha dayanıklıdır, düşük sıcaklıklardaki işlemleri içinse malzeme tokluğunun artırılması gerekmektedir. Bu üstün özelliklerinin yanında, bazı dezavantajları da vardır. Bunlar yüksek oksitlenme, UV ışın dayanımı azlığı ve zor kaplanma işlemleridir. Günümüzdeki kullanım alanları ise makine parçaları (otomotiv sanayi), kumaş üretimi, sıhhi ürünler ve elektronik aksesuarlardır. Kullanım alanları göz önüne alındığında PP, AYPE ile rekabet halindedir. PP malzemeler ağırlıklı olarak 23-260 °C sıcaklık arasında ekstrüzyon, enjeksiyon ve şişirme yöntemleriyle işlenmektedirler (Ram, 1997).

1.5.9. Polivinilklorür

Polivinilklorür (PVC), 1936 yılında vinil klorür monomerlerin polimerizasyonu ile elde edilmiştir. Dünyada en çok kullanılan dört plastikten biridir. Monomer olarak CH₂=CHCl den oluşan monomer zincirleridir. Polimer zincirlerinde klor bulunduran nadir plastiklerdendir. Oda sıcaklıklarında sert plastiklerdir. Kristalin oranları %5 civarındadır. Bundan dolayı amorf polimerler içerisinde sınıflandırılırlar. Diğer polimerler gibi belirgin bir erime sıcaklıkları bulunmamaktadır. Bunun yerine camsı geçiş sıcaklıkları vardır ve ortalama 80°C civarındadır. Ekstrüzyon ve kalıplama işlemleri ile üretilirler. Günümüzde en sık inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Bunun yanında otomotiv sanayiden paketlenme sektörüne kadar muhtelif yerlerde kullanılabilirler. Kullanım ömürleri ise 10-50 yıl arasında değişmektedir (Ram, 1997).

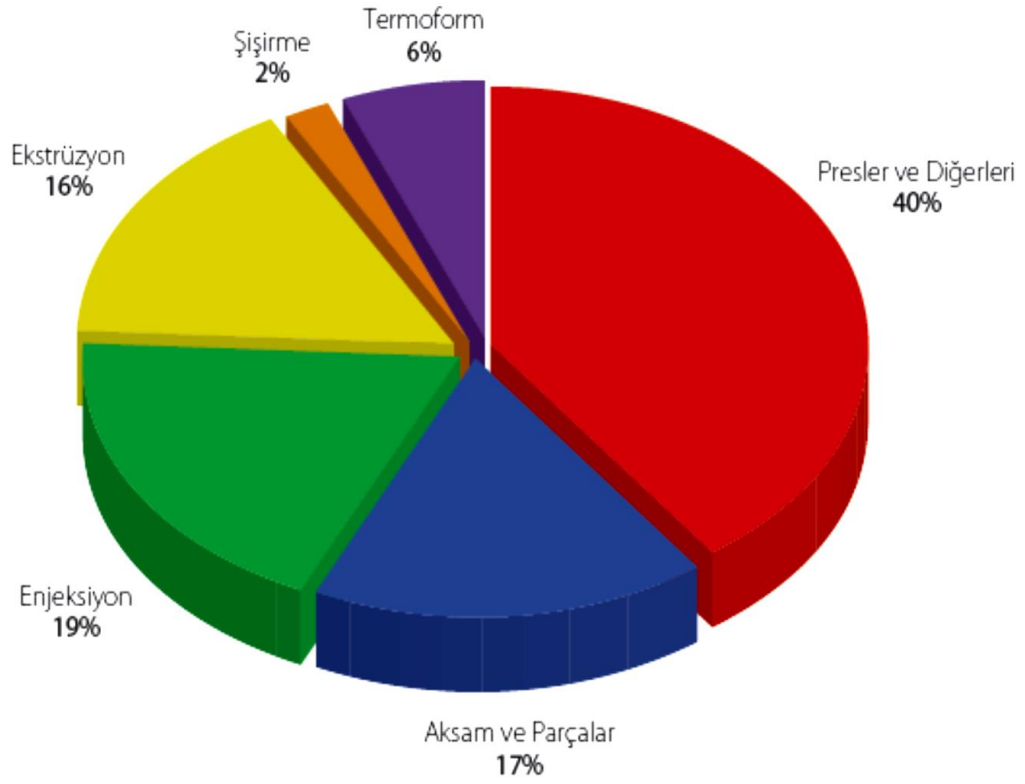
1.5.10. Akrilonitril Bütadiyen Stiren

Akrilonitril Bütadiyen Stiren (ABS) polimerlerini oluşturan monomerlerin bileşimi ve üretimi değişiklik gösterebilir. Yaklaşık 15 farklı şekilde üretimi mümkündür. İlk olarak 1946 yılında geliştirilmiştir. Genel olarak polimer malzemenin içeriği, %20'ser akrilonitril ve bütadiyen %60 ise stirendir. Birçok farklı formları bulunmasına rağmen ABS polimerlerinde sonuç olarak sağlamlık, güç ve tokluk aranmaktadır. Diğer polimerlerden farklı olarak dikkat çeken özelliklerinden biride üstün darbe dayanımıdır. Özetle mekanik özellikleri açısından dikkat çeken polimerlerdir. ABS; soğuk presleme, metalik kaplama gibi işlemlerin yanı sıra enjeksiyon, ekstrüzyon ve şişirme metotlarıyla kolayca işlenebilir. ABS'nin fiyatı Polistren (PS) ve PP'ye göre daha pahalı olmasına rağmen, mühendislik malzemesi olarak bu malzemeler yerine kullanılabilir. Günümüzde basınçlı ve kimyasal boru hatları, radyo ve TV dolapları, spor aksesuarları ve çeşitli makinelerde kullanılmaktadır (Ram, 1997).

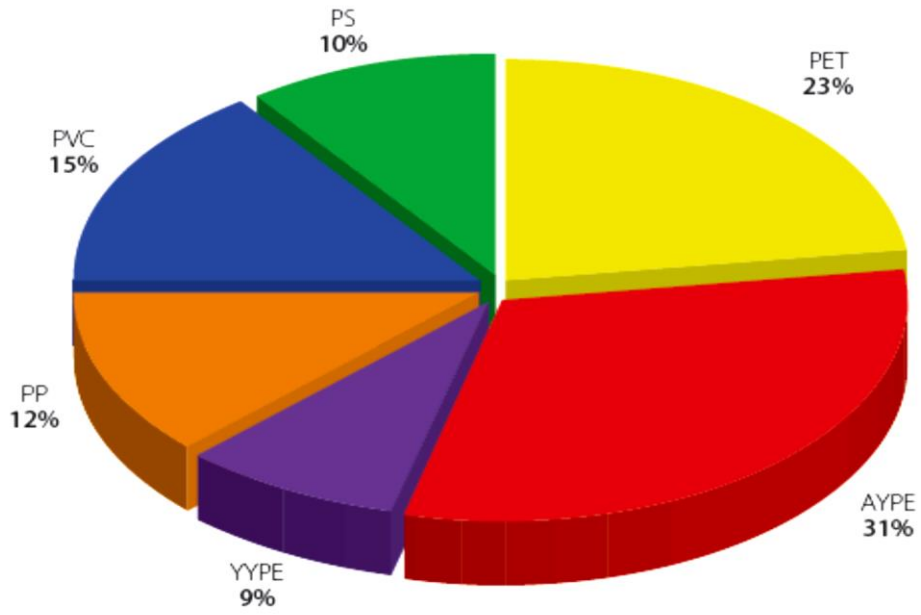
1.5.11. Polistren

Polistren (PS), 1938 yılında geliştirilmiş en eski ve etkili polimerlerdendir fakat diğer termoplastiklerin geliştirilmesiyle birlikte üretim kapasitesi azalmıştır. Stiren monomerlerinin polimerizasyonu ile elde edilirler. Yoğunluğu 1.04 gr/cm^3 olan lineer polimerlerdir. Oda sıcaklığında katı halde bulunmaktadır. Saf PS, yüksek etkili polistren (YEPS) ve genişletilebilir polistren (GPS) olmak üzere birkaç şekilde üretilir. Genellikle radikal polimerizasyon ile elde edilebilirler. Ortalama molekül ağırlığı 200000'dir. Çalışma sıcaklık aralığı $60-80^\circ\text{C}$ 'dir. Ekstrüzyon, şişirme ve yüksek hassasiyetli enjeksiyon yöntemiyle üretilirler. Genellikle köpük halinde yalıtım malzemesi olarak kullanılırlar (Ram, 1997).

Şekil 1.22 ve Şekil 1.23'te endüstride kullanılan plastik hammaddelerinin güncel üretimlerine göre sektördeki payları ve bu malzemelerin üretim yöntemleri için fabrikalarda bulunan makinelerin yüzdelik dağılımı verilmiştir.



Şekil 1. 22. Plastik sektöründeki fabrikaların makine ve teçhizat dağılımı (2018/6) (URL-4, 2019).

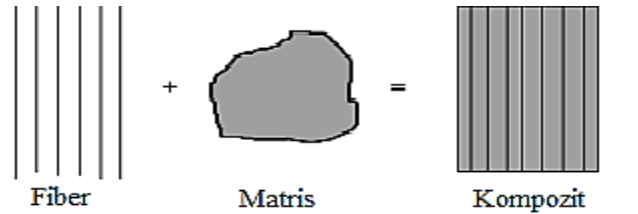


Şekil 1. 23. Plastik hammadde üretimi (2018/6) (URL-4, 2019).

1.6. Kompozit Malzemeler

Mühendislik malzemeleri metaller, seramikler ve polimerler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Bu grupların oluşmasındaki en temel unsur her bir malzemenin karakteristik özelliklerinin birbirinden farklı olmasıdır. Mühendislikte malzemeler temel olarak mekanik, imalat veya ısı özelliklerine göre ele alınır. Yoğunluk, dayanım ve tokluk gibi özellikler malzemenin mekanik özelliklerini içerirken, birleştirme ve biçimlendirme gibi özellikler malzemenin imalat özelliklerindendir. Bazı malzemelerin imalat özellikleri bazılarının ise mekanik özellikleri iyidir. Örnek verilecek olursa tokluk özellikleri metallerde iyiysen seramiklerde bu özellik çok kötüdür.

Günümüz teknolojisinde bu üç gruba ek olarak birden fazla malzemenin belirli metotlarla bir araya gelmesiyle oluşturulan kompozitler dördüncü malzeme grubu olarak değerlendirilmektedir. Birden fazla malzemenin en iyi özelliklerini tek bir malzemede birleştirmek veya yeni bir özellik ortaya çıkarmak amacıyla mikro yapıların makro düzeyde birleştirilmesi ile geliştirilmiş malzemeler, kompozit malzemeler olarak adlandırılır. Örnek olarak kompozit malzemeyi oluşturan malzemeler Şekil 1.24'te gösterilmiştir (Aran, 2008).



Şekil 1. 24. Kompozit malzeme oluşumu (Mazumdar, 2001).

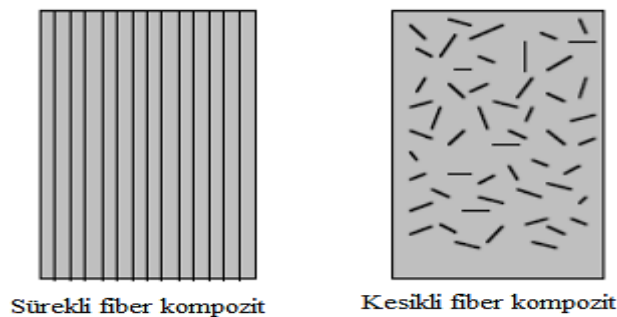
Kompozit malzemenin oluşturulması esnasında genellikle aşağıdaki özelliklerden birinin veya birkaçının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Bu özelliklerden başlıcaları;

- Kompozitlerin mekanik özelliklerini iyileştirme,
- Aşınma direnci,
- Korozyon direnci,
- Yüksek sıcaklıklara karşı dayanımı,
- Isı iletkenlik katsayısının iyileştirilmesi ve ısı direnci,
- Elektrik ve akustik iletkenliği,

- Uygun ağırlık, rijitlik ve benzeri özellikleri sayılabilir (Jones, 1999).

Yukarıdaki özellikleri sağlamaya yönelik, kompozit malzemelerin üretimi esnasında farklı yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler farklı şekillerde gerçekleştiriliyor olsa bile temel olarak kompoziti oluşturan bileşenlerin zayıf yönlerinin amaca uygun olarak iyileştirilmesi hedeflenmektedir (Ersoy, 2001).

Mühendislikte, tasarım veya çeşitli uygulamalar için ürün imal edilecek 50000'den fazla malzeme vardır. Bu malzemelerden bazıları (bakır, dökme demir, pirinç) yüzyıllardır kullanılmaktadır fakat bunların yerini uygun kullanım özelliklerinden dolayı yakın zamanda kompozitler almıştır. Bir kompozitin ana bileşeni matris malzemelerdir. Tipik olarak kompozitler bir matris malzemesine fiber malzemelerin takviye edilmesiyle oluşturulur. Matris malzemeleri metaller, plastikler veya seramikler; takviye malzemeleri ise lif veya parçacıklardan oluşabilir. Polimer matrisli kompozitler, diğer kompozitlerin mühendislik özelliklerine göre daha uygun bulunmakta ve çeşitli endüstrilerde kullanılmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan lifler sürekli, uzun veya kısa halde olabilir. Takviye elemanları kompozite kuvvet ve sertlik sağlar, matris ise çevresel sınırları belirler. Takviye elemanları birçok farklı şekillerde bulunabilirler. Bu özellik kompozitin mekanik ve ısı özelliklerini değiştirebilir. Şekilde gösterilen lifler uygulama türüne bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Mekanik olmayan uygulamalar için kısa lifler önerilmektedir. Enjeksiyon ve ekstrüzyon işlemleri içinde kısa lifler önerilirken; vakumlama, pultrüzyon ve elyaf sarma işlemlerinde sürekli lifler önerilmektedir. Şekil 1.25'te sürekli ve kesikli fiber takviyeli kompozitlerin mikroskobik görüntüsü bulunmaktadır (Mazumdar, 2001).



Şekil 1. 25. Sürekli ve kesikli fiber kompozitlerin mikroskobik görünümü (Mazumdar, 2001).

Matris malzemesi olmadan elyaflar çok az alanda kullanılabilir. Matrisler kompozit yapının özelliklerini belirlemede çok önemlidir. Bir matris malzemenin önemli işlevleri aşağıdaki gibidir.

- Matris malzemesi, elyafları birbirine bağlayıp yükü liflere aktararak kompozite sağlamlık ve şekil kazandırır.
- Matris fazı, elyafların tek tek hareket edebilmesi için malzemeyi izole eder böylece malzemede oluşabilecek çatlağın ilerlemesini durdurabilir.
- İyi bir yüzey kalitesi sağlar.
- Takviye edici malzemeleri koruyucu görevindedir.

Kompozit malzemelerde matris malzemeleri kadar takviye malzemeleri de önemlidir. Takviye (katkı) malzemelerin özellikleri ise maddeler halinde açıklanmıştır.

- Kompozitte kullanılan malzemenin yapısına göre lifler yükün %70-%90'ını taşırlar.
- Sertlik, dayanım ve termal denge gibi özellikleri belirlerler.
- Isıl iletkenlik katsayılarını iyileştirip yalıtım özelliklerini arttırabilmektedir (Mazumdar, 2001).

1.7. Kompozit Malzemelerin Sınıflandırılması

Kompozit malzemeler insanlık tarihi boyunca görülmektedir. Mısırda M.Ö. 2800 yıllarından kalma kompozit malzeme sınıfına giren lamine edilmiş tahta tabakalar bulunmuştur. Yine Orta Doğu'da ok yaylarında daha iyi eğilme dayanımı sağlama amacıyla üst üste malzemeler, farklı lif şekilleriyle kompozit malzeme haline getirilmiştir. Eski çağlarda bina yapımı için kullanılan kerpiçte, samanla çamuru karıştırıp yalıtımı iyi hale getirilmiş kompozit malzeme olarak kullanılmıştır (Şahin, 2006).

Kompozit malzemeler içerisinde bulundurduğu malzemelerin özelliklerine, üretim yöntemlerine, kullanım alanlarına, avantaj ve dezavantajlarına göre incelendiğinde belirli alt başlıklarda incelenmesinin daha doğru olacağı kanaatine varılmıştır. Bundan dolayı günümüzde kompozitler, içerisinde bulunduğu matrislere göre ve yine kompozitleri güçlendiren takviye elemanlarına göre incelenmektedir.

1.7.1. Matris Malzemesine Göre Sınıflandırma

Kompozitler matris malzemesine göre üçe ayrılırlar.

- Metal Matrisli Kompozitler (Al alaşımları, Titanyum alaşımları vb.)
- Seramik Matrisli Kompozitler (Silisyum Karbür vb.)
- Polimer Matrisli Kompozitler (Polipropilen, Polietilen, Poliüretan, Epoksiler vb.)

1.7.1.1. Metal Matrisli Kompozitler

Metaller, doğal reçinelere göre daha iyi dayanımlı matrislerdir. Bununla birlikte metal matris, kompozit malzemelerin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesini sağlar. Fakat metal matrisli kompozitler her takviye elemanı ile birlikte kullanılamadığından üretim işlemi çok zordur. Aynı zamanda metal matrisli kompozitlerde (MMK) kullanılan takviye elemanları (bor elyafı vb.) oldukça pahalı malzemelerdir. MMK malzemelerin pahalı olmasının yanı sıra bu malzemeler yüksek sıcaklıklarda işlenebildiği için üretimi de bir hayli zordur. Bu tür kompozit malzemeleri üretmek için 450-500 °C sıcaklıkta sıcak şekillendirme gerekmektedir. Yaygın olarak kullanılan metal matrislere örnek olarak 6061 ve 2024 alüminyum alaşımları ile 1010 saf alüminyum verilebilir. Şekil 1.26'da SiC takviyeli metal kompozit görülmektedir (Aran, 2008).



Şekil 1. 26. SiC metal matrisli kompozit malzemesi (Mileiko, 1997).

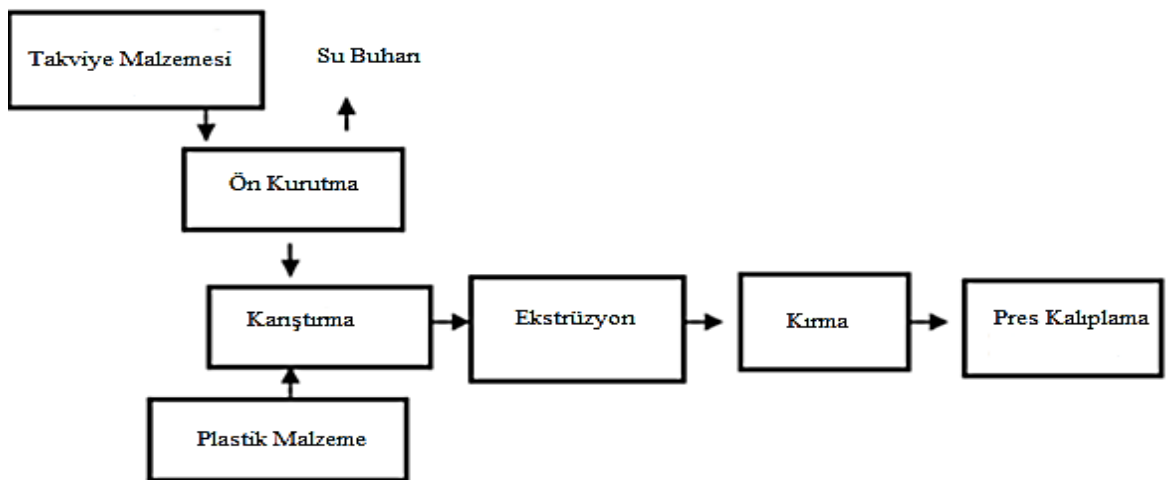
1.7.1.2. Seramik Matrisli Kompozitler (SMK)

Polimer matrisli kompozitler çok yüksek sıcaklıklarda yapısal olarak işlevlerini kaybettikleri için üretilebilirlik açısından seramik malzemeler yüksek sıcaklık gerektiren

işlemlerde metallere karşı iyi bir seçenek olarak değerlendirilir. Seramik malzemelerin yoğunlukları genelde düşük oldukları için metallere göre daha hafif malzemelerdir. Aynı zamanda metallerde büyük sorun oluşturan oksidasyon dirençleri, seramik malzemelerde olmadığından yüksek sıcaklıkta kolay işlenebilirler. Seramik malzemelerin yukarıda sayılan avantajlarının yanında malzemenin kalitesini etkileyen bazı dezavantajları mevcuttur. Örneğin, yekpare şekilde üretilen seramik malzemelerin yüzeyleri çatlak oluşumuna karşı çok hassastır. Bu sebeple son yapılan araştırmalarda seramik matrisli malzemelerin üzerindeki çatlakların minimuma indirgenmesi hedeflenmektedir (Ha, 1991).

1.7.1.3. Polimer Matrisli Kompozitler

Polimer matrisli kompozitler (PMK), MMK ve SMK'ya göre günümüz endüstrisinde çok daha yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde, fiberler takviye malzemesi olarak sık kullanılır. Üretim esnasında uygun matris elemanı ve takviye malzemelerini düzgün belirlemek, malzemenin özelliklerini iyileştirmek için yeterli değildir. Bundan dolayı, bu parametreler dışında elde edilecek son ürünün özelliklerine göre üretim metodunu doğru belirlemek çok önemlidir. Yukardaki seçenekler iyice irdelenmeden yapılan üretimlerde, kompozit malzemelere ait üstün mekanik ve ısı özellikleri elde etme şansı kaybolacaktır. PMK'ların üretiminde en çok kullanılan yöntemler pultrüzyon metodu, enjeksiyon kalıplama ve ekstrüzyon yöntemleridir. Bir PMK'nın üretim prosesi şematik olarak Şekil 1.27'deki gibidir (Biron, 2007).



Şekil 1. 27. Polimer matrisli kompozit üretimi iş akış şeması (Akbaş ve ark., 2013).

1.7.2. Takviye (Katki) Malzemesine Göre Sınıflandırma

İnsanlık tarihi boyunca kullanılan kompozit malzemelerin teknolojiyle birlikte geliştirilmesi hızla devam etmektedir. Bu nedenle yeni geliştirilen bir malzemeyi modern kompozit olarak değerlendirmek için malzemenin belirli şartları taşıması beklenmektedir. Bu şartlar; kompozitin en az iki veya daha fazla mühendislik özelliklerini bünyesinde barındırması, insan yapısı olması ve en uygun özellikleri elde etmek için malzemelerin fazları arasında ki dağılımın düzgün bir şekilde incelenmesi gibi durumlardır.

Yukarıdaki özellikleri kapsayan kompozit malzemeler, takviye elemanlarına göre üç ana grupta ele alınır. Bunlar;

- Elyaf takviyeli kompozit malzemeler,
- Parçacık takviyeli (Taneli) kompozit malzemeler,
- Tabakalı kompozit malzemeler olarak sıralanır.

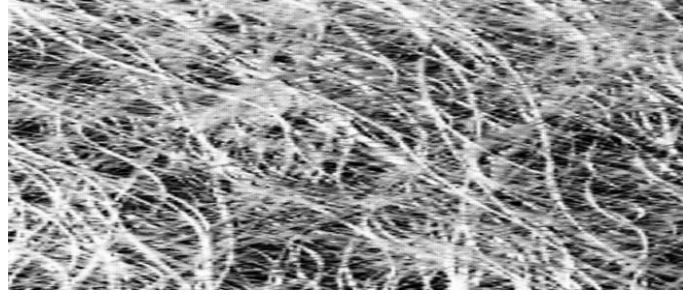
1.7.2.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Kompozit malzemeler de takviye elemanları malzemenin üstün özelliklerini ortaya çıkarmada kullanılır. Elyaf, kompozit içerisinde genelde yük taşıma amacıyla kullanılmaktadır. Matris malzeme, kompozit üstündeki yükü elyaflara transfer ederek malzemenin üstün mühendislik özelliklerinin elde edilmesi ön görülür. Bu tür kompozitlerde takviye elemanı olarak birçok malzeme kullanılabilir (Şahin, 2006).

1.7.2.1.1. Cam (Fiber) Lifler

Cam lifleri (elyafı), takviye elemanı olarak en çok kullanılan malzemelerdendir. Kompozit malzemeye kattığı üstün özelliklerin yanı sıra cam liflerinin temin edilmesi ve malzemede işlenmesi ekonomik bir işlemdir. Birçok matris malzemesiyle kullanılmasına rağmen cam liflerinin en çok kullanıldığı alan cam takviyeli plastik (CTP) endüstrisidir. 1930'lu yıllardan bu yana kullanılan cam liflerinin, plastik malzemeyle kullanılmasına 1950'li yıllarda başlanmıştır. Cam lifleri kompozit malzemelerde sürekli ve kırık formlarda kullanılmaktadır. Cam liflerinin üretiminde temel malzeme ise alkali camdır fakat zaman içerisinde yeni cam lifi türleri ortaya çıkmıştır. Malzeme içerisinde kullanılan

cam lifleri Şekil 1.28'deki gibidir. Ayrıca Tablo 1.4'te endüstride kullanılan cam liflerinin tür ve özellikleri bulunmaktadır (Ersoy, 2001).



Şekil 1. 28. Takviye malzemesi olarak kullanılan cam lifi görüntüsü (Mazumdar, 2001).

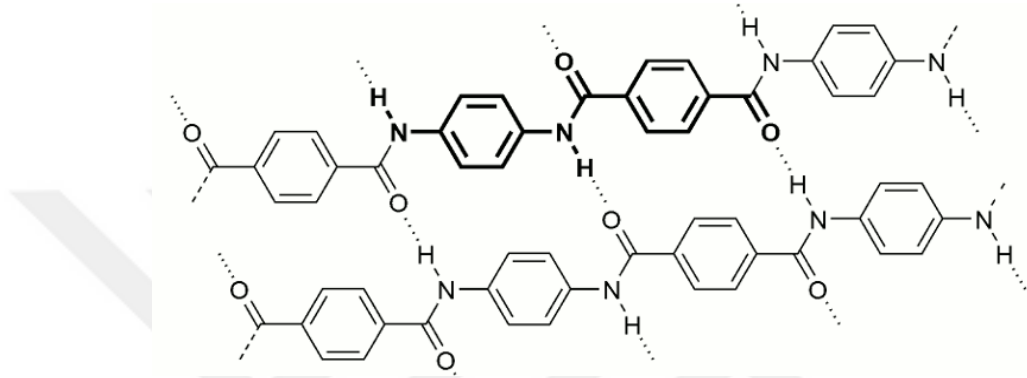
Tablo 1. 4. Cam lifleri türleri ve bazı fiziksel özellikleri (Ersoy, 2001).

Özellikler	E-Camı	A-Camı	M-Camı	S-Camı	C-Camı	D-Camı	R-Camı
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	2.54	2.45	2.89	2.49	2.45	2.16	2.58
Çekme Dayanımı (MPa)	3600	3100	3500	4500	3400	2450	4400
Kopma uzama oranı (%)	4.8	-----	-----	5.4	4.8	-----	-----
Lif Çapı (mm)	$3,20 \times 10^{-3}$	----	----	$3,13 \times 10^{-3}$	----	----	-----
Isıl genleşme katsayısı (cm/cmK°)	1.6×10^{-6}	-----	-----	1.7×10^{-6}	2.2×10^{-6}	3.1×10^{-6}	-----
Yumuşama Noktası (°C)	850	700	----	----	690	770	990

1.7.2.1.2. Aramid Lifler (Kevlar)

Kompozit malzemelerde takviye elemanı olarak kullanılan aramid lifleri, diğer katkı malzemelerine göre daha yüksek çekme dayanımı sağlar. Aramid liflerinin üstün özelliklerinin yanı sıra en büyük dezavantajı ise bu katkı malzemelerinin kesilmesi ve işlenmesi çok güçtür. Aramid lifleri erimedikleri için asidik çözeltiler yardımıyla ekstrüzyon işlemi ile kompozit malzemelere işlenebilir (Mazumdar, 2001).

Aramid lifleri içinde en çok kullanılan türler Kevlar 29 ve Kevlar 49 aramid lifleridir. Şekil 1.29’da molekül yapısı görünen aramid liflerini 1970’li yıllarda endüstri firmaları geliştirmiştir. Aramid lifler asidik çözeltilerden elde edildikleri için üretim esnasında kullanılan çözeltinin molekül yapısı aramid lifinin mühendislik özelliklerini belirler. Örneğin Kevlar aramid liflerinde kullanılan çözelti ‘poli p-fenilentereftalamit’ yani ‘PPT’dir (Aran, 1990).



Şekil 1. 29. Kevlar moleküler yapısı (URL-5, 2019).

1.7.2.1.3. Karbon Lifler

Karbon liflerin üretimi kademeli şekilde gerçekleşir. İlk olarak ön ürün çok yüksek sıcaklıklara ısıtılarak oksitlenme işlemine tabi tutulur. Bu işlemin arkasından ürün kömürleşme ve grafitleşme süreçlerinden geçer. Yüksek sıcaklıklara karşı toleransı çok iyi olan karbon liflerinin özellikleri, işlem sonrası sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterir. Tüm bu işlemler sonucunda karbon lifler yüksek sertlik sağlayan malzeme özelliklerini elde eder. Üstün malzeme özellikleri olmasına rağmen üretim işleminin zahmetli olması ve bununla birlikte karbon liflerinin ekonomik açıdan son derece pahalı olması bu malzemelerin dezavantajlarıdır. Karbon lifleri özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde yer almaktadır (Aran, 1990).

1.7.2.1.4. Asbest Lifler

Asbest, doğada birçok türü bulunan ama temel bileşeni magnezyum silikat olan lifli yapıya sahip organik bir mineraldir. Asbest liflerinin en önemli özelliklerinin başında yanmazlık gelir. Asbest liflerinin boyları çok küçük ölçeklerle ifade edildiğinden dolayı bu

liflerin çekme dayanımı 3000 N/mm^2 'lerin üzerinde olabilmektedir. Bu nedenle, asbest lifler matris malzemeleri çekme dayanımı açısından kötü olan kompozitlerde takviye lifleri olarak kullanılır. Günümüz endüstrisinde, asbest lifleri çoğu zaman beton matrisli malzemelerle birlikte kullanılıp, kompozit malzemenin özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Şekil 1.30'da asbest liflerinin hammaddesi bulunmaktadır (Ersoy, 2001).



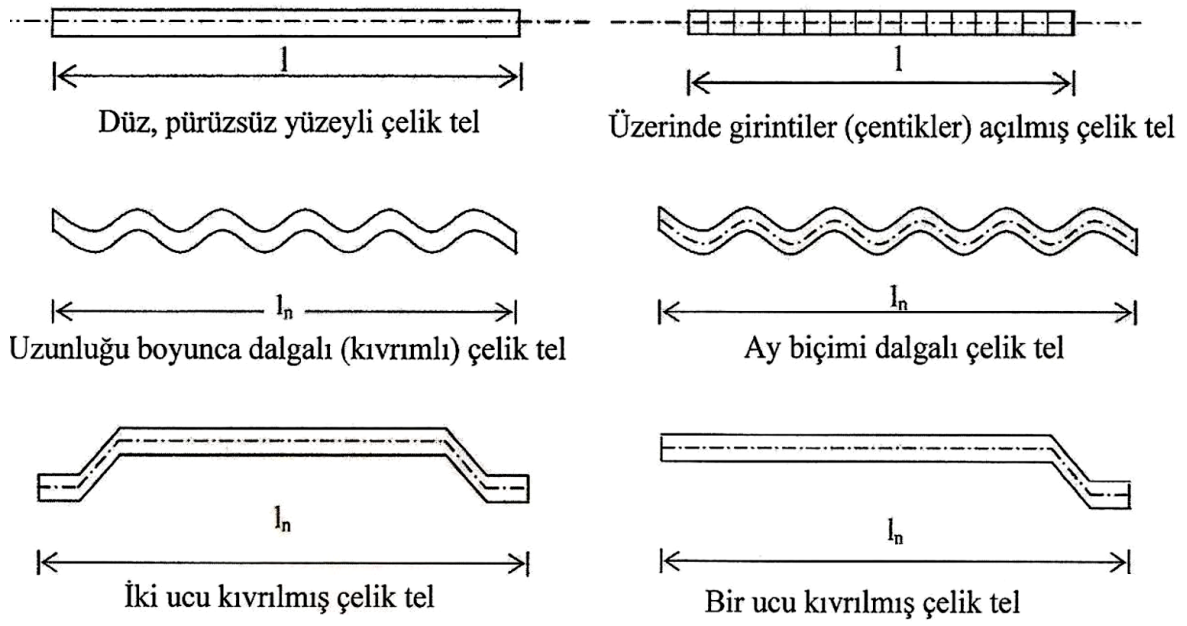
Şekil 1. 30. Asbest ham maddesi (URL-2, 2019).

1.7.2.1.5. Çelik Lifler

Çelik lifler özellikle beton malzemelerle birlikte kullanılan, kompozit malzemenin üstün özelliklerini ortaya çıkartan takviye elemanlarıdır. Çelik lifler matris malzemelerin arasındaki dayanımın artırılması için endüstride sık kullanılmaktadır. Bu malzemeler, kullanım alanlarına göre etkinliklerinin optimum hale getirilebilmesi için farklı şekillerde üretilmektedir. Çelik liflerin şekilleri,

- A-Sınıfı düz tel,
- B-Sınıfı çentikli tel,
- Dalgalı tel,
- Ay biçimli dalgalı tel,
- İki ucu kıvrılmış tel,
- Bir ucu kıvrılmış teldir (Ersoy, 2001).

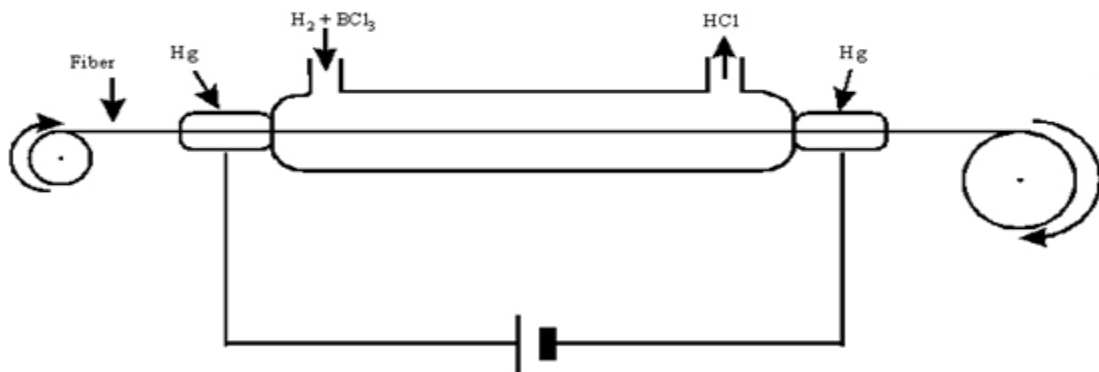
Şekil 1.31'de çelik liflerin çeşitleri bulunmaktadır.



Şekil 1. 31. Çelik liflerin şekilleri (TS10513, 1992).

1.7.2.1.6. Bor Lifler

Bor lifleri oda sıcaklığında katı halde bulunur. Malzeme yapısı çok seyrek ve hafif olduğundan üretimi çok güçtür. Bor elyafın elde edilme işlemi Şekil 1.32'deki gibidir. 1960'lı yıllarda üretilmeye başlayan bor elyafının sektörel kullanımı karbon elyafların üretilmesiyle çok azalmıştır. Bor çok sert ve gevrek bir malzeme olduğundan direk lif olarak elde edilemez. Bu yüzden uygun çözücülerde lif haline dönüştürülür. MMK'lar yüksek dayanım gerektirdiği için bor lifleri pahalı olmasına rağmen bu kompozitlerde takviye elemanı olarak kullanılır (Aran, 1990).



Şekil 1. 32. Bor elyafın elde edilmesi (Bunsell ve Renard, 2005).

1.7.2.2. Paracak Takviyeli (Taneli) Kompozitler

Paracak takviyeli kompozit malzeme üretiminde kullanılan malzemeler; taneler, bağlayıcı ve katkı maddeleri olmak üzere üç ana başlıkta ele alınır. Paracak takviyeli kompozitlerde matris içerisindeki taneler; matrise dağılmış şekilde konumlanmaktadır. Taneli kompozitler yapı sektöründe yoğun şekilde kullanılmaktadır. Bunun nedeni, inşaat sektörünün vazgeçilmez malzemesi olan betonun taneli kompozit olarak kullanılmasıdır. Taneli kompozitlerin üretiminde istenilen uygun mühendislik özelliklerine göre birçok farklı bağlayıcı kullanılabilir. Bu bağlayıcılar, imento, asfalt, sentetik reçineler ve kireç gibi malzemelerdir (Ersoy, 2001). Paracak takviyeli kompozitlerin, matris ve paracak dağılımı Şekil 1.33'teki gibidir.



Şekil 1. 33. Paracak takviyeli kompozitin mikroskobik görüntüsü (Ateş ve Aztekin, 2011).

1.7.2.3. Tabakalı Kompozitler

Tabakalı kompozit malzemeler mühendislikte en eski çağlarda kullanımı başlayan malzemelerdir. Temel olarak iki veya daha fazla malzeme tabakasının yapıştırıcılar sayesinde bir araya getirilerek üretilen kompozit çeşitleridir. Tabakalı kompozitler levha malzemesi görünümündedir. Bu levhalar istenilen özellikleri sağlamak için birbirinden farklı özelliklerdeki tabakaların birleşmesiyle oluşturulur (Ersoy, 2001).

Tabakalı kompozitlerde kural olarak kendisini oluşturan tabakalardan biri mutlaka taşıyıcı özelliği göstermektedir. Sadece tabakalı kompozitlerde değil diğer takviye elemanlı kompozitlerde de aynı durum gözlenir. Bu kompozit malzemelerin temel özelliğidir. Özetleyecek olursak elyaf takviyeli kompozitlerde lifler, paracak takviyeli kompozitlerde taneler, tabakalı kompozitlerde ise levhalardan biri yükü taşır. Kullanılacağı yere göre

farklı üretim teknikleri ile oluşturulan tabakalı kompozitler birçok farklı malzeme çeşidiyle üretilmektedir. Bunlar temel olarak,

- Metal tabakalı kompozit malzeme
- Cam tabakalı kompozit malzeme
- Polimer esaslı tabakalı kompozit malzeme
- Ahşap tabakalı kompozit malzeme
- Tabakalı lifli kompozit malzemedir (Ersoy, 2001).



2. MATERYAL VE METOT

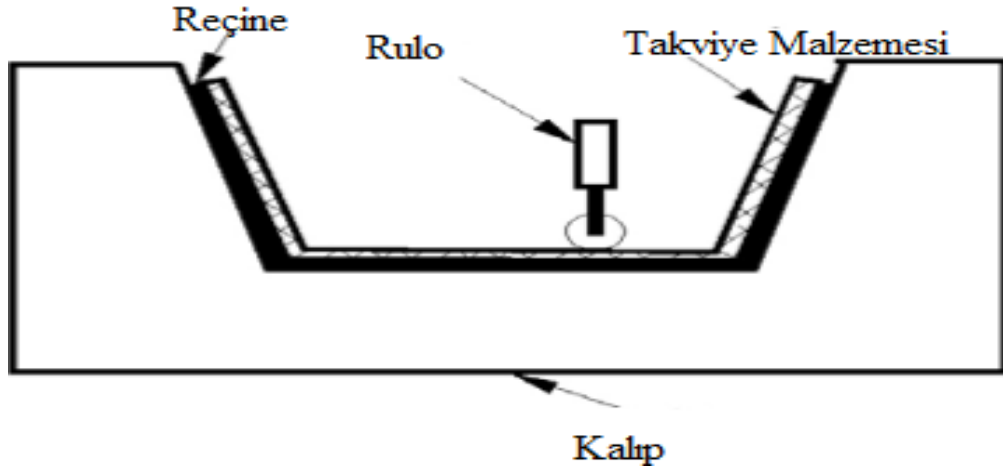
2.1. Polimer Matrisli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri

Polimer matrisli kompozitlerin üretim yöntemleri termoset ve termoplastik malzemeler için farklılık göstermektedir. Termoset kompozitlerin tarihi termoplastik kompozitlerin üretiminden çok daha öncelere dayanmaktadır. İlk olarak 1940'lı yıllarda termoset reçineler kullanılarak kompozit üretimleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonraları üstün mühendislik özellikleri fark edilen termoplastik kompozitlerin üretimiyle süreç devam etmiştir. Polimer matrisli kompozitlerin yaklaşık %75 ini termoset kompozitler oluşturur. Termoset kompozitlerin ilk kullanımı, cam elyaf takviyeli polyester üretimi ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ilk olarak termoset kompozit üretim yöntemleri daha sonra ise termoplastik kompozit üretim yöntemleri ele alınacaktır (Mazumdar, 2001).

2.1.1. Termoset Kompozit Üretim Yöntemleri

2.1.1.1. El Yatırma Yöntemi

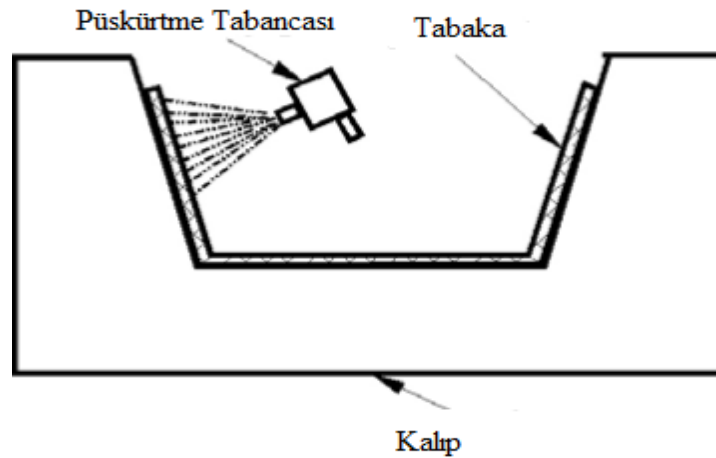
El yatırma, temel olarak bir kalıp içerisine reçine kaplanarak takviye malzemelerin reçine üzerine döşenmesiyle birlikte kompozit malzemenin içerisinde hava kabarcığını önlemek amacıyla rulo gezdirilmesiyle tamamlanan en basit kalıplama yöntemidir. Bu yöntemde reçine malzemesi olarak çoğunlukla polyesterler ve epoksi reçineler kullanılmaktadır. Takviye malzemesi %30'lara kadar kompozit malzemesi içerisinde kullanılabilir. Üretim maliyeti düşük olduğundan genelde deneme amacıyla yapılan prototip parçalar bu yöntemle üretilir. Yoğun olarak deniz endüstrisinde kalıp oluşturmak için kullanılan bu yöntem, havacılık sektöründe de model oluşturmak için kullanılır. Şekil 2.1'de el yatırma yönteminin şematik olarak gösterimi mevcuttur (Şahin, 2006).



Şekil 2. 1. El yatırma yöntemi (Mazumdar, 2001).

2.1.1.2. Püskürtme Yöntemi

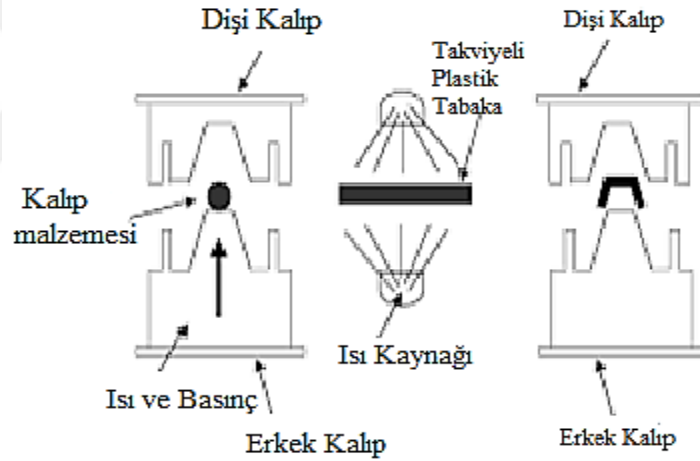
El yatırma yöntemine benzer olan püskürtme yöntemi sadece takviye elemanı ile reçinenin kalıp içerisine uygulanması işleminde farklılık göstermektedir. El yatırma yönteminde, takviye elemanı ve reçine kalıba el ile uygulanırken, püskürtme yönteminde bu malzemeler kalıp içerisine bir püskürtme tabancasıyla püskürtülür. Püskürtme tabancası içerisine uygun katalizörler, reçine malzemesi ve takviye elemanları bulunur. Şekil 2.2’de görülen yöntemle 450-800 kg arası malzeme, kalıp içerisine bir saat içerisinde püskürtülebilir. Malzeme için gerekli kalınlık elde edilene kadar püskürtme işlemi devam eder. El yatırma işlemine göre çok daha hızlı malzeme üretimi sağlayan bu yöntem, kompleks malzemeleri kalıplama işlemleri içinde çok elverişlidir (Mazumdar, 2001).



Şekil 2. 2. Püskürtme yöntemi (Mazumdar, 2001).

2.1.1.3. Basma ve Transfer Kalıplama Yöntemi

Basma ve transfer kalıplama metotları bazı ara işlemler haricinde birbirlerine çok benzeyen iki polimer kompozit üretim metodudur. Basma metodunda, belirli sıcaklık ve basınç altında hazırlanan ve eş zamanlı çalışan erkek ve dişi kalıplar arasına, malzeme yerleştirilerek kalıplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Transfer metodunda ise kalıp malzemesi farklı bir ısıtıcıda ısıtılarak kalıp içerisine transfer edilir ve böyle döküm gerçekleştirilir. Transfer kalıplama yöntemi, basma kalıplama yöntemine göre üretimi güç olan küçük karmaşık şekilde malzemeler üretilebilir. Her iki yöntem içinde kalıp malzemesi olarak, çelik döküm veya dökme demir gibi malzemeler uygundur. Şekil 2.3’de ki yöntemlerle yüksek basınç altında, karmaşık yapıda elde edilmek istenen cam fiber takviyeli polimer matrisli kompozitler üretilebilir (Şahin, 2006).



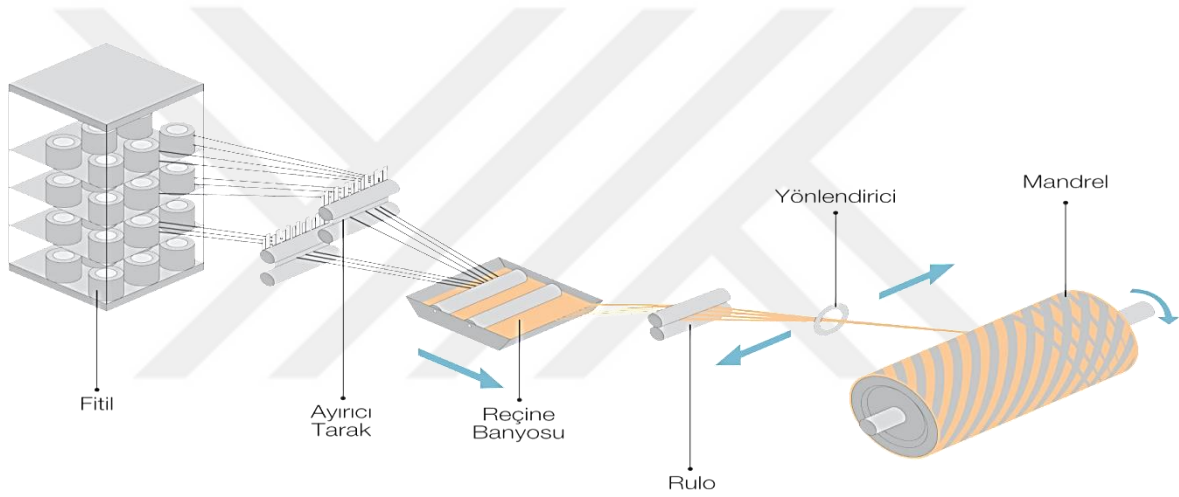
Şekil 2. 3. Basma ve transfer kalıplama (Şahin, 2006).

2.1.1.4. Soğuk Presleme Yöntemi

Bu yöntem, karmaşık olmayan basit numuneleri kalıplamak açısından önerilmektedir. Soğuk presleme metodunda, basma ve transfer kalıplamada ki gibi numune ısıtılmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Kalıp olarak, birbiriyle eşleşen ve 130-340 kPa arası çalışma aralığındaki metal dökümler tercih edilmektedir. Bu yöntemle pürüzsüz yüzey görünümlü ve yüksek mekanik özelliklere sahip malzemeler üretilebilir. Diğer metotlara göre düşük takım maliyeti ile yüksek sıcaklık ve basınç gibi özellikler gerektirmediğinden nispeten daha ekonomik bir yöntemdir (Şahin, 2006).

2.1.1.5. Filament (İplik) Sarma Yöntemi

Filament sarma yöntemi, genellikle karmaşık şekilli malzemelerin üretimi için önerilmektedir. Takviye malzemesi olarak reçine veya lif kullanılan bu yöntemde; makine denetiminde geometrik şekilleri farklı olabilen bir mandrel üzerine, reçine veya lifler malzemenin özelliklerine göre belirli bir düzende sarılır. Çok hızlı üretim işlemi olan bu yöntem, malzeme üzerine takviye elemanlarının döşenmesi için oldukça ekonomik bir yöntemdir fakat üretim işlemi sadece karmaşık geometriye sahip malzemelerle sınırlıdır. Genellikle boru ve basınçlı tank üretimi için bu yöntem tercih edilmektedir. Şekil 2.4'te filament sarma yönteminin iş akış şeması gösterilmektedir.

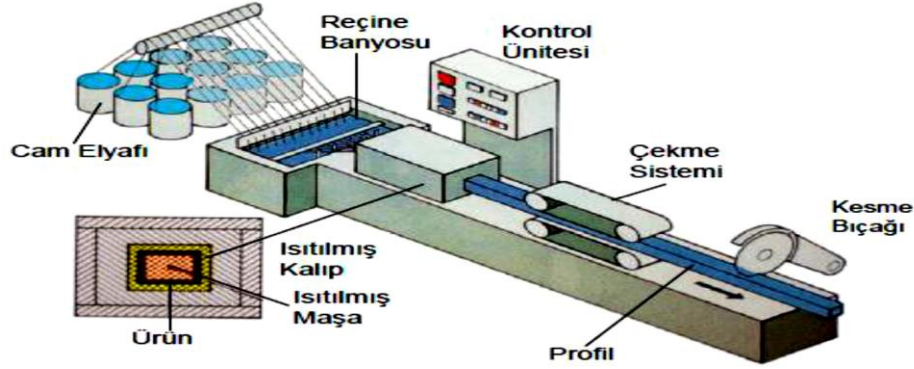


Şekil 2. 4. Filament sarma yöntemi (URL-6, 2019).

2.1.1.6. Pultrüzyon (Profil Çekme) Yöntemi

Pultrüzyon işlemi düşük maliyetli ve yüksek hacimli malzeme üretimine elverişli bir üretim yöntemidir. Reçineler, reçine banyosuna girerek emdirilmiş lifler malzeme üretimi için bir kalıp içerisinden çekilir. Ekstrüzyon yöntemiyle çok benzer olan bu işlemde sadece ekstrüzyon işleminin aksine üretilecek malzemenin hammaddesi kalıba çekilir. Ekstürzyon yönteminde ise üretimi yapılacak malzemenin hammaddesi kalıba basınçla itilmektedir. Pultrüzyon işlemi basit, sürekli ve otomatik gerçekleşen bir yöntemdir. Şekil 2.5'te pultrüzyon işleminin şematik olarak gösterimi mevcuttur. Bu yöntemle elde edilen malzemeler işlem sonrası herhangi bir müdahale gerektirmeyen

yumuşak malzemelerdir. Bu yöntemle genellikle sabit kesitli farklı profil çubuklar elde edilmektedir (Mazumdar, 2001).



Şekil 2. 5. Pultrüzyon yöntemi şematik gösterimi (URL-7, 2019).

2.1.1.7. Tabakalı Birleştirme

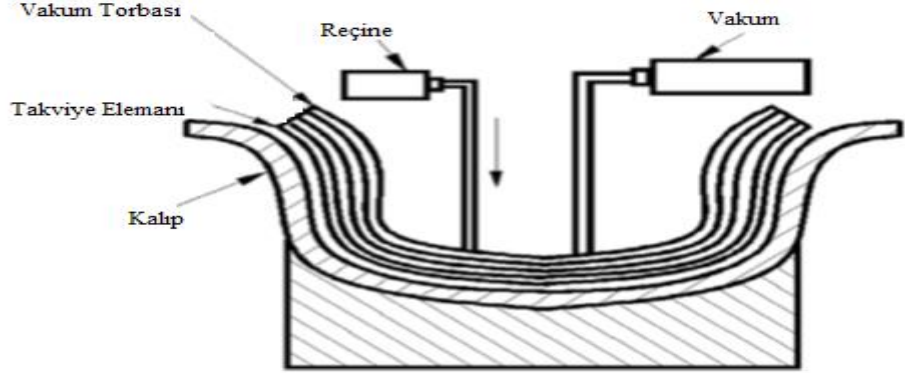
2.1.1.7.1. Basıncılı Torba Kalıplama

Tabakalı birleştirme yöntemleri arasındaki en düşük maliyetli işlemdir. El yatırma işlemine benzer bir şekilde malzemeler kalıba yatırılır. Elyaf ve matris malzeme istenilen kalınlığa ulaşana kadar işleme devam edilir. Kalıp kapağına bağlı olan lastik torba içerisine hava doldurularak tabakalara basınç uygulanır. Bu basınç sayesinde malzeme içerisindeki fazla reçine uzaklaştırılır ve malzeme elde edilir.

2.1.1.7.2. Vakum Torba Kalıplama

Vakum torba kalıplama yöntemi temel olarak el yatırma yönteminden türetilmiştir. Takviye malzemeleri kalıp üzerine yerleştirildikten sonra tabakalar arası birleşim için kalıp ısıtılır ve malzeme istenilen kalınlığa ulaşana dek işleme devam edilir. Malzeme ön hazırlık işlemi bittikten sonra kalıba, polivinil alkolden üretilen bir torba, vakum sistemi aracılığıyla bağlanır. Vakumlanmış kalıplı parça sertleşme işlemi için bir fırına transfer edilir. Vakum sistemi üzerine basınç uyguladıktan sonra tabakalar arasında biriken hava ve reçine malzemeden uzaklaştırılarak malzeme elde edilir. Düşük kalıp maliyeti ve seri üretim prosesi gibi birçok avantajı olan bu yöntem, gıda sektöründe ve ambalaj-paketleme

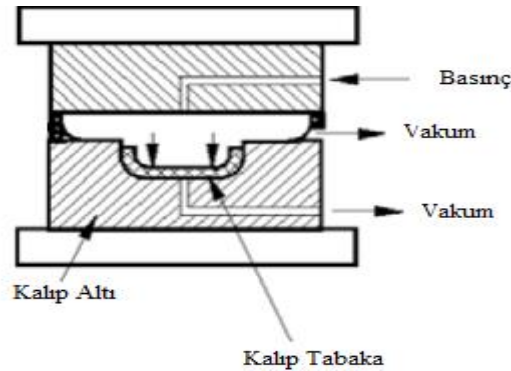
sektöründe yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Şekil 2.6’da vakum kalıplama prosesi şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2. 6. Vakum kalıplama işlemi (Mazumdar, 2001).

2.1.1.7.3. Otoklavda Torba Kalıplama

Termoset ve termoplastik malzemelerin otoklavda üretim işlemleri çok benzerdir. Malzeme, ön işlemleri bittikten sonra kalıplama işlemi için bir vakum içerisinde otoklava yerleştirilir. Otoklav yönteminin vakum kalıplama yöntemindeki gibi bir ısıtıcıya gereksinimi yoktur. Otoklav içerisinde bulunan ısıtıcı, otoklav sıcaklığını 180 °C’ye kadar çıkarabilir. Bu ısıtıcı kalıp sertleşene kadar ısıtma işlemine devam eder. Sertleşen kalıp içerisindeki hava ve fazla takviye malzemesi, vakumla birlikte malzemeden uzaklaştırılarak nihai ürün elde edilir. Vakum torba kalıplama yöntemine göre nispeten daha maliyetli olan bu yöntem, ara ısıtma işlemi gerektirmediği için endüstride yoğun kullanım alanına sahiptir. Şekil 2.7’de otoklav düzeneğinin şematik gösterimi mevcuttur (Mazumdar, 2001).



Şekil 2. 7. Otoklav çalışma prosesi (Mazumdar, 2001).

2.1.2. Termoplastik Kompozit Üretim Yöntemleri

2.1.2.1. Ekstrüzyon Yöntemi

Ekstrüzyon yöntemi, termoplastik şekillendirme yöntemleri arasında en çok kullanılan yöntemdir. Bu yöntemle takviyeli ve takviyesiz polimer malzemeler; boru, levha, film şeritleri ve plaka gibi değişik şekil ve kalınlıklarda üretilebilir. Termoset malzemelerin ekstrüzyon yöntemiyle üretimi çok elverişli değildir. Termoset malzemelerin üretimi için diğer kompozit üretim yöntemleri tercih edilmelidir. Termoplastik malzemelerin üretiminde ise çoğu zaman ekstrüzyon yöntemi tercih edilmektedir. Ekstrüzyon işlemi için kullanılan polimer malzemeler granül olarak temin edilmektedir ve bu işleme tabi olan polimerler genellikle; PP, PE, PVC, PS ve PA gibi düşük yoğunluklu üstün mühendislik özelliklerine sahip olan malzemelerdir.

Ekstrüzyon makinesinin temel bileşenleri; besleme hunisi, kovan, dönel vida, ısıtıcı ve itici bölme olmak üzere genel olarak beş kısımdan oluşur. Besleme hunisi polimer malzemelerin sisteme aktarıldığı kısım olarak bilinir. Besleme hunisine, üretilecek malzemenin hammaddeleri konur ve buradan kovana aktarılır. Malzeme eğer takviyeli üretilecek ise daha önceden hesaplanan hacimsel oranlarda besleme hunisine konularak üretim gerçekleşir. Genelde ekstrüzyon makinesinde takviyeli plastik üretimi gerçekleştirildiğinden iki veya daha fazla malzeme huniye konularak kovana aktarılır ve böylece kompozit üretim işleminin ilk kısmı tamamlanmış olur. Isıtıcı olarak, ekstrüzyon makineleri için genelde ısıtıcı bantlar seçilir. Isıtıcılar yardımıyla granül halinde bulunan polimerler, eriyik hale gelerek kovan içerisine itilir. Ergime işlemi, kovan üzerinde bulunan ısıtıcı bantlar sayesinde gerçekleşir. Kovan ise besleme hunisinden aktarılarak gelen plastik granüllerin boşaldığı alan olarak tanımlanır. Kovan, içerisinde malzemenin karışımı sağlayan dönel vida ile temas halindedir. Kovan içerisindeki sıcaklık ve basınçtan dolayı, ekstrüzyon makinesinde kovan seçimi çok önem teşkil eder. Ekstrüzyon makinelerinde, termoplastik malzeme ile etkileşime geçmeyen, belirli sıcaklık ve basınç altında özelliklerini yitirmeyen kovanlar tercih edilir. Dönel vida mekanizması ise kovan içerisinde iticilere temaslı bir şekilde bulunmaktadır. Ergiyen plastik malzemeler dönel vida mekanizması sayesinde homojen olarak karışarak, tahrik sistemi yardımıyla kalıba itilir. Dönel vida mekanizması, kovan içerisindeki yüksek sıcaklık ve basınçtan dolayı

elik malzemelerden yapılır ve vida yüzeyinin pürüzsüz olması çok önemlidir. İtici kısımlar ise dönel vidanın hemen arkasında bulunmaktadır. Besleme hunisinden bırakılan plastik granüllerin kovan içerisinde aktarılmasıyla dönel vida ve tahrik mekanizması eş zamanlı çalışmaktadır. İtici mekanizmalar, ergimiş polimerlerin dönel vida tarafından döndürülerek malzemenin ilerlemesini sağlayan kısımdır.

Bu alışmada, PP, AYPE, YYPE ve cam fiber takviye malzemesi, ekstrüzyon makinesinde belirli hacimsel oranlarda birleştirilerek takviyeli polimer matrisli kompozitler üretilmiştir. İlk olarak malzemelerin, hassas terazi ve yoğunluk lerde ağırlık ve yoğunlukları tespit edilmiştir. Daha sonra ise üretime geçilmiştir. şekil 2.8’de cam fiber takviyeli plastik üretimi yapılan ekstrüzyon makinesi görülmektedir.



şekil 2. 8. Ekstrüzyon makinesi

Ekstrüzyon makinesinde üretim işlemine başlanmadan önce PP, AYPE, YYPE ve 3 mm kırpık cam fiberlerin malzeme ağırlıkları Şekil 2.9'daki Radwag PS 510/C/1 cihazı ile ölçülmüştür. İlk olarak cihaz ölçüm noktasına yerleştirilen boş beherin ağırlığı belirlenmiştir. Daha sonra beher içerisine yoğunluğu ölçülecek malzemeler, belirli hacimlerde konulmuş ve malzemelerin ağırlıkları tespit edilmiştir. Son olarak Radwag AS 220.R2 cihazında belirli hacimsel oranlarda ölçümü yapılan polimer ve takviye malzemelerinin yoğunlukları tespit edilmiştir.



Şekil 2. 9. Yoğunluk ölçer ve hassas ölçüm terazisi

Belirli hacimsel oranlarda birleştirilip üretimi yapılacak bu malzemelerin hassas terazi ve yoğunluk ölçerle hesaplanan yoğunlukları Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

Tablo 2. 1. Deney malzemelerinin yoğunlukları

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)
Polipropilen (PP)	0.905
Alçak yoğunluklu polietilen (AYPE)	0.92
Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE)	0.954
Cam fiber	2.55

Yoğunlukları belirlenen malzemeler belirli hacimsel oranlarda birleştirilerek ekstrüzyon makinesine konulmuştur. Ekstrüzyon makinesi; laboratuvar tipi, tam otomatik ve çift vidalıdır. 285 kilogram ağırlığında ve 2.2-4 kW aralığında güç üretebilen ekstrüzyon

makinesi PE, PP, PS, PET, ABS, EPS ve PVC gibi polimerleri termoplastik şekillendirmek için üretilmiştir. Boyutları 2000×500×1500 mm olan bu çift vidalı ekstrüzyon makinesi; küçük boru, levha, film ve plaka üretimi gerçekleştirmektedir.

Ekstrüzyon makinesindeki gösterge panelleri aracılığıyla basınç, sıcaklık, çalışma hızı ve vida devir aralığı gibi parametreler ayarlandıktan sonra üretilen cam fiber takviyeli; PP, AYPE ve YYPE malzemeler, besleme hunisine dökülerek kovan içerisine iletilmiştir. Üretim esnasında, bazı proseslerde malzeme üzerinde çizik oluşumu, işlem sıcaklığına ulaşamama ve malzemenin kopması gibi sorunlarla karşılaşıldığından, bazı hacimsel oranlarda birleştirme işlemleri birkaç kez tekrarlanmıştır. Şekil 2.10'da görüldüğü üzere takviye malzemesi cam fiber ile polimerler ekstrüzyon işlemine tabi tutularak belirli hacimsel oranlarda cam takviyeli plastikler üretilmiştir. Ekstrüzyon işlemi tamamlandıktan sonra bu kompozit malzemeler, 40×40×1 mm boyutlarında levha üretimi gerçekleştirmek üzere enjeksiyon kalıplama işlemine aktarılmıştır.



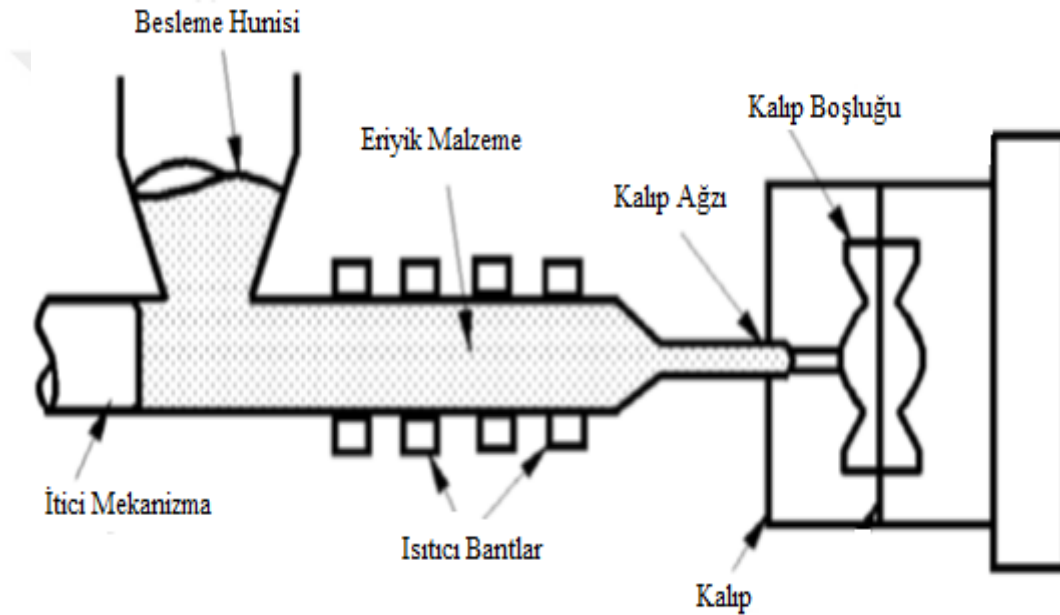
Şekil 2. 10. Ekstrüzyon işlemi ile üretilen cam fiber takviyeli kompozitin oluşumu

2.1.2.2. Enjeksiyon Kalıplama

Enjeksiyon makinesi, polimer malzemeleri ergiterek istenilen kalıp içerisinde belirli boyutlarda üretimini gerçekleştiren sıcak şekillendirme prosesidir. Özellikle termoplastik malzeme üretimi için kullanılmaktadır. Yüksek maliyetli bir üretim yöntemi olduğundan

seri parça üretimi için uygundurlar. Kalıplama süresi on ile otuz saniye arasında olmakla birlikte bazı parçalar için bu süre altmış saniyeye kadar çıkabilir. Enjeksiyon kalıplama yöntemiyle istenilen kompleks şekillerde parça üretimi mümkündür.

Enjeksiyon bölümü ve kilitleme bölümü olmak üzere iki ana bölümden oluşur. Enjeksiyon bölümü granül haldeki polimer malzemenin eritilip kalıba aktarıldığı bölümdür. Kilitleme bölümü ise ergimiş polimerin enjeksiyon içerisinde bulunan kalıba döküldüğü açılıp kapanabilen sıkıştırma kısmından oluşmaktadır. Enjeksiyon makinesinin çalışma prensibi Şekil 2.11’de gösterilmektedir (Mazumdar, 2001).



Şekil 2. 11. Enjeksiyon kalıplama prosesi (Mazumdar, 2001).

Ekstrüzyon bölümünde üretilen kompozit granüller enjeksiyon makinesinde plastik şekillendirme işlemi için enjeksiyon işlemine tabi tutulmuştur. Kalıplama işleminde, Ekin 100 markalı enjeksiyon makinesi kullanılmıştır. Enjeksiyon makinesi 100 ton mengene kapama kuvvetine ve 225 gram enjeksiyon ağırlık kapasitesine sahiptir. 40 mm vida çapı olan bu makinenin kolonlar arası mesafesi 360×360 mm’dir. Enjeksiyon kalıplama işleminde kullanılan makine Şekil 2.12’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 12. Enjeksiyon kalıplama makinesi

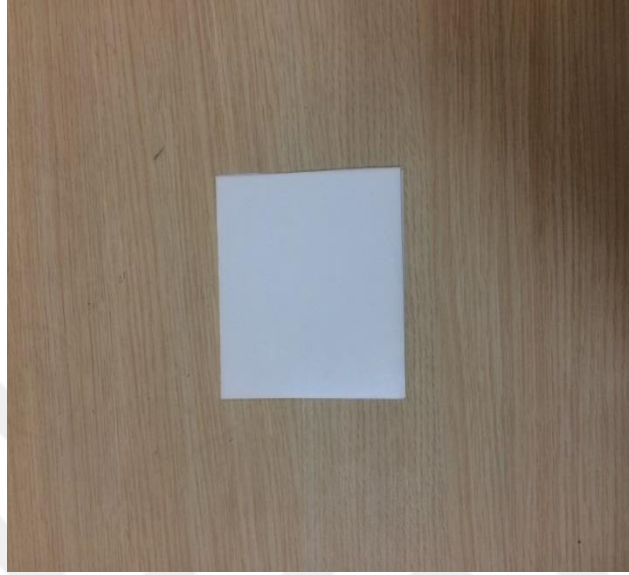
Enjeksiyon makinesinde değişik hacimsel oranlarda takviye malzemesine sahip olan polipropilen, alçak yoğunluklu polietilen ve yüksek yoğunluklu polietilen malzemeler Şekil 2.13’te görülen kalıpta $40 \times 40 \times 1$ mm boyutlarında levha olarak üretilmiştir.



Şekil 2. 13. Enjeksiyon kalıp ünitesi

Toplamda dokuz adet numune için üretim sürecinde gerçekleştirilecek hatalardan dolayı ortalama üçer adet numune üretimi uygun görülmüştür. Nitekim üretim esnasında

gerçekleşen kalıp girişinin tıkanması, kararmalar ve malzemede çökme hatalarından dolayı bazı kompozitlerin kalıplama işlemleri tekrarlanmıştır. Enjeksiyon kalıplama işlemi ile üretilen kompozitler Şekil 2. 14’te gösterilmiştir.



Şekil 2. 14. Enjeksiyon kalıplama işlemi ile elde edilen kompozit malzemeler

Ekstrüzyon işleminde cam fiber malzemesi ile polimer malzeme birleştirildikten sonra enjeksiyon ünitesine aktarılan cam takviyeli polimer kompozitler, 40×40×1 mm ebatlarında kalıplandıktan sonra ısı iletim katsayılarının tayin edilmesi için hazır hale getirilmiştir.

2.1.3. Termoset ve Termoplastik Kompozit Üretim Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Kompozit üretim yöntemleri daha öncede bahsedildiği üzere termoset ve termoplastik üretim yöntemleri için farklı şekillerde ifade edilmektedir. El yatırma, vakum torba kalıplama ve püskürtme yöntemi gibi kompozit üretim yöntemleri açık kalıplama işlemleri arasında olup sıklıkla termoset kompozit üretimi için tercih edilirken, ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama gibi işlemler genelde termoplastik yöntemler için tercih edilmektedir. Tablo 2.2’de termoset ve termoplastik kompozit üretim yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları sıralanmıştır.

Tablo 2. 2. Termoset ve termoplastik kompozit üretim yöntemlerinin karşılaştırılması (Mazumdar, 2001).

Termoset Kompozit Üretim Yöntemleri	Termoplastik Kompozit Üretim Yöntemleri
Üretim işlemi kolaydır.	Üretim işlemi nispeten daha zordur.
Termoset kompozit üretim yöntemleriyle düşük hacimli üretim yapılabilir.	Yüksek hacimli üretim yapılabilir.
Yüksek sıcaklık ve basınç işlemleri gerektirmez.	İşlem yüksek sıcak ve basınç gerektirir.
Düşük maliyetli kalıplamaya sahiptir.	Kalıpla yöntemleri termoset kompozitlere göre daha yüksek maliyet gerektirir.
Geri dönüşümleri mümkün değildir.	Geri dönüşümleri mümkündür.
Kürlenme süreleri uzundur.	Kürlenme süresi çok kısadır.

2.2. Malzemelerin Isı İletim Katsayılarının Belirlenmesi

Bilindiği üzere malzemeler ısılarını iletim, ışıınım ve taşınım olmak üzere üç yolla iletebilirler. İletim yoluyla gerçekleşen durumlarda, termodinamiğin yasaları gereği gerçekleşen bir doğal akışla malzemenin ısı iletimi gerçekleşmektedir. Çünkü doğal akıştaki gibi ısı malzemede sıcak bölgeden soğuk bölgeye doğru hareket etmektedir. Bu yüzden sıcaklık farkı oluşmakta ve kolaylıkla malzemenin ısı iletim katsayısı hesaplanmaktadır.

Isı geçişinin iletimle gerçekleştiği durumlarda Fourier kanunu ile hesaplamalar yapılmaktadır. Bu kanuna göre herhangi bir eksenel yönde geçen ısı miktarı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \text{ (W)} \quad (2.1)$$

Burada sırasıyla;

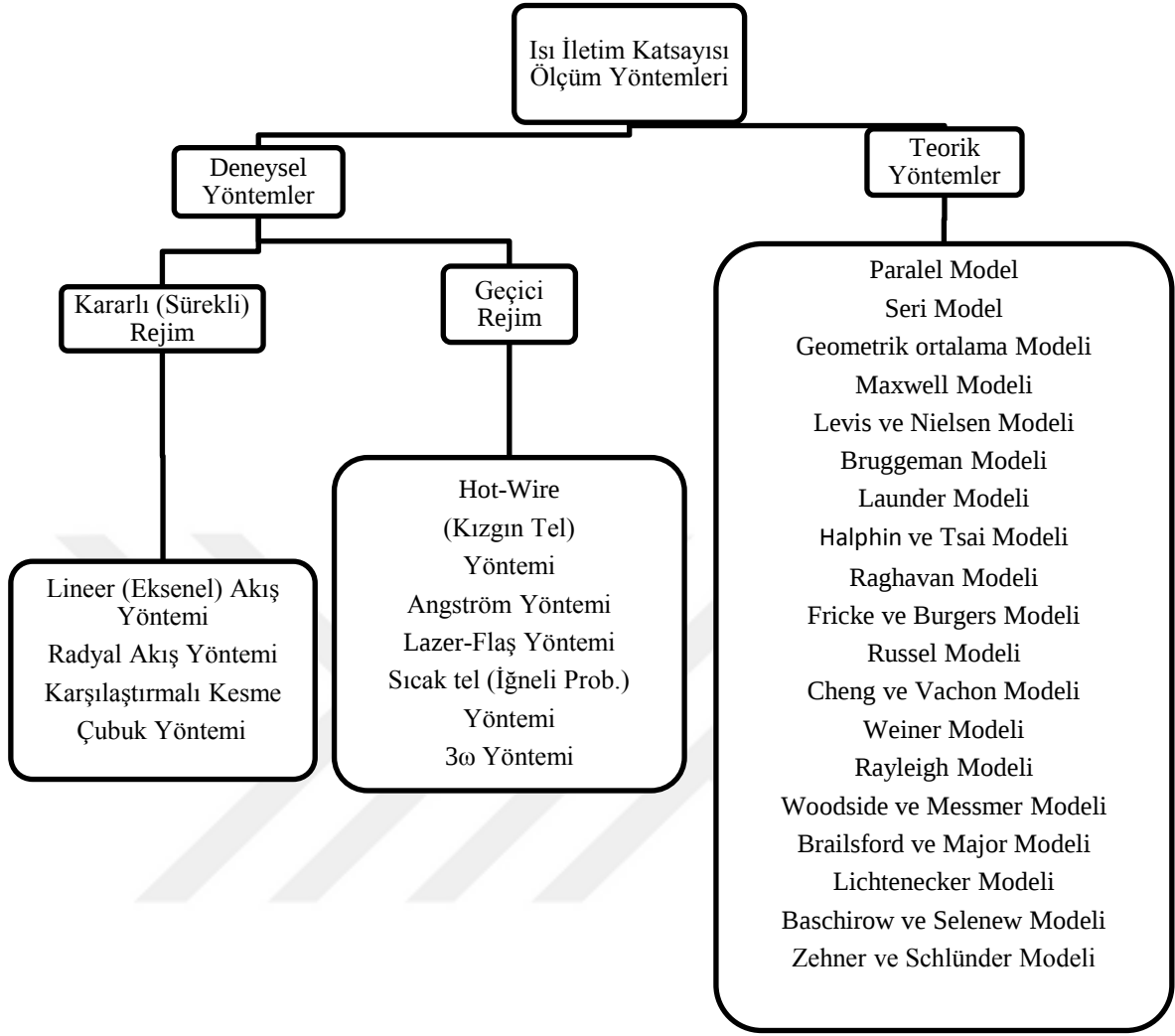
- Q, ısı iletimi (W)
- dx, ısı transferinin gerçekleştiği uzunluk (m)
- dT, sıcaklık farkı (°C)
- A, ısı transferinin gerçekleştiği alan (m²)
- K, ısı iletim katsayısını (W/mK) ifade eder (Deneyan, 2015).

İletim yoluyla ısı iletim katsayısı tayin edilirken birçok metot kullanılabilir. Bunlar teorik veya deneysel metotlar olarak sınıflandırılır. Deneysel metotlar ise kararlı veya geçici rejimlerde gerçekleşebilir. Dünyadaki bütün katı, sıvı ve gaz halinde bulunan maddelerinin iletim katsayısı bulunmaktadır ve ısı iletim katsayısı malzemenin fiziksel özelliklerindendir. Sadece ısıyım yoluyla malzemenin ısı katsayısı hesaplanırken maddesel ortam gerekmemektedir. Tüm malzemelerin kendilerine özgü fiziksel ve kimyasal yapıları bulunduğu için hepsinin farklı iletim katsayısı değerleri mevcuttur. Dünya genelinde ısı iletim katsayısı birimi W/mK olarak kabul edilir ve λ ya da k harfi ile gösterilir. Günümüzde daha düşük ısı iletim katsayısı daha iyi yalıtım esasına dayandığından dolayı ısı iletim katsayılarını düşürmek için birçok çalışma yapılmaktadır. Buna paralel olarak ısı iletim katsayılarının ölçüm hassasiyetini iyileştirmek içinse gün geçtikçe yeni yöntemler geliştirilmektedir. Literatürde ilk kullanılan yöntemler kararlı ölçüm yöntemleridir. Bu yöntemlerde ölçüm yapılacak numune, sistem kararlı duruma gelene kadar bekletildiğinden dolayı ölçüm alma süresi uzamaktadır. Diğer bir yöntem olan geçici rejimlerde ise sıcaklık sabitliği beklenilmeden ısı iletim katsayısı değerleri tespit edilmektedir. Bu yöntem daha hızlı sonuç vermesine rağmen ölçüm doğruluğunu arttırmak için deney işlemi birkaç kez tekrarlanabilmektedir. Bu yöntemlerden başlıcaları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir. Örnek olarak bir malzemenin ısı iletim katsayısı, Fourier kanunlarından yola çıkıp kararlı rejimde bir ısı çift (thermocouple) kullanarak, geçici rejim yöntemlerinden Hot-wire yöntemi ya da Lazer-flaş metodu kullanılarak veya teorik yöntemlerden herhangi biri kullanılarak hesaplanabilir. Malzemelerde ısı iletim katsayısının kullanıldığı alanlarda ısı geçirgenlik katsayısı (u) ile sık karşılaşılır. Isı geçirgenlik katsayısı farklı malzemelerin art arda sıralanmasıyla oluşmuş bir malzemenin ısı geçişi karşısında gösterdiği direnç olarak ifade edilir. Formülü ise;

$$u = \frac{\lambda}{d} \quad (2.2)$$

ile ifade edilmektedir yani ısı geçirgenlik katsayısı iletim katsayısının mevcut işlemde kullanılan levha kalınlığına oranı ile bulunur.

Bazı malzemelerin Şekil 2.15'te uygulanan yöntemlerden herhangi biri ile elde edilen ortalama ısı iletim katsayıları Tablo 2.3'teki gibidir.



Şekil 2. 15. Isı iletim katsayısı ölçüm yöntemlerinin şematik gösterimi

Tablo 2. 3. Bazı malzemelerin ısı iletim katsayıları (Tritt, 2004).

Malzemeler	Isı İletim Katsayısı (k) (W/mK)	Malzemeler	Isı İletim Katsayısı (k) (W/mK)	Malzemeler	Isı İletim Katsayısı (k) (W/mK)
Cam lifi	0.045	Polistren (PS)	0.07	Al ₂ O ₃	39
Polipropilen	0.12	Çimento harcı	1,60	MgO	38
Alüminyum	237	Odun lifli levha	0.15	Ahşap	0.2
Saf bakır	402	Poliüretan	0.035	PPR	0.15
Asbest	0.28	Fenolik Reçine	0.032	Gaz Beton	0.15
Çinko	114.5	Polietien	0.47	Tuğla	0.45

2.3. Malzemelerin Isı İletim Katsayısı Hesaplanmasında Kullanılan Teorik Metotlar

Malzemelerin ısı iletim katsayılarını tayin etmek için birçok teori geliştirilmiştir. Malzemelerin birçoğunun mikroskobik düzeyde görülen gözeneklerinin büyüklüğü, küçüklüğü veya malzemenin yapısında birden fazla bileşen bulundurması gibi özelliklerinden dolayı, teorilerin geliştirilmesi hala devam etmektedir. Bu teorik metotlardan günümüzde en yaygın kullanılmakta olanları bu kısımda açıklanacaktır.

2.3.1. Seri Model

Diğer teorik modellemelere kıyasla en basit yöntemler seri ve paralel modellerdir. Bu metot, teknik olarak iki malzemenin ısı akışının olduğu kısmın levha yüzeyine dik olarak gelmesiyle yalıtım özelliğinin optimuma ulaşmasıyla elde edilir. Bu durum gerçekleştiği esnada ısı iletimi ters orantılı olarak minimuma ulaşır ve ısı iletim katsayısı elde edilir. Teorik olarak modellenmesi aşağıdaki gibidir (Karaağaç ve ark., 2016).

$$k_e = \left(\frac{v_f}{\lambda_f} + \frac{(1-v_f)}{\lambda_p} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

2.3.2. Paralel Model

Paralel modelde ise seri modelin aksine iki aynı boyuttaki levhanın arasından geçen akış, levha yüzeyine paralel olarak gerçekleşmektedir. Geliştirilen bu metotta iki levha arasında maksimum yalıtım sağlandığında ısı iletim katsayısı minimum değerinde tespit edilir. Teorik olarak modellenmesi aşağıdaki gibidir (Karaağaç ve ark., 2016).

$$\lambda = \lambda_f \cdot v_f + \lambda_p \cdot (1 - v_f) \quad (2.4)$$

2.3.3. Geometrik Ortalama Model

Geometrik ortalama modeli, seri ve paralel modellerine göre farklılık gösterir. İçerisinde iki farklı tür bileşen bulunduran malzemenin ısı iletim katsayısı belirlenirken bu

malzemeyi oluşturan bileşenlerin hacimsel oranlarına bağlı olarak geometrik ortalaması alınarak, modelleme oluşturulur. Teorik olarak modellenmesi aşağıdaki gibidir (Uzun ve Yeşilyurt, 2017).

$$\lambda = \lambda_f^{v_f} \cdot \lambda_p^{(1-v_f)} \quad (2.5)$$

Denklemlerde verilen simgeler sırasıyla,

- λ , efektif ısı iletim katsayısı
- λ_p , polimer malzemenin ısı iletim katsayısı
- λ_f , takviye malzemesinin ısı iletim katsayısı
- v_f ise katkı malzemesinin kompozit malzeme içerisindeki hacimsel orandır (Pehlivanlı, 2016).

2.3.4. Maxwell Modeli

Maxwell, kompozit malzemelerin ısı iletim katsayısını bulmak için teorik model oluşturmuş ilk araştırmacılardandır. 1873 yılında ilk çalışmasını kompozitlerin içerisinde bulunan bileşenlerin birbirleri ile teması olmadığını kabul ederek gerçekleştirmiştir. Homojen matris içerisinde bulunan küresel gözenek oranının az olduğu (%10 altı) durumlar ve küresel gözeneklerin kompozit içerisinde rastgele dağılmış olduğu kabul edilerek bu teori modellenmiştir. Teorik olarak modellenmesi ise aşağıdaki gibidir.

$$k_{ef} = k_m \left[\frac{k_g + 2k_m + 2v_g(k_g - k_m)}{k_g + 2k_m - v_g(k_g - k_m)} \right] \quad (2.6)$$

Bu eşitlikte,

- k_{ef} = efektif ısı iletim katsayısı
- k_m = matris malzemesinin ısı iletim katsayısı
- k_g = gözenekli bölümün ısı iletim katsayısı
- v_g = gözenek hacim oranıdır (Maxwell, 1892).

2.3.5. Fricke ve Burgers Modeli

Fricke ve Burgers, Maxwell metodundaki küresel gözenek kabulü yerine, malzemede ki gözenek şekillerinin farklı durumlarda olabileceğini vurgulamıştır. Bundan dolayı Maxwell'in teorisinden yola çıkarak kompozit malzemelerdeki gözenek şeklini elips kabul edip yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Maxwell metodunda da olduğu gibi bu metotta da malzemedeki bileşenlerin birbirlerini etkilemediği kabul edilmiştir. Teorik olarak modellenmesi ise aşağıdaki gibidir.

$$k_{ef} = \left[\frac{k_m \phi_m + k_f (1 - \phi_m) F}{\phi_m + (1 - \phi_m) F} \right], \quad F = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left[1 + \left\{ \left(\frac{k_f}{k_m} \right) - 1 \right\} \cdot g_i \right]^{-1}, \quad \sum_{i=1}^3 g_i = 1 \quad (2.7)$$

Diğer metotlara göre bilinmeyen terimler açıklanacak olursa, F iki bileşenin ortalama sıcaklık farkının oranı, g_i değeri ise gözenekler küresel yerine elips olarak kabul edildiğinden gözenek elipsinin yarı asal eksenini tanımlanır (Uzun ve Yeşilyurt, 2017).

2.3.6. Raghavan Modeli

Hemen hemen bütün teorik yöntemler gerçekleştirilirken kompozit malzemedeki gözeneklerin durumları incelenmiştir. Bazı metotlarda gözenek büyüklüğü veya küçüklüğü bazı metotlarda ise gözeneklerin geometrik şekillerine göre yöntemler araştırılmıştır. Raghavan ve arkadaşlarının geliştirdiği metotta ise gözeneklerin şekilleri ve malzeme içerisindeki dağılımı irdelenmemiştir. Sadece malzemedeki gözenek oluşumu oranı hesaba katılmış ve bu orana göre bir yöntem geliştirmişlerdir. Bir önceki metotlarda ki katsayıları ek olarak bu metotta formüle P katsayısı eklenmiştir. Bu metotta; P, boyutsuz bir sayı olup malzemedeki bütün boşluk oranının malzeme hacmine oranı ile elde edilir ve gözenek (porozite) oranı olarak tanımlanmaktadır. Raghavan metodunun ise formülize edilmiş hali aşağıdaki gibidir (Raghavan ve ark, 1998).

$$k_{ef} = k_m \left[(1 - P)^{\frac{3}{2}} + \frac{k_g}{k_m} \cdot P^{\frac{1}{4}} \right] \quad (2.8)$$

2.3.7. Bruggeman ve Landauer Modeli

Bruggeman ve Landauer Modeli olarak adlandırılan bu metotta, Maxwell metodunun tersine malzeme içerisindeki gözenek oranının fazla olduğu deney koşulları için araştırma yapılmıştır. Bruggeman, birbirlerine bağlı iki bileşenin ısı iletim katsayısının efektif olarak ölçülebileceği “etkin ortam” olarak adlandırılan bir denklem türetmiştir. Etkin ortam durumunda iki bileşen birbirleri yerine geçebilmektedir.

Bruggeman metodunun yetersiz kalmasından dolayı, Landauer bu metodu geliştirerek “efektik ortalama süzülme teorisi” (EMPT) olarak adlandırılan bir denklem türetmiştir. Bu türetilen denklem aşağıdaki gibi ifade edilmekte ve denklemde bulunan δ , matris ve takviye elemanının şekillerindeki değişik formların (küresel, silindirik ve tabaka) iletim katsayısına etkisinden dolayı farklı şekilde formülize edilmiştir (Landauer ve ark, 1952).

$$k = \frac{k_m \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{k_f}{k_m} \right)^2 \cdot v_f \cdot \delta \right]}{[1 + (\delta - 1) \cdot v_f]} \quad (2.9)$$

$$\delta_{k\u00fcresel} = \frac{3k_m}{2k_m + k_f} \quad (2.10)$$

$$\delta_{silindirik} = \frac{5k_m + k_f}{3(k_m + k_f)} \quad (2.11)$$

$$\delta_{tabaka} = \frac{k_m + 2k_f}{3k_f} \quad (2.12)$$

2.3.8. Lewis ve Nielsen Modeli

Bu model genel olarak polimer matrisli kompozit malzemelerin ısı iletim katsayılarının tespiti üzerine, Halphin ve Tsai modelininin tek yön fazlı bir kompozit tabaka modellenmesinden faydalanılarak geliştirilmiştir (Halpin ve ark., 1969).

Takviyeli kompozit malzemelerin hepsinin kendine özgü farklı özellikleri bulunduğundan dolayı aşağıda verilen matematiksel formüldeki sabit A ve ϕ_m değerleri,

kullanılan matris ve takviye malzemelerinin özelliklerine göre farklı değerlere sahiptir (Nielsen ve ark, 1974).

$$\lambda = \lambda_p \cdot \left[\frac{1+A \cdot B \cdot v_f}{1-B \cdot \psi \cdot v_f} \right] \quad (2.13)$$

$$B = \frac{\lambda_f / \lambda_p - 1}{\lambda_f / \lambda_p + 1} \quad (2.14)$$

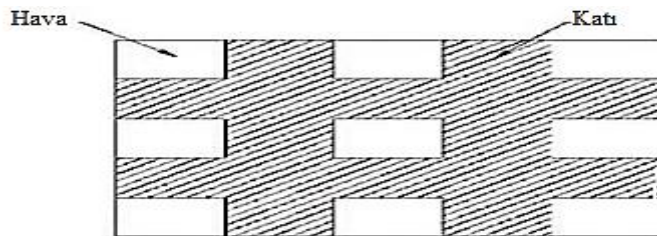
$$\psi = 1 + \left(\frac{1-\phi_m}{\phi_m^2} \right) \cdot v_f \quad (2.15)$$

2.3.9. Russel Modeli

Daha önceki geliştirilen modellerin çoğunda olduğu gibi Russel modelinde de gözeneklerin fiziksel yapılarına göre bir metot türetilmiştir. Russel iki farklı fazın oluşturduğu kompozit malzemelerin ısı iletim katsayısını ölçmek için malzeme gözeneklerini kübik olarak kabul ederek modelini oluşturmuştur (Russel, 1935).

Bu model; oluşturulan malzemedeki fazların, kararlı ortam içerisinde, eşit boyutlu, tüm malzemeye dağılmış ve birbirleri arasında temas olmayan kübik malzemelere dayalı olarak türetilmiştir. Şekil 2.16'da bu faz şekilleri ve Russel modelinin teorik olarak oluşturulan denklemi, matematiksel olarak ifade edilmiştir (Tavman, 1998).

$$\lambda = \lambda_p \cdot \left[\frac{v_f^{2/3} + (\lambda_p / \lambda_f) \cdot (1 - v_f^{2/3})}{v_f^{2/3} - v_f + (\lambda_p / \lambda_f) \cdot (1 + v_f - v_f^{2/3})} \right] \quad (2.16)$$



Şekil 2. 16. Russell ısı iletkenlik modeli (Uzun ve Yeşilyurt, 2017).

2.3.10. Cheng ve Vachon Modeli

Cheng ve Vachon kompozit malzemeyi oluşturan matris malzemesi ve takviye malzemesinin kompozit içerisinde bulundukları hacimsel orana göre değerlendirilmesi gerektiğini ve kompozit içerisindeki takviye fazının parabolik dağılıma benzer bir şekilde bulunduğunu kabul etmişlerdir. Geliştirdikleri modellemeyi iki farklı matematiksel formülle ile izah etmişlerdir. Bu formüller sırasıyla aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Cheng ve ark, 1970).

$k_m > k_f$ durumunda;

$$k = \left[\frac{2}{\sqrt{C \cdot (k_f - k_m) \cdot (k_m + B) \cdot (k_f - k_m)}} \cdot \tan^{-1} \left[\frac{B}{2} \sqrt{\frac{C \cdot (k_f - k_m)}{k_m + B \cdot (k_f - k_m)}} \right] + \frac{1-B}{k_m} \right] \quad (2.17)$$

$k_f > k_m$ durumunda;

$$k = \left[\frac{1}{\sqrt{C \cdot (k_f - k_m) \cdot (k_m + B \cdot (k_f - k_m))}} \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{k_m + B \cdot (k_f - k_m) + \frac{B}{2} \sqrt{C \cdot (k_f - k_m)}}}{\sqrt{k_m + B \cdot (k_f - k_m) - \frac{B}{2} \sqrt{C \cdot (k_f - k_m)}}} \right] + \frac{1-B}{k_m} \right] \quad (2.18)$$

Denklemden bilinmeyen olarak bulunan B ve C indisleri ise;

$$B = \sqrt{\frac{3\phi}{2}} \text{ ve } C = -4 \sqrt{\frac{2}{3\phi}} \quad (2.19)$$

formülleri ile bulunur.

B ve C katsayıları içerisinde tanımlanmış olan ϕ katsayısı malzemeye göre değişkenlik gösterip her malzemedeki gözenek hacminin tüm malzemenin hacmine oranı ile elde edilir (Cheng ve ark., 1970).

2.3.11. Wiener Modeli

Weiner, geliştirdiği metotta malzeme üzerindeki küresel gözenekleri incelemiş ve elektrik direnç tekniği ile kompozit malzemelerde ısı iletim katsayısını tespit etmek için bir matematiksel eşitlik geliştirmiştir. Çalışmalarını, takviye malzemesi olarak kullanılan parçacıkların, malzeme içerisinde kübik düzende olduğunu kabul ederek gerçekleştirmiştir. Isı iletim katsayısı tespiti için geliştirdiği modeli diğer modellerle karşılaştırarak sonuçların uyumlu olduğunu göstermiştir. Wiener modelinin matematiksel gösterimi ise aşağıdaki gibidir.

$$k = k_m \left[\frac{k_m + (n-1)k_m - (n-1)\phi(k_m - k_f)}{k_f + (n-1)k_m + \phi(k_m - k_f)} \right] \quad (2.20)$$

Denklem içerisinde verilen ‘n’ değerı deneysel bir sabittir. Malzemelerin gözenek yapılarına göre değişim göstermektedir. Örnek verilecek olursa malzeme gözenekleri küresel yapıda olan numuneler için ‘n’ sabitinin 3 olarak alınması gerekmektedir (Uzun ve Yeşilyurt, 2017).

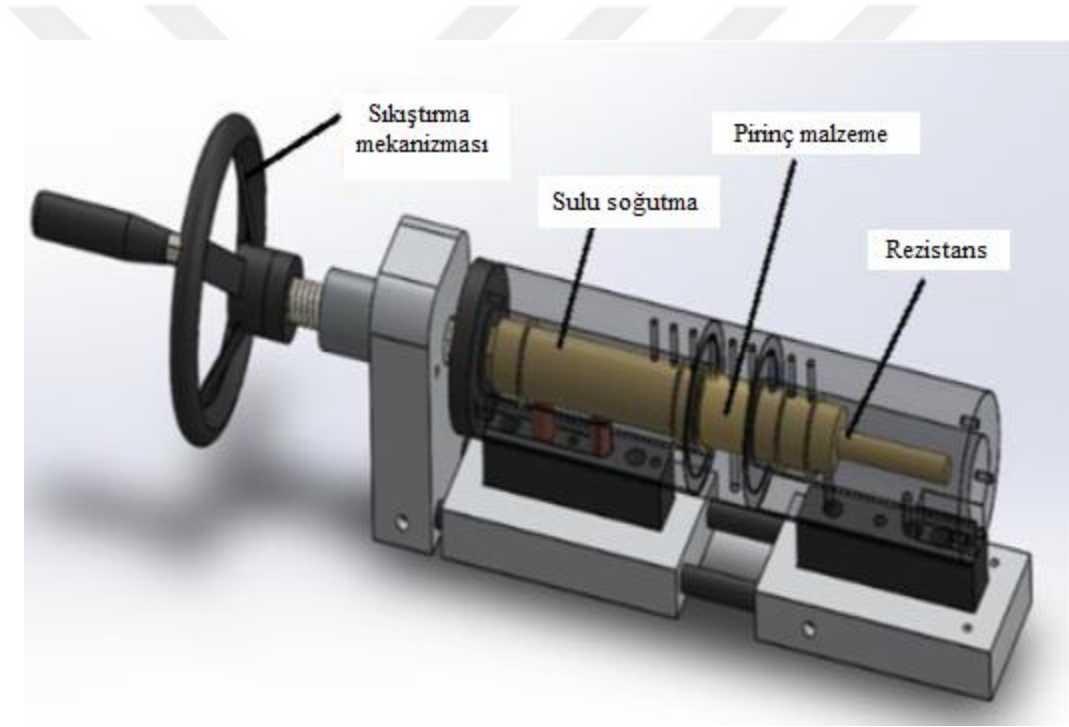
2.4. Isı İletim Katsayısı Hesaplanmasında Kullanılan Deneysel Metotlar

2.4.1. Kararlı (Sürekli) Rejim Yöntemleri

Daha öncede bahsedildiği üzere ısı iletim katsayılarının tespiti için seçilen ortam kararlı (sürekli) rejim ve geçici rejim olarak ayrılmaktadır. Kararlı rejim yöntemlerinde gerçekleştirilen deneylerde, sistemin kararlı hale gelmesi beklenmektedir. Kararlı hal zaman içerisinde sıcaklıkların belirli bir noktaya ulaşması ve bu noktada sabit kalması olarak tanımlanmaktadır. Deney düzeneklerinde, kademeli olarak sıcaklık akışı gözlemleneceğinden 10-15 adet sıcaklık ölçer termokupl (ısıl çift) kullanılmaktadır. Sürekli rejim yöntemleri sık kullanılan ve mutlak sonuçlar veren düzeneklerdir. Fakat bu rejim yönteminin, mutlak (kesin) sonuç verme gibi avantajlarının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. En büyük dezavantajlarından biri ise sistemin kararlı hale gelene kadar uzun süre beklenmesidir. Bu süre yaklaşık olarak 30-60 dakika arasında değişmektedir.

2.4.1.1. Lineer (Eksenel) Akış Yöntemi

Bu yöntem, ısı iletim katsayı ölçüm yöntemleri arasında mutlak sonuca çok yaklaşıldığı için yoğun şekilde kullanılmaya devam etmektedir. Şekil 2.17’de görüldüğü üzere, numune cihazda bulunan ısıtıcı ve soğutucu kısımların arasına dikey veya yatay şekilde yerleştirilmektedir. Cihazda bulunan ısıtıcı çiftlerden bir kısmı, cihaz içerisindeki rezistans sayesinde ısıtılırken diğer kısmı ise soğutucular yardımıyla soğutulmaktadır. Yerleştirilen numuneden çevreye ısı geçişi olmaması için numuneler arası yalıtım için özel üretilmiş macunlar kullanılabilir. Çünkü eksenel akış yönteminde hassas sonuç elde etmek isteniyorsa radyal yöndeki akışları minimuma indirmek gerekmektedir.



Şekil 2. 17. Lineer ısı iletim katsayısı belirleme düzeneği (Deneysan, 2015).

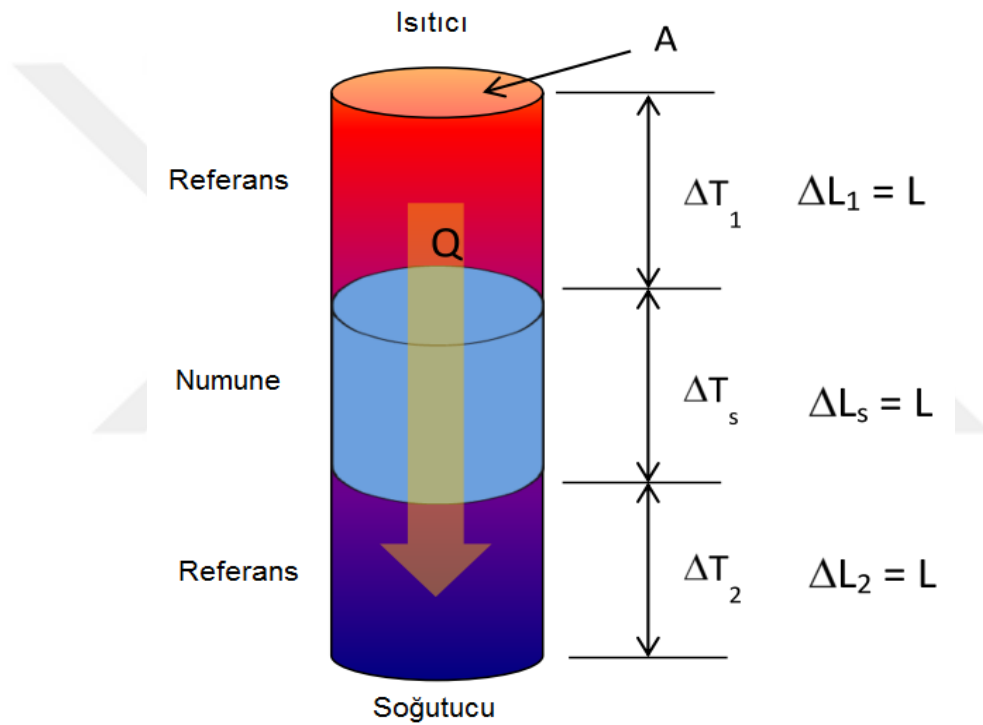
2.4.1.2. Karşılaştırmalı Kesme Çubuk Yöntemi

Temel olarak eksenel akış yönteminden türetilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemin amacı, ısıtıcı ve soğutucu kısmında bulunan ve değerleri bilinen referans malzemelerin arasına özellikleri bilinmeyen bir numunenin sıkıştırılmasıyla, “bilinmeyen eleman” olarak adlandırılan numunenin ısı iletim katsayısının belirlenmesidir. Karşılaştırmalı

kesme çubuk yönteminde özellikleri bilinmeyen numunenin, sistem içerisine yerleştirilmesi Şekil 2.18’de gösterilmiştir ve matematiksel olarak modellenmesi,

$$\frac{Q}{A} = K_S \cdot \frac{\Delta T_S}{L} = K_R \cdot \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \cdot \frac{1}{L} \quad (2.21)$$

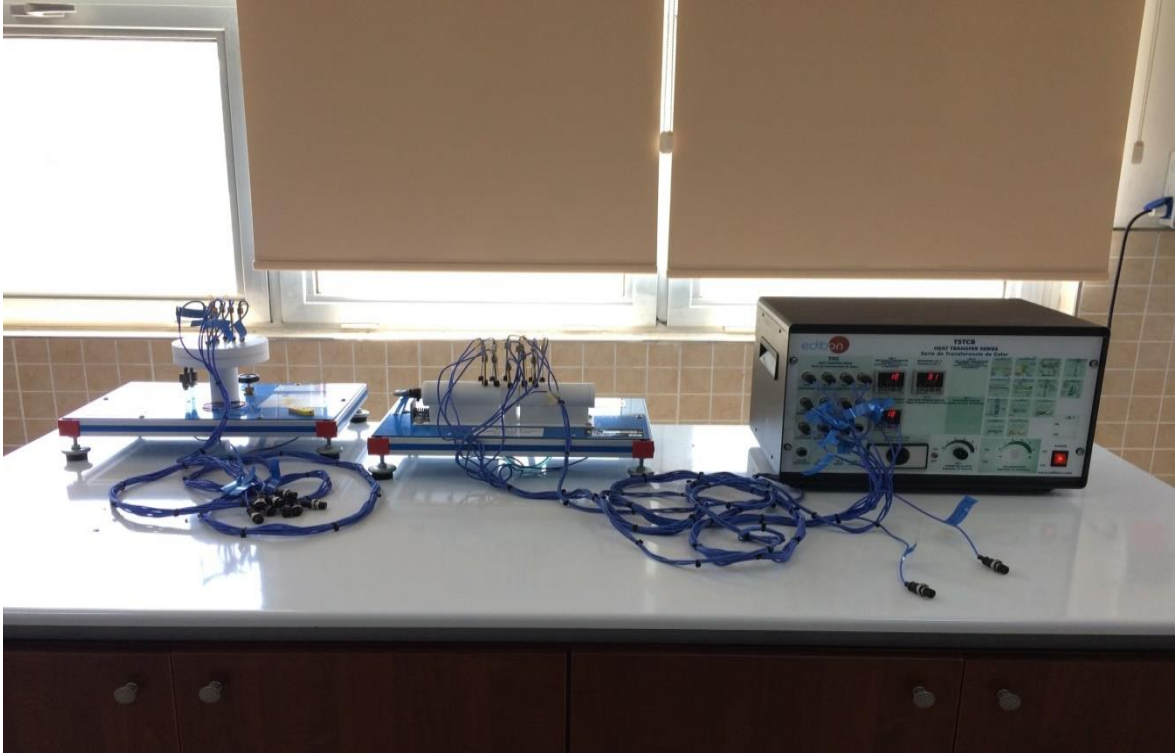
şeklindedir. Burada K_R bilinen malzemenin ısı iletim katsayısı, K_S ise ‘‘bilinmeyen eleman’’ olarak adlandırılan numunenin, hesaplamalar sonrasında bulunacak ısı iletim katsayısıdır (Deneysan, 2015).



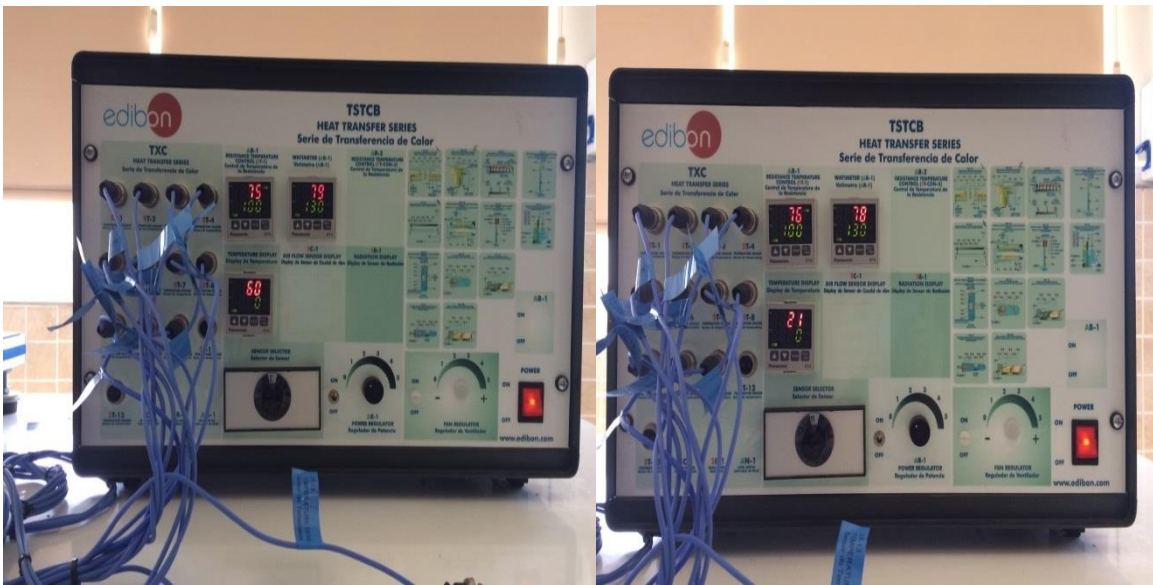
Şekil 2. 18. Karşılaştırmalı kesme çubuk deney düzeneği (Deneysan, 2015).

Enjeksiyon makinesinde kalıplanan kompozitlerin ısı iletim katsayısı bu yöntemle tayin edilmiştir. İlk olarak malzeme ölçüm yapılacağı yere yerleştirilmiş, ısı kayıplarını önlemek amacıyla ısı iletim katsayısı bilinen malzeme ile farklı hacimsel oranlarda üretilen ve ısı iletim katsayısı bilinmeyen kompozit malzemelerin arasına termal macun sürülmüştür. Daha sonra kompozit malzemeler termokupl’da iki malzeme arasına mengene yardımıyla sıkıştırılarak sistemin kararlı hale gelmesi beklenmiştir. Sistem kararlı hale geldiğinde 12 ayrı noktada ki sıcaklık değerleri okunmuş ve Fourier kanuna göre cam fiber takviyeli kompozitlerin ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplama işlemi üretilen

bütün kompozit malzemeler için yapılmış ve teorik modellerle karşılaştırılmıştır. Isı iletim ölçümü yapılan deney düzeneği Şekil 2.19’da gösterilmiştir. Isı iletim katsayısı tespiti için Edibon TXC/CL marka cihaz kullanılmıştır. Cihaz Şekil 2. 20’deki gibi kararlı rejimde ölçüm yapmakta ve yüksek sonuç doğruluğuna sahiptir.



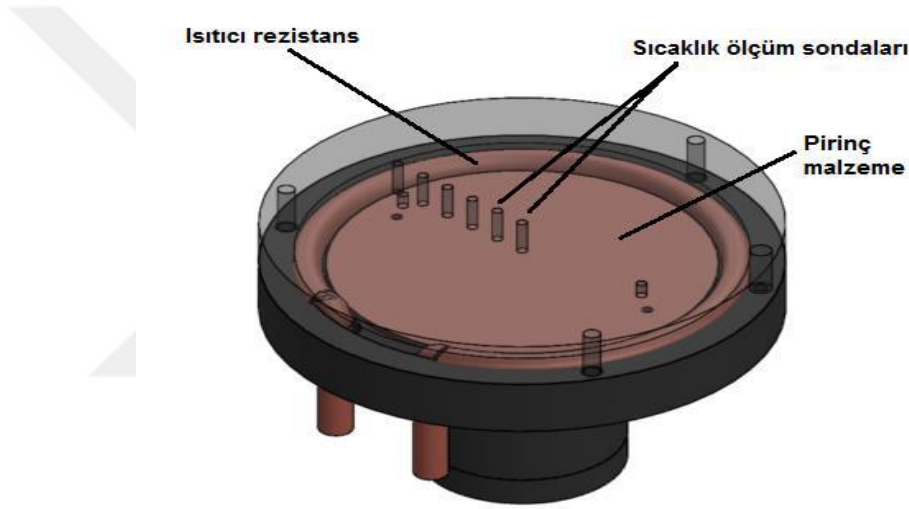
Şekil 2. 19. Isı iletim katsayısı ölçüm düzeneği



Şekil 2. 20. Sistemin kararlı hale gelmesinin beklenmesi

2.4.1.3. Radyal Akış Yöntemi

Kapalı bir hazne içerisinde uygulanan bu metot kararlı rejim yöntemleri arasında yer almaktadır. Bu ölçüm metodunda da diğer kararlı rejim metodlarında olduğu gibi sistemde bulunan ısı çiftlerinin ölçtüğü sıcaklıklar sabit hale gelene kadar beklenmektedir. Bu ısı çiftlerinin hepsi sabit disk üzerinde olup sıcaklık ölçümü yapacak şekilde belirli aralıklarda sıralanmışlardır. Sistem kararlı hale geldiğinde sabit disk etrafında radyal akış oluşarak içerisindeki malzemenin ısı iletim katsayısı tespit edilmektedir. Radyal ısı iletimi düzeneğinin gösterimi Şekil 2. 21'deki gibidir.



Şekil 2. 21. Radyal ısı iletim ölçüm sistemi (Deneysan, 2015).

2.4.2. Geçici Rejim Yöntemleri

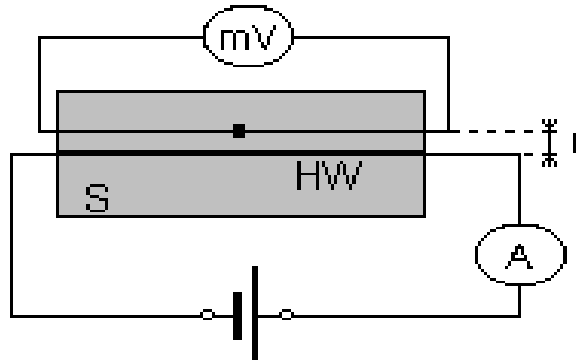
2.4.2.1. Hot-Wire (Kızgın Tel) Yöntemi

Kızgın tel yöntemi, geçici rejim yöntemleri arasında malzemelerin ısı iletim katsayısını belirlemek için kullanılan en yaygın yöntemdir. Tipik bir temaslı geçici rejim metodu olan kızgın tel yöntemi, ASTM C 1113 ve TSE EN 993 standartlarına göre katı ve akışkan numunelerin ısı iletim katsayısını doğrudan ölçer. Bu yöntemde, ısı iletim katsayısı belirlenecek numunenin üzerine, sabit bir elektrik akımı uygulanarak numune ısıtılır. Isıtma işlemi gerçekleştiği zaman numune üzerindeki sıcaklık değişimi belirli aralıklarla

ölçülür ve malzemenin ısı iletim katsayısı belirlenir. Şekil 2.22’de bu yöntemin çalışma prensibi gösterilmiştir. Kızgın tel yöntemi ile malzemenin ısı iletim katsayısı,

$$k = \frac{q \cdot \ln(t_2/t_1)}{4 \cdot \pi \cdot \Delta T} \quad (2.22)$$

denklemleri ile elde edilir (TSE EN 993, 2000).



Şekil 2. 22. Kızgın tel yönteminin çalışma prensibi (Wechsler, 1992).

2.4.2.2. Lazer-Flash Yöntemi

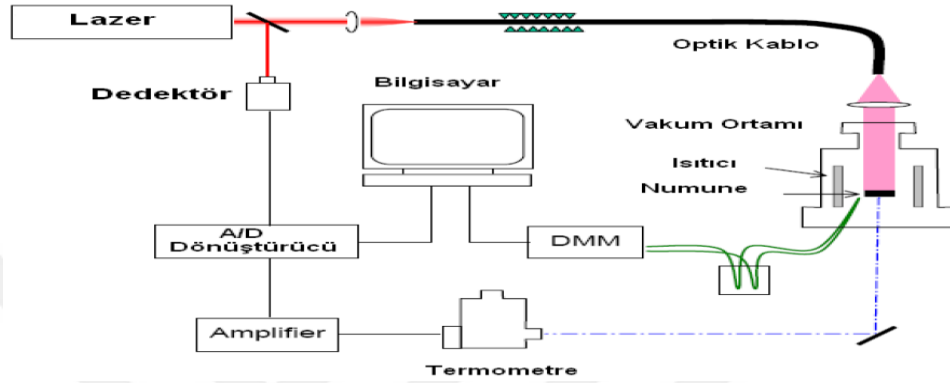
Lazer Flaş yöntemi geçici rejim yöntemleri içerisinde, temassız bir şekilde ısı iletim katsayısı tayin etmesiyle bilinen yöntemlerdendir. Bu yöntemle, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek hassasiyette ölçüm alınabilmektedir. Sistemin kararlı hale gelmesi beklenmediğinden ölçüm süresi çok kısadır. Deney düzeneği içerisinde bulunan lazer ünitesi, numuneye ısı sinyalleri yollayarak numunenin ön yüzeyinden ısı emilimini sağlar. Numunenin ön yüzeyinden arka yüzeyine doğru gerçekleşen ısı akışı, sensörler sayesinde kaydedilir. Böylece numunenin ısı iletim katsayısı belirlenir. Şekil 2.23’te lazer flaş yönteminin deney düzeneğinin şematik gösterimi mevcuttur. Bu yöntemin, diğer geçici rejim yöntemlerine göre en büyük avantajı, -100 °C ile 3000 °C arasında ölçüm yapabilme kabiliyetidir. Numune üzerinde gerçekleşen sıcaklık değişimi,

$$\Delta T(d, t) = \frac{Q}{\rho C_P D \pi r^2} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp \left(-\frac{n^2 \pi^2 \alpha t}{d^2} \right) \right] \quad (2.23)$$

denklemleri ile elde edilir.

Burada;

- Q , numune ön yüzeyindeki toplam ısı
- d , numune kalınlığı
- r , numune yarıçapıdır (Altun, 2008).



Şekil 2. 23. Lazer-Flaş yönteminin şematik gösterimi (Altun, 2008).

2.4.2.3. Sıcak Tel (İğneli Prob) Yöntemi

Bu yöntem, Hot-Wire yöntemi ile aynı çalışma prensibine sahip temaslı ve geçici bir rejim metodudur. Deney düzeneğinde ki iğnenin ucunda bulunan sensör, malzemeye temas ettirerek malzemenin ısı iletim kat sayısı tayin edilir. Bu yöntemin çalışma sıcaklığı, $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ aralığındadır. Sistemin kararlı hale gelmesine gerek olmadığından ölçüm süresi çok kısadır. İğneli prob yöntemi, 0.05 ile 20 W/mK aralığında ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin ölçümü için elverişlidir. Şekil 2.24'te görülen iğneli prob cihazında; toprak, polimer ve mineraller gibi birçok malzemenin ısı iletim katsayı elde edilebilir (Yeşilata ve ark., 2007).



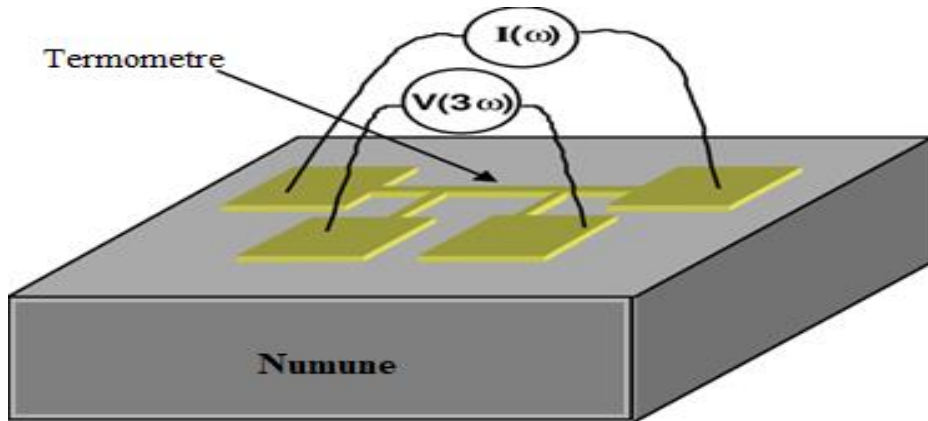
Şekil 2. 24. İğneli prob cihazı (URL-8, 2019).

2.4.2.4. Angström Yöntemi

Bu metot, Angström tarafından 1861 yılında geliştirilmiş ilk geçici rejim metodudur. Daha sonra bu metot geliştirilerek, yüksek sıcaklıkta işlem gerektiren metallere de uygulanmaya başlanmıştır. Angström tekniğiyle, metal ve metal alaşımları, tabakalı polimer kompozitler, elmaslar ve seramik matrisli kompozitler gibi malzemelerin ısı iletim katsayısı ölçülebilmektedir. Bu yöntemle, -100 °C ve 1300 °C sıcaklık aralığında ve 0.5 W/mK üzeri ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin, ısı iletim katsayıları tayin edilebilir (Yeşilata ve ark, 2007).

2.4.2.5. 3 ω Yöntemi

3 ω Yöntemi, ince kalınlığa sahip numunelerin ısı iletim katsayısını tayin etmek için kullanılan geçici rejim yöntemleri arasındadır. Genellikle dielektrik katı malzemelerin, 30 ile 750 K arasındaki deney koşullarında ısı iletim katsayılarını belirlemek için kullanılır. Malzemenin ısı iletim katsayılarının ölçümü yapılırken deney düzeneğindeki radyasyon seviyesi 1000 K de bile %2 seviyelerindedir. Numuneye ısı, açısal frekanslı bir akım (ω) aracılığıyla, dört noktalı metal prob iğne ile aktarılır. Numune yüzeyi ısıtıldıktan sonra metal problarda bulunan iki temas noktasındaki 2 ω voltaj ile sıcaklık değişimi belirlenir ve böylelikle ısı iletim katsayısı tespit edilir. Şekil 2.25'te 3 ω metotunun şematik gösterimi mevcuttur (Cahill, 1990).



Şekil 2. 25. 3 ω metodu şematik gösterimi (Huxtable, 2002).

Yukarıda bahsedilen kararlı ve geçici rejim ölçüm tekniklerinden bazılarının çalışma aralıkları, ölçüm sıcaklıkları ve malzeme seçimleri Tablo 2.4'te belirtilmiştir (Yeşilata ve ark, 2007).

Tablo 2. 4. Bazı ölçüm yöntemlerinin özellikleri

Ölçüm Tekniği	Malzemenin Cinsi	Çalışma Sıcaklığı (°C)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)
Isı akış ölçme (klasik ve kalibreli)	Yalıtım Malzemeleri	-100/200	0.007/1.0
Sıcak Levha (düz ve silindir)	Katı malzemeler, kompozitler, yalıtım malzemeleri	-180/1000	0.0001/2
Lazer Flash Yöntemi	Elmas, metaller, polimerler, seramikler	-100/3000	0.1/1500
Sıcak Tel Yöntemi	Mineraller, Plastik malzemeler, parçacıklı katı sıvı ve gazlar	-40/1600	0.001/20
İğne Prob Yöntemi	Toprak, mineraller, polimerler	-50/500	0.05/20
Angström Tekniği	Metaller, seramikler, kompozitler, yarı-iletkenler	-100/1300	0.5 ve üzeri

3. BULGULAR

3.1. Isı İletim Katsayısı Sonuçları

Belirli hacimsel oranlarda birleştirilen %20-%30-%40-%50-%60 cam fiber takviyeli polipropilen (CTPP), %20-%30 cam fiber takviyeli alçak yoğunluklu polietilen (CTAYPE) ve %20-%30 cam fiber takviyeli yüksek yoğunluklu polietilen (CTYYPE) malzemelerin ısı iletim katsayısının belirlenmesi için termal iletkenlik cihazı kullanılmıştır. Sistemde ilk olarak %20 CTPP malzemesinin ısı iletim katsayısı tayin edilmiştir. Sistem kararlı hale gelene kadar sıcaklıklar okunmuş daha sonra Fourier ısı iletim katsayısı kanununa göre malzemelerin ısı iletim katsayıları bulunmuştur. Deneye başlamadan önce tüm malzemelerin λ , ρ ve c_p değerleri belirlenmiş Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 1. Deneyde kullanılan malzemelerin özellikleri

Malzeme	λ (W/mK)	ρ (gr/cm ³)	C_p (kJ/kgK)
PP	0.12	0.905	1.925
AYPE	0.34	0.92	1.785
YYPE	0.44	0.954	1.85
Cam fiber	0.042	2.55	0.84

Isı iletim katsayısı belirleme cihazında karşılaştırmalı kesme çubuk yöntemiyle 9 adet kompozit numunenin ölçümleri yapılmıştır. Deney setinde, %20 CTPP kompozit numunesi, ısı iletim katsayısı bilinen iki pirinç malzeme arasına sıkıştırılmıştır. Daha sonra sistem kararlı hale gelene kadar 5 dakika aralıklarla panelden sıcaklıklar okunmuştur. Yaklaşık 30 dakika sonunda kararlı rejime gelen sistemden okunan değerler aşağıdaki Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2. %20 CTPP'nin sistemdeki sıcaklık dağılımları

78.5 W	%20 CTPP kompozitinin sıcaklık değerleri (°C)							
Zaman (dk)	T ₄	T ₅	T ₆	T _{g1}	T _{ç1}	T ₁₀	T ₁₁	T ₁₂
5	28	30.3	34			20.2	20.1	20.1
10	42.4	45	48.8			22.7	22.1	21.8
20	59.7	63	66.8			22.5	22.4	22
30	68.2	73.1	75.4	76.75	22.43	22.4	22.3	22
L (m)	0	0.01	0.02	0.025	0.028	0.033	0.043	0.053

T_{g1} ve T_{ç1} değerleri, iki numune arasına sıkıştırılan kompozit malzemenin yüzey giriş ve çıkış sıcaklıklarıdır. Bu iki değer belirli aralıklarda artan sıcaklığı, mesafeyle doğru orantılı kabul edip aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$\frac{L_4 - L_{g1}}{L_4 - L_6} = \frac{0.025}{0.02} \quad , \quad T_{g1} = 76.75 \text{ °C} \quad (3.1)$$

$$\frac{L_{ç1} - L_{12}}{L_{10} - L_{12}} = \frac{0.025}{0.02} \quad , \quad T_{ç1} = 22.43 \text{ °C} \quad (3.2)$$

olarak bulunmuştur. Buna göre %20 cam fiber takviyeli kompozit malzemenin ısı iletimi aşağıda Fourier ısı iletim katsayı formülünü kullanarak,

$$k = \frac{78.5 \times 0.001}{0.0145 \times (76.75 - 22.43)} = 0.099 \left(\frac{W}{mK} \right) \quad (3.3)$$

olarak hesaplanmıştır.

Karşılaştırmalı kesme çubuk yöntemiyle, diğer tüm numuneler aynı şekilde ölçülmüştür. Ölçüm esnasında tüm kompozitler için kararlı rejim beklenmiş ve hepsinin sıcak ve soğuk yüzey sıcaklıkları belirlendikten sonra ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. Tablo 3.3'te üretilen dokuz adet kompozit malzemenin, kararlı rejim yönteminde hesaplanan ısı iletim katsayıları gösterilmiştir.

Tablo 3. 3. Üretimi yapılan kompozitlerin ısı iletim katsayıları

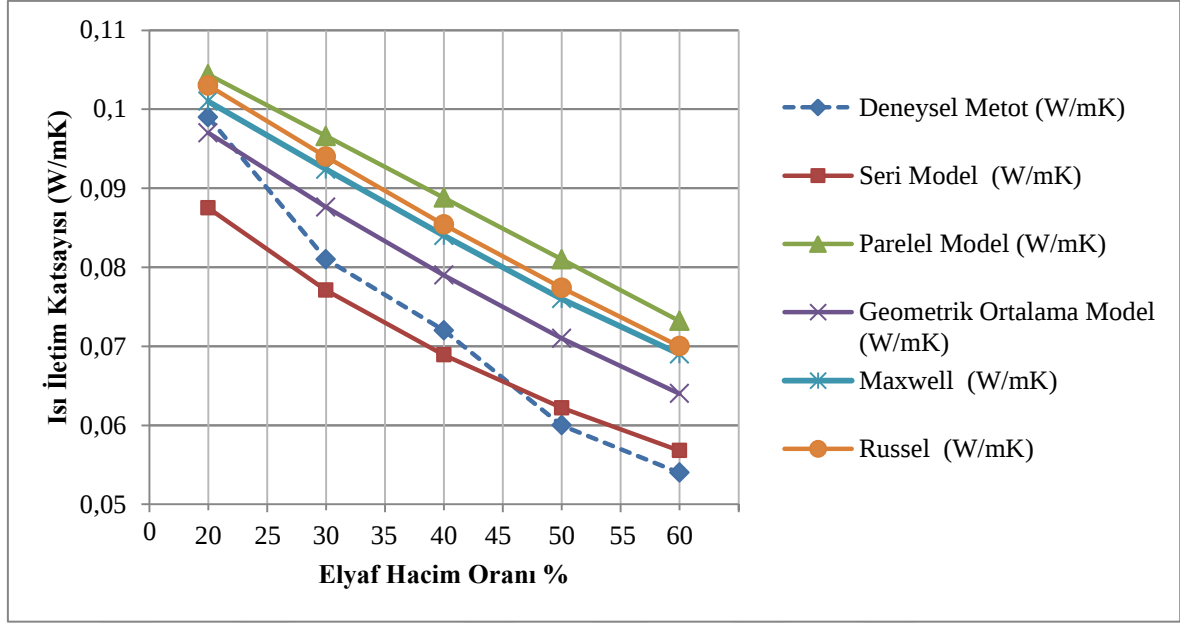
Kompozit Malzeme	DeneySEL “k” sonuçları (W/mK)
%20 CTPP	0.099
%30 CTPP	0.081
%40 CTPP	0.072
%50 CTPP	0.060
%60 CTPP	0.054
%20 CTAYPE	0.215
%30 CTAYPE	0.161
%20 CTYYPE	0.254
%30 CTYYPE	0.206

Kompozit malzemelerin deneysel olarak ısı iletim katsayıları belirlendikten sonra literatürdeki ısı iletim katsayısı hesaplayan materyal ve metot kısmında bahsedilen ve formülleri verilen diğer teorik modellerle karşılaştırılması hedeflenmiştir. Bundan dolayı ısı iletim katsayısı hesaplamalarında en çok kullanılan seri, paralel, geometrik ortalama, Maxwell ve Russel modelleriyle tüm numunelerin ısı iletim katsayıları belirlenmiştir. İlk olarak Tablo 3.4’te görüldüğü üzere CTPP malzemelerin ısı iletim katsayıları bu teorik modellere göre belirlenmiş ve deneysel metotla karşılaştırılmıştır.

Tablo 3. 4. CTPP kompozitlerinin teorik model ve deneysel metot sonuçları

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	C _p (kJ/kgK)	Seri Model (W/mK)	Paralel Model (W/mK)	Geometrik Ort. Model (W/mK)	Maxwell Modeli (W/mK)	Russel Modeli (W/mK)	DeneySEL Metot (W/mK)
%20CTPP	1.03	1.708	0.0875	0.1044	0.097	0.101	0.103	0.099
%30CTPP	1.12	1.6	0.0771	0.0966	0.0876	0.0924	0.094	0.081
%40CTPP	1.2	1.491	0.0689	0.0888	0.079	0.084	0.0854	0.072
%50CTPP	1.33	1.3825	0.0622	0.081	0.071	0.076	0.0774	0.060
%60CTPP	1.43	1.274	0.0568	0.0732	0.064	0.069	0.07	0.054

Yapılan hesaplamalar neticesinde Şekil 3.1’de teorik modellerin, deneysel metotla hesaplanan sonuçlara göre karşılaştırılması bulunmaktadır. Buna göre, deneysel olarak elde edilen sonuçların teorik modeller arasındaki dağılımı görülmektedir.



Şekil 3. 1. CTPP kompozitlerin ısı iletim katsayılarının karşılaştırılması

Deneyde kullanılan diğer polimer malzemeler AYPE ve YYPE'nin %20 ve %30 cam fiber takviyeli üretilen kompozitlerinde aynı şekilde teorik modellerle hesaplamaları yapılmış ve deneysel metotla yapılan ölçümleri karşılaştırılmıştır. Tablo 3.5 ve Tablo 3.6'da üretilen kompozit numunelerin deneysel ve teorik modellerinin sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 3. 5. CTAYPE kompozitlerinin teorik model ve deneysel metot sonuçları

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	C _p (kJ/kgK)	Seri Model (W/mK)	Paralel Model (W/mK)	Geometrik Ort. Model (W/mK)	Maxwell Modeli (W/mK)	Russel Modeli (W/mK)	DeneySEL Metot (W/mK)
%20 CTAYPE	1.246	1.596	0.141	0.28	0.224	0.262	0.272	0.215
%30 CTAYPE	1.41	1.5015	0.109	0.25	0.182	0.23	0.237	0.161

Tablo 3. 6. CTYYPE kompozitlerinin teorik model ve deneysel metot sonuçları

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	C _p (kJ/kg K)	Seri Model (W/mK)	Paralel Model (W/mK)	Geometrik Ort. Model (W/mK)	Maxwell Modeli (W/mK)	Russel Modeli (W/mK)	DeneySEL Metot (W/mK)
%20 CTYYPE	1.2732	1.648	0.152	0.36	0.275	0.34	0.348	0.254
%30 CTYYPE	1.4328	1.547	0.1145	0.3206	0.217	0.289	0.302	0.206

The graph plots Thermal Conductivity (W/mK) on the y-axis (0 to 0.3) against Fiber Volume Ratio (%) on the x-axis (20 to 30). Six data series are shown:

- Deneysel Metot (W/mK):** Dashed blue line with diamond markers. Values decrease from ~0.215 at 20% to ~0.16 at 30%.
- Seri Model (W/mK):** Solid red line with square markers. Values decrease from ~0.14 at 20% to ~0.11 at 30%.
- Parelel Model (W/mK):** Solid green line with triangle markers. Values decrease from ~0.28 at 20% to ~0.25 at 30%.
- Geometrik Ortalama Model (W/mK):** Solid purple line with 'x' markers. Values decrease from ~0.225 at 20% to ~0.185 at 30%.
- Maxwell (W/mK):** Solid cyan line with asterisk markers. Values decrease from ~0.26 at 20% to ~0.23 at 30%.
- Russel (W/mK):** Solid orange line with circle markers. Values decrease from ~0.27 at 20% to ~0.24 at 30%.

Elyaf Hacim Oranı (%)	Deneysel Metot (W/mK)	Seri Model (W/mK)	Parelel Model (W/mK)	Geometrik Ortalama Model (W/mK)	Maxwell (W/mK)	Russel (W/mK)
20	0.215	0.14	0.28	0.225	0.26	0.27
30	0.16	0.11	0.25	0.185	0.23	0.24

The graph plots Thermal Conductivity (W/mK) on the y-axis (0 to 0.4) against Fiber Volume Ratio (%) on the x-axis (20 to 30). It compares experimental data with several theoretical models. The experimental data (blue diamonds) shows a decrease from approximately 0.255 W/mK at 20% to 0.205 W/mK at 30%. The Parallel Model (green triangles) starts highest at 20% (~0.36 W/mK) and ends at ~0.32 W/mK. The Russel Model (orange circles) starts at ~0.35 W/mK and ends at ~0.30 W/mK. The Maxwell Model (cyan asterisks) starts at ~0.34 W/mK and ends at ~0.29 W/mK. The Geometric Average Model (purple crosses) starts at ~0.28 W/mK and ends at ~0.22 W/mK. The Series Model (red squares) starts lowest at 20% (~0.15 W/mK) and ends at ~0.11 W/mK.

Elyaf Hacim Oranı (%)	Deneysel Metot (W/mK)	Seri Model (W/mK)	Parelel Model (W/mK)	Geometrik Ortalama Model (W/mK)	Maxwell (W/mK)	Russel (W/mK)
20	0.255	0.150	0.360	0.280	0.340	0.350
30	0.205	0.110	0.320	0.220	0.290	0.300

73

Kompozit numunelerin farklı takviye oranlarında hesaplanan ısı iletim katsayılarının literatürde bulunan farklı teorik modellerle yakınsadığı görülmüştür. Bu durum, malzemenin takviye oranıyla ısı iletim katsayısında gerçekleşen değişiklikten dolayı olmasına rağmen, deneysel metotlarda yapılan ölçümlerde, malzeme takviye oranı arttıkça ısı iletim katsayısındaki düşüşün devam ettiği gözlemlenmiştir. Cam fiber takviye oranına göre ısı iletim katsayısı değerinin düşüşünün devam ettiği gözlemlenen deneysel metodun, teorik olarak bir süre seri modele yakınsadığı gözlemlenmiş fakat takviye oranının hacimsel artışı devam ettiği sürece, kompozit malzemelerin ısı iletim katsayılarının seri model ölçümlerinden de aşağısına bir düşüş eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Takviye oranının % 20-%30 oranında gerçekleştirildiği numuneler içinse sonuçların daha çok geometrik ortalama model ile yakınsadığı gözlemlenmiştir. Takviye oranları %20'den başladığı hallerde Maxwell, Russel ve Paralel modellerle ısı iletim katsayılarının hiçbir deney şartında yakınsamadığı açıkça gözlemlenmiştir. Ayrıca takviye oranları %2.5-%10 aralığında üretim gerçekleşmiş olsaydı bu modellerle yapılan ısı iletim katsayısı ölçümlerinin, deneysel metotta hesaplanan sonuçlara yakınsayacağı düşünülmektedir.

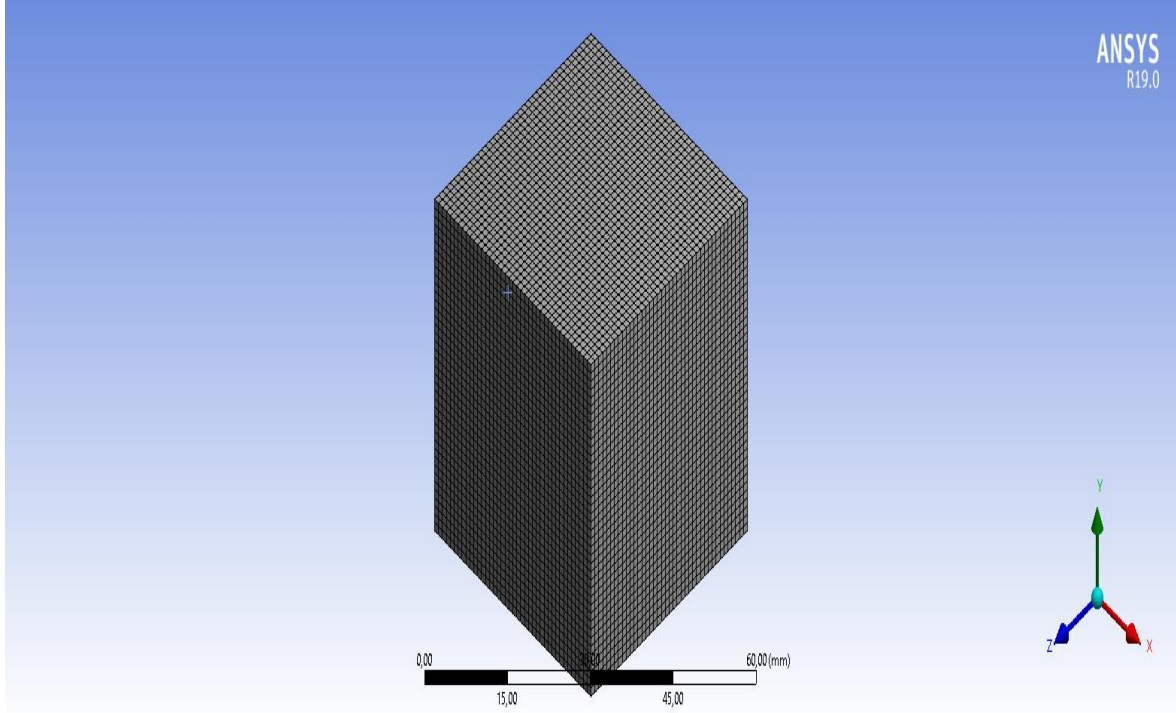
Üretilen bütün kompozitlerin deneysel metotlarla ısı iletim katsayıları belirlendikten sonra farklı takviye oranlı tüm numuneler için mühendislik formülleri aracılığıyla, malzemelerin özgül ısıları ve yoğunlukları tespit edilmiştir. Kompozitlerin; λ , ρ ve c_p değerleri belirlendikten sonra Ansys programında termal analiz yapmak için model oluşturulmuştur. Oluşturulan tüm modellerin, ısı iletim katsayısı belirleme deneyindeki sıcaklıkları göz önünde bulundurularak belirli sıcaklık aralıklarında, yüzey sıcaklık dağılımları ve ısı akışları belirlenmiştir.

3.2. Termal Analiz Sonuçları

3.2.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

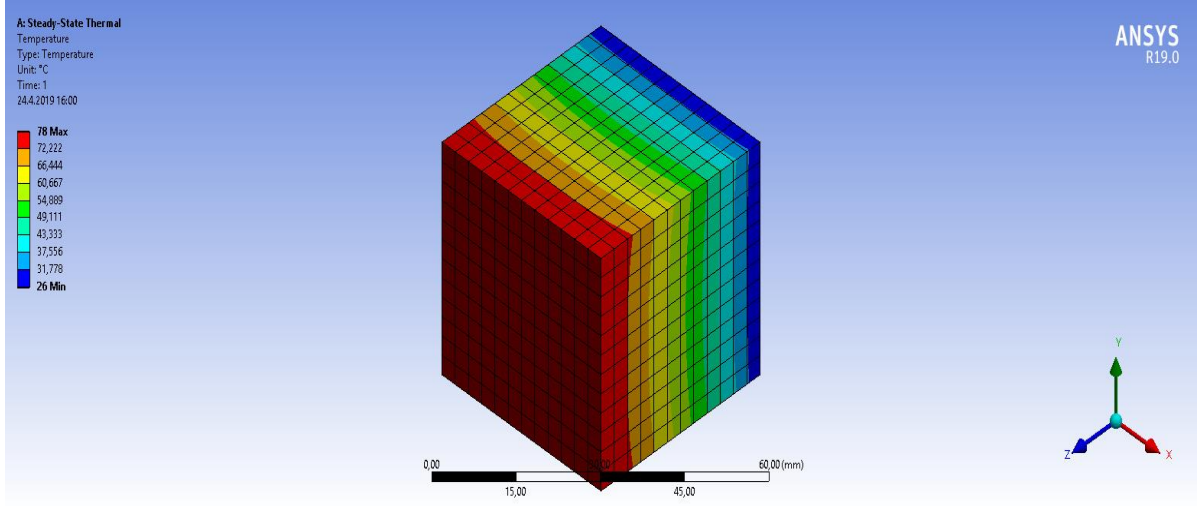
Sonlu elemanlar yöntemi karmaşık bir probleme sahip modeli daha basit alt problemlere ayırdıktan sonra tüm basit problemlerin kendi içerisinde çözülmesiyle gerçek çözüme yakın sonuçlar elde edilen yöntemlerdir. Bu kısımda geometrik olarak karmaşık yapıya sahip olan modeli daha basit alt bölümler olan, mesh (ağ) denilen kısımlara ayırarak

belirli sınır şartları altında malzemenin ısı analizi yapılmıştır. Ağ kalitesini arttırmak için malzemenin geometrik yapısına en uygun ağ türü seçilmiş ve tüm malzeme üzerine belirli aralıklarda Şekil 3.4’te görüldüğü üzere mesh (ağ) uygulanmıştır.

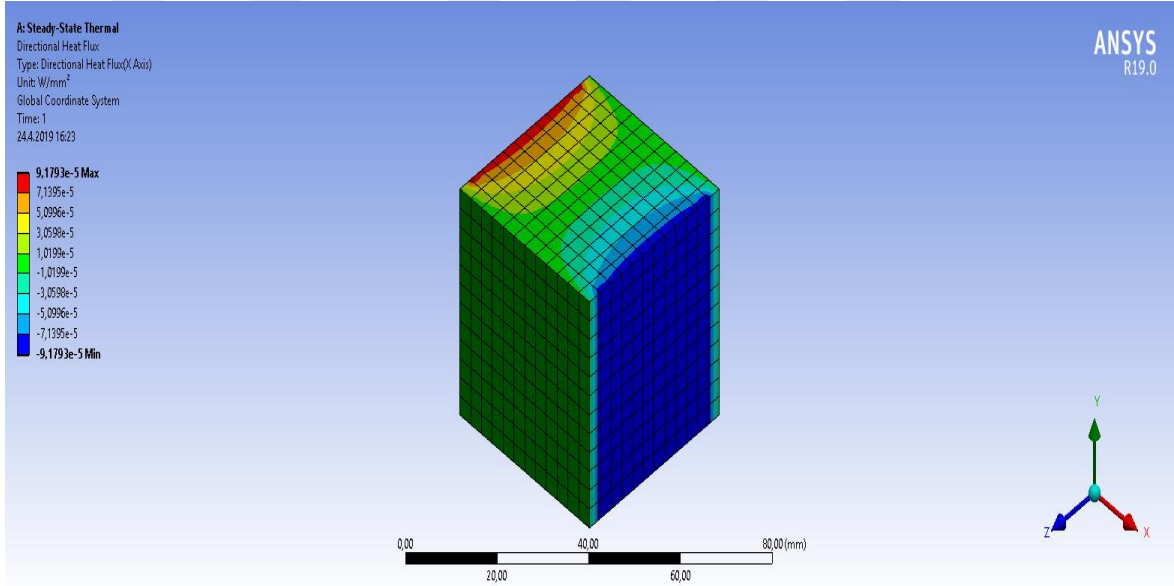


Şekil 3. 4. Kompozit malzeme üzerine mesh atılması

Ansys R19.0 programında deney şartlarında kullanılan malzeme ölçütleri esas alınarak modelleme 40×40 mm ebatlarında oluşturulup, belirli sıcaklık altında % 20-30-40-50-60 PP, % 20-30 AYPE ve %20-30 YYPE kompozit malzemelerin özellikleri programa girilerek 9 adet kompozit numunenin termal analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

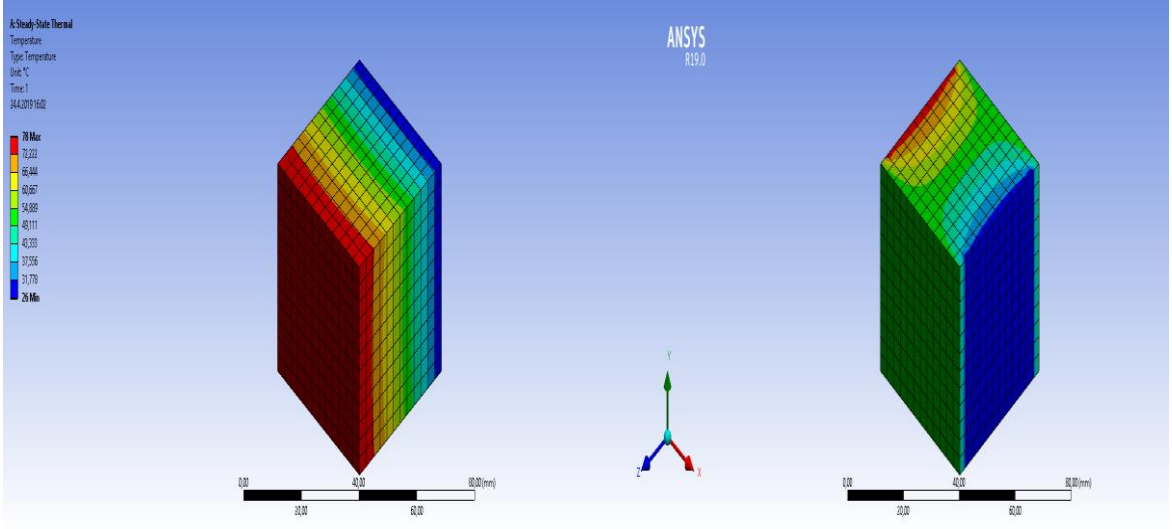


Şekil 3. 5. %20 CTPP kompozitinin yüzey sıcaklık dağılımı

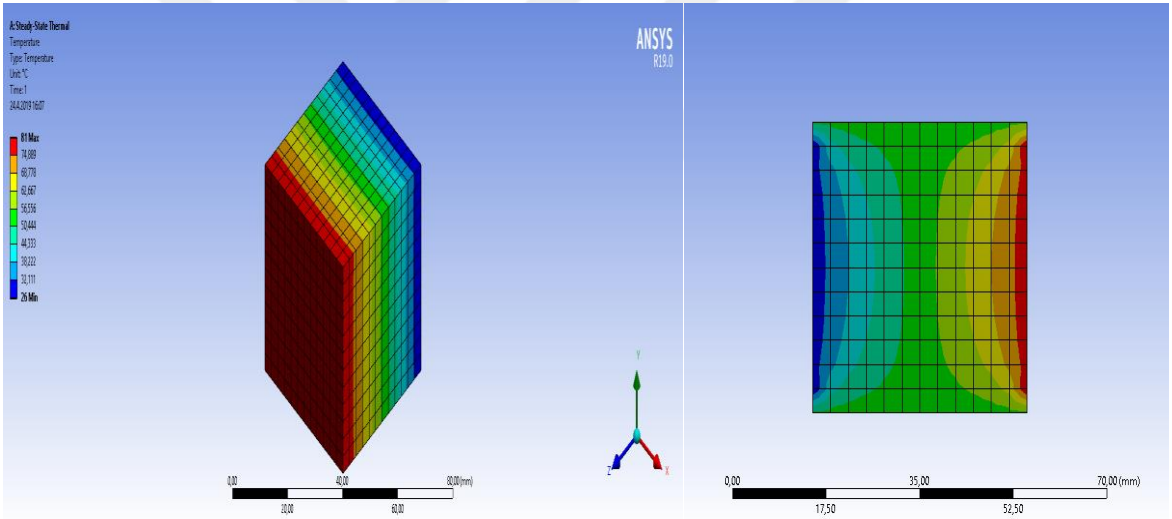


Şekil 3. 6. %20 CTPP kompozitinin doğrusal ısı akışı dağılımı

Kararlı rejimde yapılan ilk model olan %20 CTPP kompozitinin sıcaklık dağılımları ve doğrusal ısı akışı grafikleri, Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da görüldüğü üzere ısı çiftleriyle ölçüm yapılan deney düzeneğine uygun olarak oluşturulmuştur. Ansys programında kompozitin giriş çıkış sıcaklıkları sırasıyla 78°C ve 26°C olarak belirlenmiştir. Malzeme özellikleri olarak; üretilen kompozitin yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletim katsayıları, program içerisinde oluşturulan yeni modele tanımlanarak çözüm gerçekleştirildiğinde deney düzeneğindeki ısı akışı ile programdan elde edilen verilerin yakınlığının kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür.

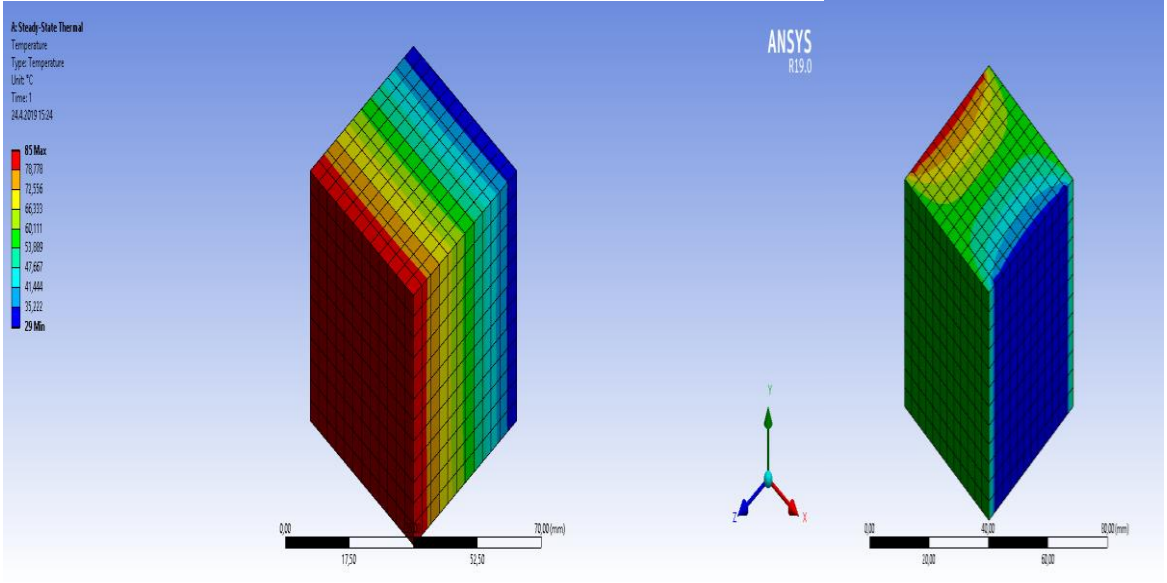


Şekil 3. 7. %30 CTPP kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı

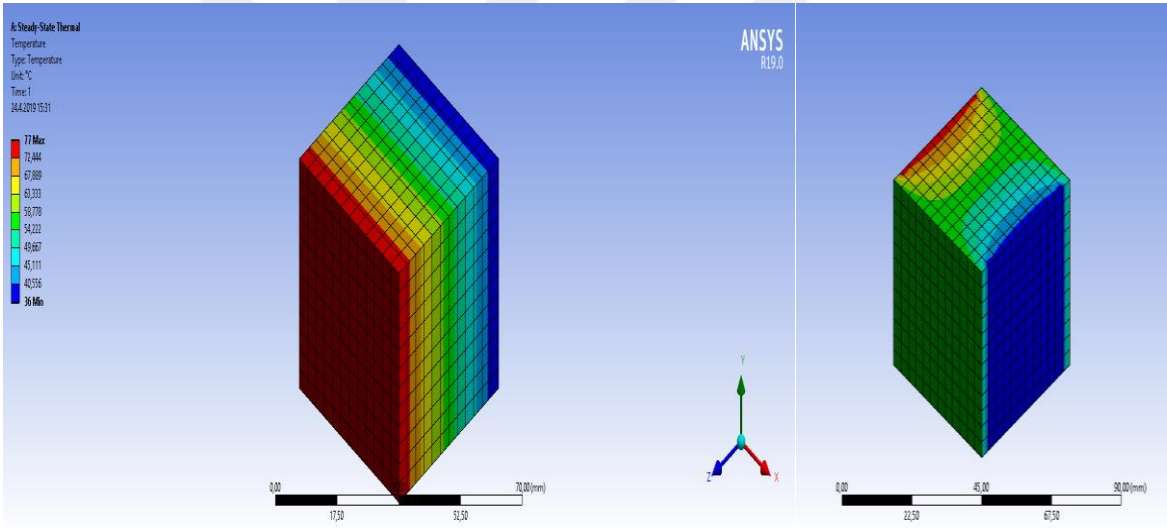


Şekil 3. 8. %40 CTPP kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de sırasıyla malzeme özellikleri girilen %30-40 CTPP kompozitlerinin deney koşullarına bağlı olarak giriş çıkış sıcaklıkları belirlenerek kararlı rejimde yapılan termal analizleri sonucunda oluşturulan sıcaklık dağılımları ve doğrusal ısı akışı gösterilmiştir. 87 °C giriş sıcaklığına ve 23°C çıkış sıcaklığına sahip olan malzemelerin sıcaklık dağılımlarında, ısı iletim katsayısı farklılığından dolayı değişim gözlenmektedir. Fakat toplam ve doğrusal ısı akışı grafiklerinde görünür bir değişiklik gözlemlenmemekle beraber geçici rejimde termal analiz gerçekleştirilmesi durumunda malzemelerin özelliklerine bağlı olarak bir değişim olabileceği düşünülmektedir.

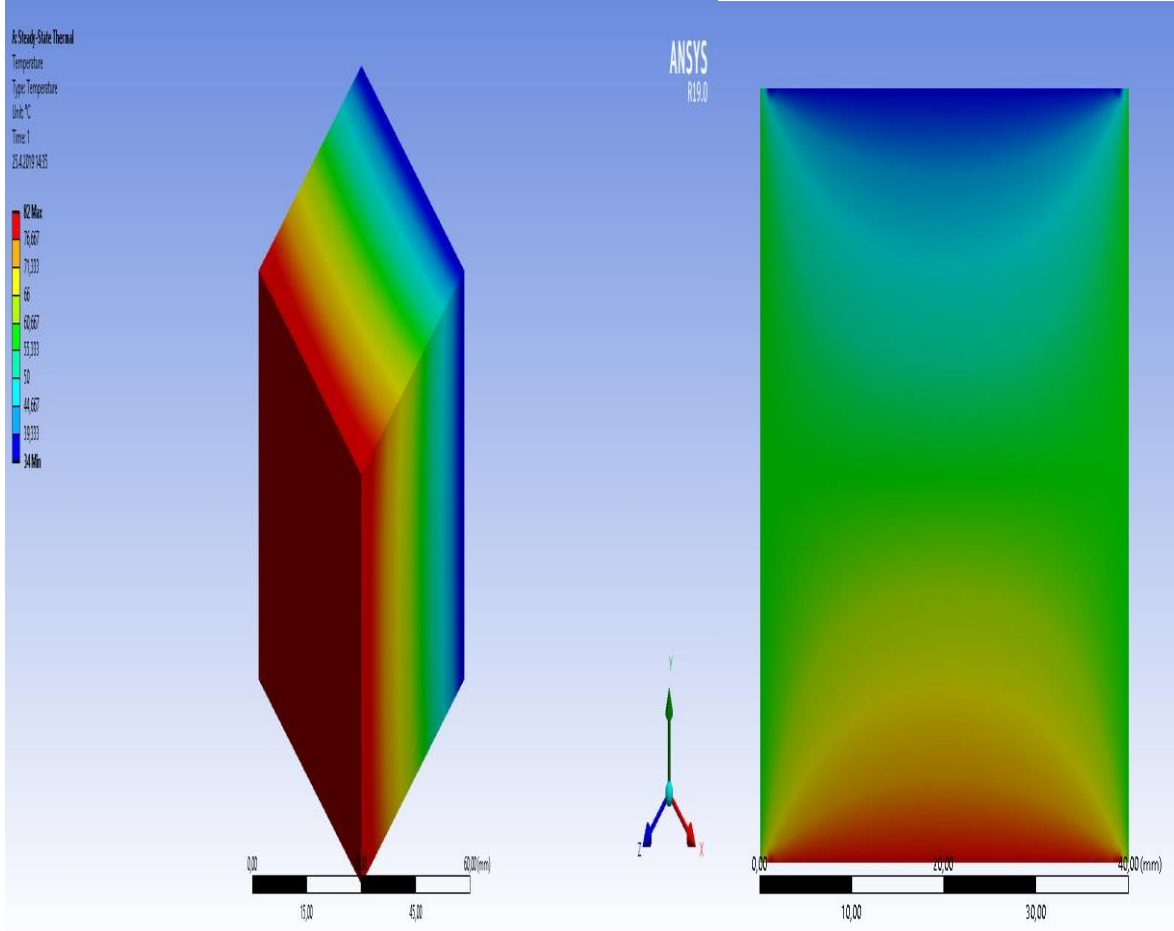


Şekil 3. 9. %50 CTPP kompozitinin yüzeyel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı



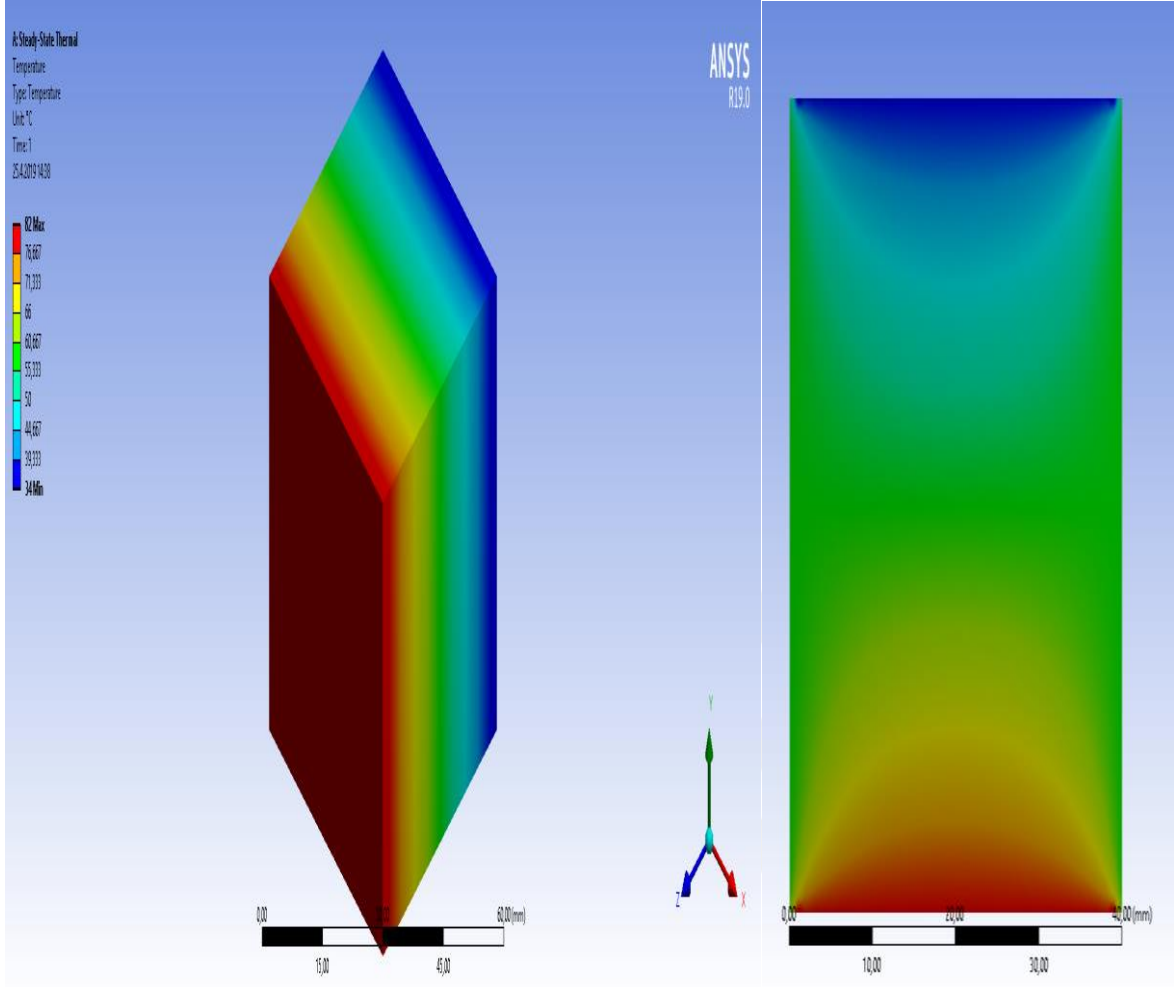
Şekil 3. 10. %60 CTPP kompozitinin yüzeyel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı

%50-60 CTPP kompozitlerinin malzeme özellikleri Ansys programında ki arayüze girildikten sonra model oluşturulmuştur. Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da görüldüğü üzere oluşturulan modelin deney şartlarında elde edilen sıcaklık giriş ve çıkış değerleri girildikten sonra model üzerinde gözlemlenen sıcaklık farklılıkları, ısı iletim katsayılarının değişimiyle uyumlu olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca termal analiz yapıldıktan sonra hesaplanan ısı akısının programdan elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Isı iletim katsayısı arttıkça CTPP kompozitlerinde sıcaklık dağılımlarındaki değişim toplam ısı akısındaki değişime göre daha net olarak gözlemlenmiştir.



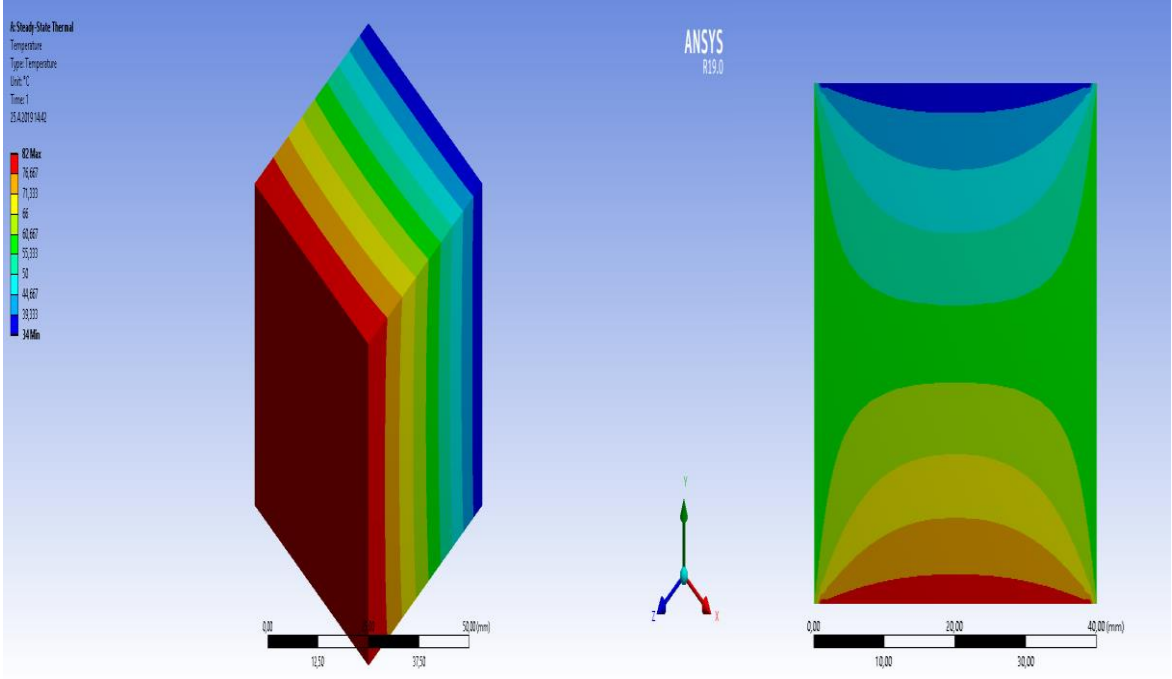
Şekil 3. 11. %20 CTAYPE kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akışı dağılımı

%20-30-40-50-60 CTPP kompozitlerinin termal analizinden sonra aynı şekilde %20-30 CTAYPE kompozitlerin modellenmesi $40 \times 40 \times 40$ mm olmak üzere oluşturulmuştur. Deney koşullarında ölçümü yapılan malzemenin et kalınlığı 1 mm olmasına rağmen program içerisinde sıcaklık farklılıklarını net olarak gözlemleyebilmek için modellemeye et kalınlığının 40 mm olması uygun görülmüştür. %20 CTAYPE kompozitinin yoğunluk, sabit basınç altında özgül ısı ve deneysel olarak elde edilen ısı iletim katsayısı değeri oluşturulan numuneye tanımlanmıştır. Giriş ve çıkış sıcaklıkları her iki kompozit içinde deney koşullarında elde edilen 12 ayrı sıcaklık noktası esas alınarak model ön ve arka yüzeylerine tanımlanmıştır. Şekil 3.11’de ısı iletim katsayısı değişimiyle kompozitler üzerindeki sıcaklık farklılıkları rahatlıkla gözlemlenirken kompozit ön yüzeyinden arka yüzeyine doğru gerçekleşen ısı akısının üniform olmasından dolayı doğrusal ısı akısında değişimin olmadığı gözlemlenmiştir.

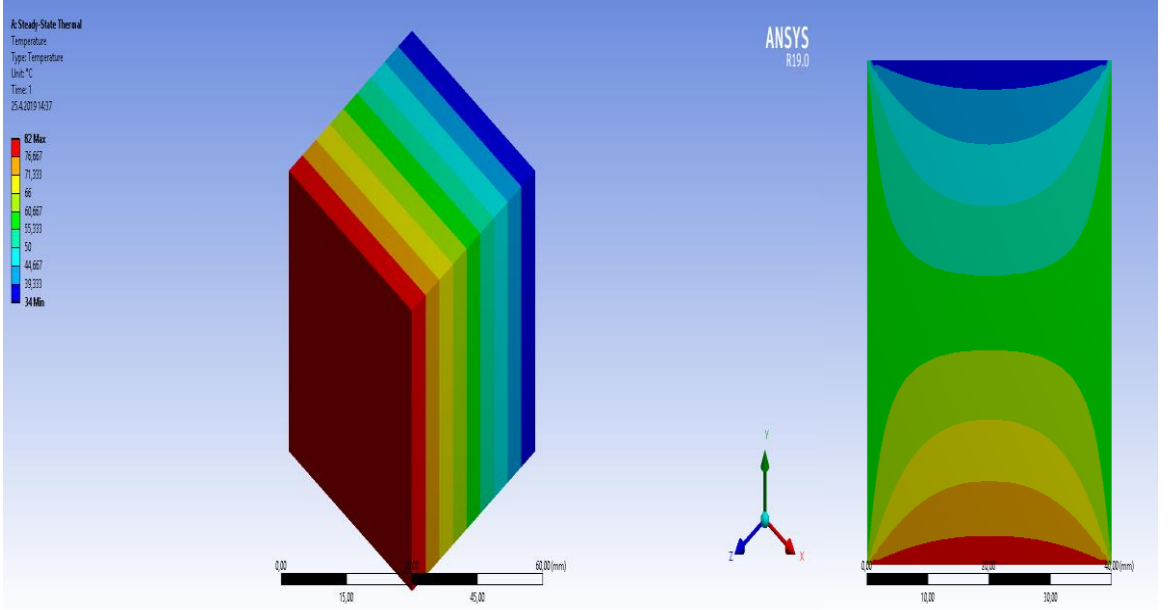


Şekil 3. 12. %30 CTAYPE kompozitinin yüzeysel sıcaklık ve doğrusal ısı akış dağılımı

%30 CTAYPE kompozitinin giriş ve çıkış sıcaklık değerleri sırasıyla 82°C ve 36°C olarak tanımlandıktan sonra malzemenin ρ ve c_p değerleri teorik olarak, k değeri ise ısı çiftler yardımıyla kararlı rejimde mutlak ölçüm yapan deney düzeneği sayesinde deneysel olarak belirlenmiştir. Yapılan teorik hesaplamalar ve deneysel çalışmalar neticesinde malzemenin yoğunluğu 1.41 gr/cm³, sabit basınç altında özgül ısısı 1501.5 J/kgK ve ısı iletim katsayısı 0.161 W/mK olarak bulunmuştur. Ansys R 19 programı ara yüzünde malzeme modeli oluşturulmadan önce malzeme özellikleri yukarıdaki sayısal değerler girilerek belirlenmiştir. Malzeme özellikleri tanımlanan kompozitin modellemesi tamamlandıktan sonra zamandan bağımsız şekilde gerçekleştirilen termal analizinde elde edilen sıcaklık dağılımları ve doğrusal ısı akışı değişimleri Şekil 3.12’de görülmektedir.



Şekil 3. 13. %20 CTYYPE kompozitinin yüzeyel sıcaklık ve doğrusal ısı akış dağılımı



Şekil 3. 14. %30 CTYYPE kompozitinin yüzeyel sıcaklık ve doğrusal ısı akış dağılımı

%20-30 CTYYPE kompozitleri diğer kompozitler gibi aynı şekilde modellemeleri yapıldıktan sonra teorik ve deneysel olarak elde edilen veriler yardımıyla termal analizleri kararlı rejimde gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te bu kompozitlerin yüzeyel sıcaklık dağılımları ve doğrusal ısı akışı dağılımları gösterilmiştir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elde edilen sonuçlar neticesinde üretilen kompozitlerin deney şartları altında ölçülen sıcaklık noktalarında uygulanan nümerik analizlerin deneyde elde edilen ısı miktarı ve sıcaklık farklılıklarıyla uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Kompozitlerin içerisinde matris fazı olarak kullanılan tüm polimer malzemelerin ısı iletim katsayılarına göre daha düşük ısı iletim katsayısı değerine sahip olan cam lifinin, numunenin fiziksel özelliklerini değiştirdiği ve bu değişikliğin nümerik analizde elde edilen değerler neticesinde uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme içerisinde ki cam lifi takviye oranı kademeli şekilde arttırılmış ve takviye oranı arttıkça kompozit malzemenin ısı iletim katsayısında düşüşün devam ettiği belirlenmiştir. Tüm malzemelerin literatürde bulunan seri, paralel, geometrik ortalama, Maxwell ve Russel teorik modelleriyle ısı iletim katsayıları belirlendikten sonra karşılaştırmalı kesme çubuk yöntemiyle elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlar neticesinde malzeme içerisinde ki takviye oranı arttıkça kompozit malzemelerin ısı iletim katsayılarının, deneysel sonuçlarla geometrik ortalama model ve seri modelle yakınsadığı gözlemlenmiştir. Takviye oranı artışı devam ettikçe deneysel metotla elde edilen sonuçların teorik modellerinde altına düşüş eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Takviye oranının % 20-30'larda olduğu numunelerde, daha çok geometrik ortalama modelle elde edilen sonuçlarla deneysel metotta elde edilen sonuçlarının yakınsadığı gözlemlenmiştir. Takviye oranı %10 altında deneylerin gerçekleştirilmesi durumunda ise üretilen kompozit malzemelerin deneysel metot ölçümlerinin teorik modellerden paralel, Russel ve Maxwell modellerine yakınsayacağı düşünülmektedir.

Kompozit numunelerin termal analiz sonuçlarında her bir numunenin ρ , c_p ve k değerleri program içerisinde girilerek yapılan nümerik analizler neticesinde belirli sınır şartları altında sıcaklık değişimleri ve malzeme üzerinde ki doğrusal ısı akışları belirlenmiştir. Bu sonuçlar neticesinde her bir malzemenin özelliklerinin değişiminden dolayı yapılan analizlerdeki ısı değerleri ile deneysel şartlardaki ısı değerlerinin uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Malzeme üzerindeki sıcaklık farklılıklarının ısı iletim katsayısı değerlerine uyumlu olduğu belirlenmiştir. Doğrusal ısı akışı sonuçlarında ise malzeme üzerinde uniform ısı akışı gerçekleştiğinden belirgin bir değişim gözlemlenmemiştir.

Üretilen kompozitler endüstride en yaygın kullanılan polimerlerden elde edilmiştir. Bu nedenle belirli takviye oranlarında üretilen kompozit malzemelerin fiziksel özelliklerindeki değişimleri irdelenmiş ve belirli kullanım alanları için uygun olduğu düşünülmektedir. Kompozit içerisinde takviye fazı olarak kullanılan cam lifinin, polimer kompozitlerin ısı iletim katsayılarında gerçekleştirdiği düşüşten dolayı, takviye oranı yüksek olan malzemelerin inşaat sektöründe kullanımının uygun olduğu düşünülmektedir. Üretilen kompozitlerin yoğunlukları düşük olduğundan uzay ve havacılık sanayide kullanılan malzemelerin ek elemanlarında kullanılabilmesi, mekaniksel özelliklerinin de uygun olması şartıyla düşünülmektedir. Ayrıca polimer malzemelerin elektriksel özelliklerinin kötü olmasından dolayı kullanılan cam lifi takviyesiyle elektriksel özelliklerinin de iyileştiği düşünülmektedir. Üretilen tüm kompozitlerin farklı takviye oranlarının tekstil, inşaat, ulaşım, paketleme ve ambalaj sektörlerinde özelliklerine göre değerlendirilebileceği gözlemlenmiştir.

5. KAYNAKLAR

- Akbaş, S., Güleç, T., Tufan, M., Taşcıoğlu, C., Peker, H.,** 2013. Fındık Kabuklarının Polipropilen Esaslı Polimer Kompozit Üretiminde Değerlendirilmesi, *Artvin Çoruh Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 14:1, 50-56.
- Altun, Ö.,** 2008. Lazer Flaş Yöntemini Kullanarak Malzemelerin Isı İletim Katsayısının Deneyisel Olarak Tayin Edilmesi ve Örnek Bir Uygulama, VII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi, 375-380.
- Aran, A.** 1990. Elyaf takviyeli karma malzemeler, Mk-575 Ders Notları, İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- Aran, A.,** 2008. Mal-201- Malzeme Bilgisi İTÜ Makina Fakültesi, İstanbul.
- Ateş, E., Aztekin, K.,** 2011. Parçacık ve Fiber Takviyeli Polimer Kompozitlerin Yoğunluk ve Basma Dayanımı Özellikleri, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* 26: 2, 479-486.
- Basan, S.,** 2016. Polimer Kimyası, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Baydar, D.G., Bekem, A., Doğu, M., Gemici, Z., Ünal, A.,** 2011. Sürekli E-Cam Fiber Takviyeli Polipropilen Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu, *Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 30:120-132.
- Biron, M.,** 2007. Thermoplastics and Thermoplastic Composites: Technical Information for Plastic Users, Elsevier – Butterworth-Heinemann: Oxford).
- Bunsell, A.R., Renard, F.,** 2005. Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials, Series in Material Science and Engineering.
- Cahill, D.G.,** 1990. Thermal conductivity measurement from 30 to 750 K: the 3 ω method, *Review of Scientific Instruments* 61, 802.
- Chen, H., Ginzburg, V.V., Yang, J., Yang, Y., Liu, W., Huang, Y., Du, L., Chen, B.,** 2016. Thermal Conductivity of Polymer-Based Composites: Fundamentals and Applications *Progress in Polymer Science*, 59:41-85.
- Cheng, S.C., Vachon, R.I.,** 1970. "A Technique for Predicting the Thermal Conductivity of Suspensions, Emulsions, and Porous Materials", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 13: 537.
- Deneysan,** 2015. HT-350 termal iletkenlik eğitim seti, Balıkesir.

- Eker, A.A.**, 2014. “Polimer Malzemeler” YTÜ Ders Notları, İstanbul.
- Ersoy, H.Y.**, 2001. Kompozit Malzeme, Literatür Yayıncılık-Akademik Kitaplar.
- Ha,J.**, 1991. Toughing Mechanism in Weak Matrix Ceramic Composites, PhD Thesis.
- Halpin, J.C.**, 1996. "Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites", *Journal of Composite Materials*, 3:732–734.
- Huang, C., Qian X., K., Yang, R.**, 2018. Thermal Conductivity of Polymers and Polymers Nanocomposites *Materials Science and Enginerring: R: Reports*, 132:1-22.
- Huxtable, S.T.**, 2002. Heat transport in süper-lattices and nanowire arrays University of California, Berkeley.
- İşiker, Y., Yeşilata, B.**, 2017. Yapı Malzemelerinin Isı İletim Katsayılarının Tespitine Yönelik Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 2:14-21.
- Jenarthanan, M.P., Ramesh Kumar, S., Venkatesh, G., Nishanthan, S.**, 2018. Analysis of Leaf Spring Using Carbon / Glass Epoxy and EN45 using Ansys: A Comparison, *Materialstoday : Proceedings*, 5:14512-14519.
- Jones, R.M.**, 1999. Mechanics of Composite Materials-Second Edition, Brunner-Routledge.
- Karaağaç, İ., Durmuş, G., Uluer, O., Aktaş, M., Tülü, F.A.**, 2016. Kompozit Isı Yalıtım Levhalarında Isı İletim Katsayısı Tespit Yaklaşımları, *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* Cilt:(133-142).
- Kumar, A., Gupta, R.K.**, 2003. Fundamentals of Polymer Engineering Second Edition Revised and Expanded, Marcel Dekker, Inc.
- Kumlutaş, D., Tavman, İ.H.**, 2003. Alüminyum Oksit Tane Katkılı Polietilen Matriksli Kompozitlerin Isı İletim Katsayısı, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2):19-25.
- Landauer, R.**, 1952. “The Electrical Resistance of Binary Metallic Mixtures”, *J. Appl. Phys.* Vol. 21, 779-784.
- Marşoğlu, M.**, 1986. Plastik Malzemeler, Arpaz Matbaacılık,İstanbul.
- Maxwell, J.C.**, 1892. A Treatise on Electricity and Magnetism”, 3d Edn., Clarendon Pres, Oxford, vol. 1.
- Mazumdar, S.K.**, 2001. Composites Manufacturing, Materials, Product and Process Engineering, Crc Press.

- Mileiko, S.T.**, 1997. Composite Materials Series 12- Metal and Ceramic Based Composites, Elsevier Science.
- Nielsen, L.E.**, 1974. Mechanical Properties of Polymers and Composites, Vol. 2., Marcel Dekker, New York.
- Özdemir, F., Çot, A., Alma, H.**, 2018. Odun Plastik Kompozit Malzemelerin Termal ve Isı İletkenliği Özellikleri Üzerine Sepiolit Mineralinin Etkisi, Cilt:19, Sayı 2: 205-209.
- Özel, C., Kuru, M., Bayram, Y.**, 2015. Mineral ve Fiber İçeren Polimer Betonların Plaka Sıcaklıklarına Bağlı Isı İletkenlik Katsayılarının İncelenmesi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 27-33.
- Pehlivanlı, Z.O.**, 2016. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji* part: C 4(3):91-96.
- Pişkin, E.**, 1987. Polimer Teknolojisine Giriş. Hacettepe Üniversitesi Kimya Mühendisliği Bölümü, İnkılap Kitabevi Yayını, İstanbul.
- Raghavan, S., Wang, H., Dinwiddie, R.B., Porter, W.D., Mayo, M.J.**, 1998. "The Effect of Grain Size, Porosity and Yttria Content on the Thermal Conductivity of Nanocrystalline Zirconia", *Scripta Material*, 39(8), 1119-1125.
- Ram, A.**, 1997. Fundamentals of Polymer Engineering, Springer Science.
- Russell, H.W.**, 1935. "Principles of Heat Flow in Porous Insulators", J. Am. Ceram. Soc., 18, 1-5.
- Saçak, M.**, 1998. Polimer Kimyasına Giriş, A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, No:50 Ankara.
- Savaşçı, Ö.T., Uyanık, N., Akovalı, G.**, 2002. Plastikler ve Plastik Teknolojisi , PAGEV Yayınları.
- Şahin, Y.**, 2006. Kompozit Malzemelere Giriş, Gazi Kitabevi, Ankara.
- Tavman, İ.H.**, 1998. "Effective Thermal Conductivity of Isotropic Polymer Composites", *Int. Comm. Heat Mass Transfer*, 25: 723-732.
- Tritt, T.M.**, 2004. Physics of Solids and Liquids, Thermal Conductivity-Theory, Properties and Applications, Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- TS 10513**, 1992. "Çelik Teller – Beton Takviyesinde Kullanılan", Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TSE EN 993, 2000. Kızgın Tel Metodu ile Termal İletkenlik Tayini, Türk Standartları Enstitüsü.

URL-1, 2019. <http://megep.meb.gov.tr> ,19 Mart 2019.

URL-2, 2019. <http://www.mta.gov.tr/v3.0/>, 2 Nisan 2019.

URL-3, 2019. <http://www.conta.com.tr>, 26 Mart 2019.

URL-4, 2019. <https://www.pagev.gov.tr>, 4 Nisan 2019.

URL-5, 2019. <http://www.asilmarine.com>, 4 Nisan 2019.

URL-6, 2019. <https://www.poliya.com/tr>, 8 Nisan 2019.

URL-7, 2019. <https://www.strongwell.com/>, 8 Nisan 2019.

URL-8, 2019. <https://www.dengeteknik.com.tr>, 10 Nisan 2019.

Uzun, İ., Yeşilyurt, K., 2017. Isıl İletkenlik Hesaplama Yöntemlerine Dair Değerlendirme *Eps Haber Dergisi*, Yıl:7/ Sayı:25, Matsis Matbaa Hizmetleri.

Yang, C., Wei, H., Guan, L., Guo, J., Wang, Y., Yan, X., Zhang, X., Wef, S., GUO, Z., 2015. Polymer nanocomposites for energy storage, energy saving and anticorrosion. *Journal of Materials Chemistry A*, 3, 14929.

Yaşar, H., 2001. Plastikler Dünyası, 2. Baskı MMO Yayınları, Ankara.

Yeşilata, B., Turgut, P., Işıker, Y., 2007. Kompozit Yapı Malzemelerinde Isıl Özellik Ölçümü-1: Mevcut Ölçüm Tekniklerinin İrdelenmesi, *Mühendis ve Makine*, 48:564.

Wechsler A E, 1992,. The Probe Method for Measurement of Thermal Conductivity in Compendium of Thermophysical Property Measurement Methods, Vol. 2 Recommended Measurement Techniques and Practices, New York, London, Plenum Press, p. 281

ÖZGEÇMİŞ

1991 yılında Mersin’de doğdu. Lise eğitimini Adana’da İsmail Safa Özler Anadolu Lisesinde 2008 yılında tamamladı. 2009 yılında girdiği Mersin Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünü 2014 yılında tamamladı. 2015 yılında Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne Arş. Gör. olarak atandı. 2018 yılı Mayıs ayında Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Arş. Gör. olarak göreve başladı. Halen aynı üniversitede görev yapmaktadır.

