



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

**TERMOSET REÇİNE MATRİSLİ CTP'LERDE İNORGANİK
YAPIDAKİ BİLEŞİKLERİN ALEV GECİKTİRİCİ OLARAK
KULLANIMI**

EDA YILMAZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. AHMET BEYÇİOĞLU**

DÜZCE, 2017

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMOSET REÇİNE MATRİSLİ CTP'LERDE İNORGANİK
YAPIDAKİ BİLEŞİKLERİN ALEV GECİKTİRİCİ OLARAK
KULLANIMI

Eda Yılmaz tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Beycioğlu

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Ahmet Beycioğlu

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Salih Taner Yıldırım

Kocaeli Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İkrime Orkan Uçar

Düzce Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 20/07/2017

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

20 Temmuz 2017

Eda Yılmaz

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü olağanüstü destek ve yardımından dolayı çok değerli hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet Beycioğlu'na en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve deneysel çalışmada yardımlarını esirmeyen kuzenim Berna Yılmaz'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Üretim sonrası malzemelerin kesimi ve deneye hazırlık aşamasında her türlü yardımları için Superlit Boru A.Ő. firması ile yetkilileri Kimya Yüksek Mühendisi Neslihan Gökçe ve Yüksek Kimyager Gökçen Gündoğan'a, deneysel çalışmadaki yardımlarından ötürü başta Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) müdürü Prof. Dr. Halil İbrahim UđraŐ başta olmak üzere DÜBİT yetkilileri Uzman Tuna Demirci, Uzman İrfan Akgül ve Uzman Mesut Yılmaz'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca her türlü desteği ve yardımıyla ile yanımda olan değerli arkadaşım Abdülkerim Aydın'a özellikle teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP-2017-0705527 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir.

20 Temmuz 2017

Eda Yılmaz

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ	VII
ÇİZELGE LİSTESİ	IX
KISALTMALAR	X
SİMGELER	XI
ÖZET	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ	1
2. KOMPOZİT MALZEMELER	5
2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI	11
2.1.1. Takviye Elemanlarının Şekline Göre Kompozitler	11
<i>2.1.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler</i>	<i>11</i>
<i>2.1.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler</i>	<i>12</i>
<i>2.1.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler</i>	<i>13</i>
<i>2.1.1.4. Karma Kompozit Malzemeler</i>	<i>14</i>
2.1.2. Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler	15
<i>2.1.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler</i>	<i>15</i>
<i>2.1.2.2. Metal Matrisli Kompozitler</i>	<i>16</i>
<i>2.1.2.3. Seramik Matrisli Kompozitler</i>	<i>17</i>
2.2. KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ	18
2.2.1. El yatırması yöntemi	18
2.2.2. Otoklav yöntemi	19
2.2.3. Elyaf Sarma yöntemi	21
2.2.4. Profil Çekme –Pultrüzyon yöntemi	23
2.2.5. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemi	24
2.2.6. Püskürtme (Spray-up) yöntemi	25
2.2.7. Vakum Torbalama	26
3. KOMPOZİT MALZEMELERDE YANMA	28
3.1. YANMA MEKANİZMASI	28

3.2. POLİMERLERDE YANMA ETKİSİ	29
3.3. POLİMERLERDE KULLANILAN ALEV GECİKTİRİCİLER.....	30
3.3.1. Halojenli Alev Geciktiriciler	31
3.3.2. Fosforlu Alev Geciktiriciler	33
3.3.3. Hidrat Sulu Alev Geciktiriciler	33
3.4. POLİMERLERDE YANMA DİRENCİ TESTLERİ.....	34
3.4.1. ASTM D-635 – Yatay Yanma Testi	34
3.4.2. ASTM D-3801 – Dikey Yanma Testi.....	35
3.4.3. ASTM D5048 - 125 mm Alev Yüksekliği Kullanılarak Dikey Yanma Testi.....	36
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	38
5. MATERYAL VE YÖNTEM.....	43
5.1. MATERYAL	43
5.1.1. Matris Sistemi	43
5.1.2. Takviye Sistemi	44
5.1.3. Katkı Malzemeleri	45
5.1.4. Diğer materyaller	45
5.2. YÖNTEM	46
5.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması	46
5.2.2. Yanma Testi.....	51
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
6.1. TERMAL ANALİZ (TGA-DTA)	60
6.2. YANMAZLIK TESTLERİ	64
6.3. ÇEKME TESTİ.....	74
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
8. KAYNAKLAR.....	84
9. EKLER	88
9.1. EK 1: YANMA TESTLERİ.....	88
ÖZGEÇMİŞ	93

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Malzemelerin sınıflandırılması.....	1
Şekil 2.1. Dünyada yıllık kompozit malzeme kullanımı.	5
Şekil 2.2. Modern kompozitlerden yüksek performanslı kar kayağının yapısı.	6
Şekil 2.3. Kompozit içerisinde takviye elemanlarının kullanım türleri a)Farklı yoğunluk b) Farklı boyut c) Farklı şekil d) Farklı dağılım e) Farklı yönlenme.	7
Şekil 2.4. Boeing 787 uçağındaki kompozit parçalar.	9
Şekil 2.5. Karbon elyaf kullanılan gemi direği.	9
Şekil 2.6. Kompozit malzemeden üretilen çeşitli spor malzemeleri.....	9
Şekil 2.7. Bir araçta kompozit olarak kullanılan parçaların gösterimi.	10
Şekil 2.8. Kompozitlerin sınıflandırılması.....	11
Şekil 2.9. a) Tek Yönlü Sürekli Elyaf b) Kırılmış (Kısa) Elyaf c) Ortogonal Elyaf d) Çapraz Dizilmiş Sürekli Elyaf e) Rastgele Dizilmiş Sürekli Elyaf.	12
Şekil 2.10. Parçacık takviyeli kompozitlerden beton örneği.	13
Şekil 2.11. Tabakalı kompozitler a) Tek yönlü b) Çapraz c) Açılı d) Çok yönlü.....	13
Şekil 2.12. Sandviç Kompozit Yapının Elemanları.	14
Şekil 2.13. Petek dolgulu sandviç kompozit yapısı.	14
Şekil 2.14. Kompozit takviye tiplerinin şematik gösterimi.	15
Şekil 2.15. Takviye elemanı tipine göre metal matrisli kompozitler.	17
Şekil 2.16. El yatırması yöntemi şematik gösterimi.	19
Şekil 2.17. El yatırması yöntemi ile ilgili bir görsel.	19
Şekil 2.18. Otoklav üretim prosesinin ana adımları.....	20
Şekil 2.19. Ön emdirme işlemi.	20
Şekil 2.20. Karbon fiber / epoksi reçine prepreg örneği.	21
Şekil 2.21. Otoklav prosesi görseli.	21
Şekil 2.22. Elyaf sarma makinesi şematik gösterimi.	22
Şekil 2.23. Sanayide kullanılan elyaf sarma sistemi örneği.	22
Şekil 2.24. Elyaf sarma şekilleri. a) Helisel b) Çevresel c) Polar.....	23
Şekil 2.25. Profil çekme makinesi şematik gösterimi [27].	24
Şekil 2.26. RTM Prosesi şematik gösterimi.	25
Şekil 2.27. Püskürtme yöntemi şematik gösterimi [31].	26
Şekil 2.28. Püskürtme yöntemi ile üretime ait bir görsel [32].	26
Şekil 2.29. Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzeme üretimi [33].	27
Şekil 2.30. Vakum torbalama yöntemi ile kompozit üretim uygulaması [34].	27
Şekil 3.1. Yanma Mekanizması.	29
Şekil 3.2. Polimer yanma aşamaları.....	30
Şekil 3.3. Halojenli alev geciktirici türlerinin kimyasal yapıları.	32
Şekil 3.4. ASTM D-635 yanma test gösterimi.....	35
Şekil 3.5. Dikey yanma testi (V-0 V-1 ve V-2 sınıflandırma için).	36
Şekil 3.6. ASTM D5048 Yanma testi şematik görünümü.	37
Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan reçine, kobalt oktoat ve MEK-P.	44
Şekil 5.2. Takviye elemanı olarak kullanılan mat keçe cam elyaf.	44
Şekil 5.3. Kompozit üretiminde kullanılan alev geciktirici toz katkıları.	45
Şekil 5.4. a) Elek b) Kalıp ayırıcı c) Tırtıklı rulo.	46

Şekil 5.5. Deneysel akış diyagramı.....	47
Şekil 5.6. a) Reçine tartımı b) Kobalt oktoat ilavesi c) MEK-P ilavesi.....	48
Şekil 5.7. Plywood kullanılarak hazırlanan el yatırması üretim tezgahı.	49
Şekil 5.8. a) Zemine kalıp ayırıcı sürülmesi b) İki kat 30×30 boyutlarındaki cam elyafının kalıp ayırıcı sürülen yüzeye yerleştirilmesi.	49
Şekil 5.9. a) Reçine karışımının elyafa dökülmesi b) Rulo yardımıyla yüzeye sürülmesi c) rulo işlemi sonrası elyaf görünümü.	50
Şekil 5.10. Reçineye katkı ilavesi ve karıştırma uygulaması	50
Şekil 5.11. El yatırması ile üretilen kompozit örnekleri.	51
Şekil 5.12. Kesim işlemleri için hazırlanan el yatırması kompozit plakalar.	51
Şekil 5.13. Yanma testi için hazırlanan numuneler.	52
Şekil 5.14. Yanma Test Cihazı.	52
Şekil 5.15. Alev yüksekliğinin standartlara uygun olarak ayarlanması.....	53
Şekil 5.16. Referans örnek plaka için ASTM D-5048 yanma testi uygulaması.	53
Şekil 5.17. Alüminyum hidroksit içeren 15×15 cm boyutlarındaki plaka örnekleri üzerine alev uygulaması.	54
Şekil 5.18. Referans örnek için ASTM D-3801 yanma testi uygulaması	54
Şekil 5.19. %5 ve %10 oranlarında hazırlanan alüminyum hidroksit içerikli kompozit çubuk numunelere ASTM D-3801 yanma testi uygulaması.	55
Şekil 5.20. a) AH içeren çubuk numuneler için 0 – 10 s arası ilk uygulama, b) 10 s sonrası yanmanın sönmesini bekleme c) Alevin sönmesi sonrası ikinci 10 s'lik yanma testi uygulaması.	55
Şekil 5.21. Referans örneğin işaretlenmesi sonrası yanma düzeneğine yerleştirilmesi.	56
Şekil 5.22. a) 20 mm alev yüksekliğinde alev kaynağına referans örneğin 30 saniye kadar maruz bırakılması b) referans işaretin yanarak test bölgesine alevin ilerlemesi c) Test bölgesinin (75 mm) tamamen yanması.....	56
Şekil 5.23. Farklı oranlarda AH içeren kompozit çubuk örneklere ASTM D-635-14 yanma testi uygulaması.	57
Şekil 5.24. Çekme testi için hazırlanan çentikli çekme numuneleri.	57
Şekil 5.25. Çekme test cihazı.....	58
Şekil 5.26. Kumpas yardımıyla çekme test çubuklarının en – boy özelliklerinin belirlenmesi.	58
Şekil 5.27. Çubuk örneklerinin çekme testi öncesi ve çekme testi sonrası durumları...	59
Şekil 6.1. REF kompozit örneği için TGA-DTA diyagramı.....	61
Şekil 6.2. AH kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.	61
Şekil 6.3. AT kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.	62
Şekil 6.4. ÇB kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.	63
Şekil 6.5. SP kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.	63
Şekil 6.6. Yakma testi sonrası tüp örnekler.	64
Şekil 6.7. ASTM D-5048 yanma testi uygulaması sonrası farklı plaka türleri görünümü.	65
Şekil 6.8. Yüzdece katkı oranına göre üretilen kompozit çubuk örneklerinin yanma sonrası durumları (ASTM D3801).	66
Şekil 6.9. ASTM D-635-14 yanma testi sonrası referans örneğin görünümü.	71
Şekil 6.10. Yüzdece katkı oranına göre üretilen kompozit çubuk örneklerinin yanma sonrası durumları (ASTM D635).	72

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Çizelge 2.1. Kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri ve mühendislik özellikleri.....	8
Çizelge 2.2. Kompozit malzemelerin kullanım alanları.	10
Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan doymamış polyeşter reşinenin özellikleri.	43
Çizelge 5.2. MEK-P ve Kobalt oktoata ait fiziksel ve kimyasal özellikler.	44
Çizelge 5.3. Takviye Elemanı olarak kullanılan mat keçe cam elyafın özellikleri.	45
Çizelge 5.4. Katkı bileşikleri ve özellikleri.	45
Çizelge 5.5. Katkı türü, oranı ve test standardına göre numune boyut ve sayıları.	48
Çizelge 6.1. Yakma testi kütle kaybı sonuçları.	64
Çizelge 6.2. ASTM D-3801 standardına göre test edilen alüminyum hidroksit içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	67
Çizelge 6.3. ASTM D-3801 standardına göre test edilen antimon trioksit içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	69
Çizelge 6.4. ASTM D-3801 standardına göre test edilen çinko borat içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	70
Çizelge 6.5. ASTM D-3801 standardına göre test edilen sepiyolit içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	71
Çizelge 6.6. ASTM D-635 standardına göre test edilen AH çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	72
Çizelge 6.7. ASTM D-635 standardına göre test edilen AT çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	73
Çizelge 6.8. ASTM D-635 standardına göre test edilen ÇB çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	73
Çizelge 6.9. ASTM D-635 standardına göre test edilen SP çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.	74
Çizelge 6.10. Referans örneklerin çekme testi sonuçları.	74
Çizelge 6.11. AH örneklerinin çekme testi sonuçları.	75
Çizelge 6.12. AT örneklerinin çekme testi sonuçları.	76
Çizelge 6.13. ÇB örneklerinin çekme testi sonuçları.	77
Çizelge 6.14. SP örneklerinin çekme testi sonuçları.	78

KISALTMALAR

ASTM	American society for testing and materials
AH	Alüminyum hidroksit
AT	Antimon trioksit
CTP	Cam elyaf takviyeli polyester
ÇB	Çinko borat
MMK	Metal matrisli kompozitler
PMK	Polimer matrisli kompozitler
RTM	Reçine transfer kalıplama
SP	Sepiyolit
SMK	Seramik matrisli kompozitler



SİMGELER

g	Gram
GPa	Giga pascal
MPa	Mega pascal
mm	Milimetre
N	Newton
s	Saniye



ÖZET

TERMOSET REÇİNE MATRİSLİ CTP'LERDE İNORGANİK YAPIDAKİ BİLEŞİKLERİN ALEV GECİKTİRİCİ OLARAK KULLANIMI

Eda YILMAZ

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri
Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU

Temmuz 2017, 92 sayfa

Bu çalışmada, cam elyaf takviyeli polyester (CTP) kompozitlere yanmazlık özelliği kazandırmak amacıyla inorganik yapıdaki bileşiklerin kullanılabilirliği ve ayrıca kompozit içerisinde kullanılan bu bileşiklerin kompozitin çekme dayanımına etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kompozitin yanmazlık özelliğini geliştirmek amacıyla reçine karışımına %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında sepiyolit ($\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_{4-8}$), antimon trioksit (Sb_2O_3), alüminyum hidroksit ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ve çinko borat ($2\text{ZnO}_3 \cdot \text{BrO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) eklenmiştir. Çalışmanın deneysel aşamasında, farklı inorganik bileşikler kullanılarak üretilen katkılı CTP kompozitlerin yanma davranışı, ASTM D-635, ASTM D-3801 ve ASTM D-5048 uluslararası yanma standartları ile belirlenmiştir. Ayrıca üretilen katkılı CTP kompozitlerin sıcaklık artışına bağlı olarak termal davranışını belirlemek amacıyla termogravimetrik analiz (TGA) ve çekme dayanımını belirleyebilmek amacıyla da ASTM 638-14'e göre çekme testi uygulanmıştır. Sonuç olarak, üretilen CTP kompozitlerde alev geciktirici katkı oranı %15 ve üzerinde kullanıldığında el yatırması yöntemiyle kompozit malzeme üretimi viskozite artışına bağlı olarak zorlaşmıştır. ASTM D5048'e göre sepiyolit içeren plaka örneklerinde alev etkisine karşı gözle görülür bir direnç gözlemlenmiştir. ASTM D-3801'e göre %30 oranında alüminyum hidroksit ve yine aynı oranda antimon trioksit kullanıldığında V1 sınıfında yanmaz malzeme üretilebilmektedir. Alev geciktirici içeren tüm CTP kompozitler yatayda yavaş yanan malzeme (HB) sınıfında yer almıştır. TGA analizine göre sepiyolit CTP kompozitin bozunma sıcaklığını referansa göre yükseltmiş ve sıcaklık etkisindeki kütle kaybını da önemli düzeyde azaltmıştır. Alev geciktirici kullanımı CTP kompozitlerin çekme dayanımını genel olarak düşürmüştür ancak %10 oranında antimon trioksit katkılı CTP'lerde artış olduğu görülmüştür.

Anahtar sözcükler: Cam elyaf takviyeli polyester kompozit, Çekme dayanımı, İnorganik katkı, Yanmazlık.

ABSTRACT

USING INORGANIC COMPOUNDS AS FLAME RETARDANT IN GRP FORMED WITH THERMOSET RESIN MATRIX

Eda YILMAZ

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Interdisciplinary Composite Material
Technologies

Master's Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU

July 2017, 92 pages

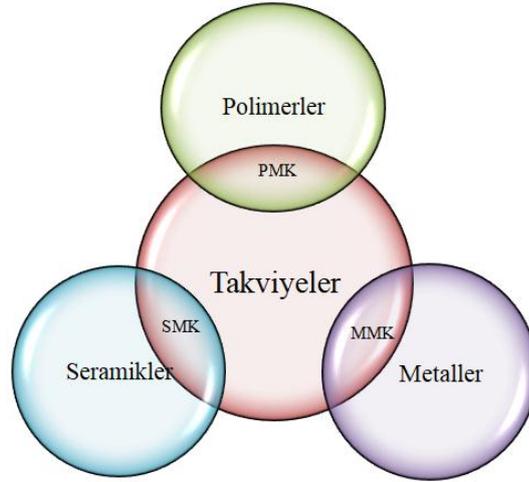
In this study, it was aimed to investigate the usability of inorganic compounds as flame retardants to produce glass fiber reinforced polyester composites (GRP). Also, the effect of these compounds on the tensile strengths of GRPs was determined. Sepiolite ($\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), antimony trioxide (Sb_2O_3), aluminum hydroxide ($\text{Al}(\text{OH})_3$) and zinc borate ($2\text{ZnO}_3 \cdot \text{BrO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) were added by different proportions (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%) to resin blends to improve the non-flammability of the composites. In experimental study, the combustion behavior of GRP composites produced using different inorganic compounds was determined by international combustion standards of ASTM D-635, ASTM D-3801 and ASTM D-5048. In addition, thermogravimetric analysis (TGA) was performed in order to determine the thermal behavior of the produced resins containing inorganic compounds due to temperature increase and tensile test were applied according to ASTM 638-14. As a result, when the flame retardant additive ratio is 15% or more in the GRP composites, the hand lay production became difficult due to the increase in viscosity. A visible resistance to flame effect was observed by the plate containing sepiolite according to ASTM D5048 flame test. ASTM D-3801 flame test, when aluminum hydroxide and antimony trioxide were used as the ratio of 30%, non-combustible material in V1 class can be produced. All GRP composites containing flame retardants can be classified in the HB - slowly burning material class. According to the TGA analysis sepiolite increased the degradation temperature of the GRP composite compared to the reference and sepiolite significantly reduced mass loss under the effect of temperature. Using flame retardants generally reduced the tensile strength of GRP composites, but it was found an increase in GRPs containing antimony trioxide as the ratio of 10%.

Keywords: Glass fiber reinforced polyester composites, Inorganic compound, Non-flammability, Tensile test.

1. GİRİŞ

Teknolojik ilerleme ile birlikte mevcut malzeme özelliklerinin gelişimi hız kazanmıştır. Genel olarak yeni malzemelerde verimliliğin ve performansın iyileştirilmesi amaçlanır. Malzeme bilimindeki yüksek performans beklentilerine cevap vermek için tasarlanan en dikkat çekici malzemeler kompozit malzemelerdir. Kompozit malzemeler iki ya da daha fazla malzemenin üstün özelliklerini tek bir malzeme altında toplayabilmek amacıyla üretilen yeni nesil mühendislik malzemeleri olarak tanımlanabilir. Bu iki veya daha fazla malzemenin en az birisinin kompozitin ana bağlayıcısı olarak matris olarak adlandırılan malzeme olması diğerinin ise kompozite üstün özellik kazandıran ve takviye olarak adlandırılan malzeme olması gerekir [1].

Günümüzde üretilen kompozitlerde matris malzemesi olarak metal, seramik ve polimer malzemeler kullanılmaktadır. Bu üç gruptaki malzemelerin her birinin takviye elemanı ile bir araya getirilmesi sonucu matrisin ne olduğuyla ilişkilendirilerek tanımlanan ve Şekil 1.1’de görülen seramik matrisli kompozitler (SMK), metal matrisli kompozitler (MMK) ve polimer matrisli kompozitler (PMK) yeni ve üstün özellikli ürünler olarak ortaya çıkmaktadır [2], [3].



Şekil 1.1. Malzemelerin sınıflandırılması.

Ancak moleküler ve atomik seviyede birleştirilen malzemeler ve alaşımlar kompozit malzeme olarak tanımlanmazlar. Örneğin; çeliğin içerisindeki krom ve vanadyumun oluşturduğu karışım, homojen olması dolayısıyla kompozit olarak sınıflandırılmaz.

Fakat karbür uçlu takımlar, yumuşak metal matris içerisine yerleştirilen sert karbürlerle parçacıklı kompozit örneğini oluşturur. Kompozit malzemeyi oluşturan takviye elemanları değişik morfolojideki kısa ve uzun elyaflar, viskerler (kılcal kristaller), kırılmış veya parçacıklı seramikler olabilmektedir. Takviye elemanının temel görevi yükü taşıyarak ana eleman olan matrisin rijitliğini ve dayanımını sağlamaktır. Matris elemanının görevi ise çok gevrek ve kırılğan yapıdaki takviye elemanının yüzeyini çevresel dış faktörlere karşı korumak olarak söylenebilir [4].

Kompozit malzemeler modern malzemeler olarak tanımlansa da aslında antik çağlardan beri bilinen bir malzeme türüdür. Antik çağlarda gündelik yaşamda kullanılan ürünlerde kompozitler yer alabildiği gibi aynı zamanda yine o dönemdeki bazı silahların performanslarını geliştirmek için de kompozitler kullanılmıştır. Örneğin;

- Moğollar, mısır parçalarını sıkıştırarak elde ettikleri yay görüntüsündeki silahlarına inek tendonlarını bir çeşit balık tutkalı ile yapıştırıp yayın gerilen kısmını ahşaptan yapmışlardır.
- Japonların kılıç ve bıçakları ise çelik ve düşük karbon içeriğine sahip yumuşak demirden yapılmıştır [5].

Kompozit malzemeler, sağladıkları avantajlar ve farklı alanlara uygulanabilme özellikleri ile birçok mühendislik alanında önemli yer tutarlar. İstenen özellikleri tek başına karşılama yeteneği olmayan malzemelerin çeşitli oranlarda birleştirilmeleri ile ortaya çıkan kompozitler yeni bir sektörün oluşmasına da olanak sağlamıştır [6].

Kompozit malzemeler yukarıda da belirtildiği gibi matris malzemesine göre; polimer, metal ve seramik olarak 3 grupta incelenebilir. Bunlardan, orta ve yüksek yoğunluğa sahip olup tokluk ve dayanım özellikleri açısından zengin olan metaller özellikle makine ve metalürji alanında yaygın olarak kullanılmaktadır. Saf haldeyken yumuşak ve dayanımı düşük olsa da alaşım haline getirildiklerinde, soğuk biçimlendirme ve ısıtım işlem uygulaması sonrası dayanımları ve sertlikleri artmaktadır. Metaller ayrıca kolaylıkla dökülerek şekillendirilebilir ve karmaşık montajlamaya elverişlidir.

Seramikler; düşük yoğunluklu, çok dayanıklı ve sert olmasına karşılık aşırı ölçüde gevrek malzemedir. Termal ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı olan seramiklerin yüksek ergime sıcaklıklarında işlenmeleri zordur ve yalıtkan özelliktedirler.

Polimerler ve sıklıkla kullanılan ismiyle plastikler; düşük yoğunluğa sahip olup karmaşık şekillendirmeye uygundur. Fakat termal dayanımları düşüktür ve çevresel

etkilere karşı düşük mekanik özelliklere sahiptir [4].

Son zamanlarda gelişen teknolojiyle birlikte özellikle liflerle güçlendirilmiş polimer kompozitlere yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Polimer kompozitler kolay işlenebilirlik, hafiflik, korozyona karşı dirençlilik vb. özellikleri sebebiyle üstün özellikli malzemeler olarak farklı sektörlerde uygulama alanı bulmaktadır [6].

Günümüzde en çok kullanılan polimer esaslı kompozitlerin başında cam elyaf takviyeli kompozitler (CTP) gelmektedir. CTP'ler yeterli mekanik dayanıma sahip olmayan polyester reçine ile yüksek mekanik dayanımlı cam elyafının çeşitli yöntemlerle bir araya getirilmesi ile elde edilirler. CTP'ler düşük yoğunlukları, şekillendirme kolaylıkları ve yüksek mukavemetleri ile çeşitli sektörlerde çok fazla tercih edilen malzemeler konumundadırlar [7].

Bu malzemelerin kullanım alanlarındaki artışın getirdiği doğal bir sonuç olarak mevcut ürünün daha da geliştirilmesi yönünde adımlar atılmaktadır. Aynı zamanda polimer esaslı olmaları nedeni ile yanıcılık özelliklerinin olduğu bilinmektedir. Yanma olayı, ısı, oksijen ve yakıtın bir araya gelerek oluşturduğu kimyasal bir olay olarak tanımlanabilir. Oksijen kaynağının varlığı ile birlikte polimerlerin yanma olayı üç aşamada incelenir. Bunlar, ilk olarak polimerin ısınması, ısı etkisi ile bozunmaya başlaması ve son olarak bozunma ile yanıcı gazların malzemeyi tutuşturmaya başlamasıdır. Polimerler yandığında açığa çıkan yanıcı gazlar aynı zamanda toksik özellik taşımaktadırlar [6].

Açığa çıkan gazlar sıklıkla; karbon monoksit (CO), hidrojen siyanür (HCN), azot oksitler (NO_x), hidrojen klorid, sülfür oksitler vb. gazlardır [8].

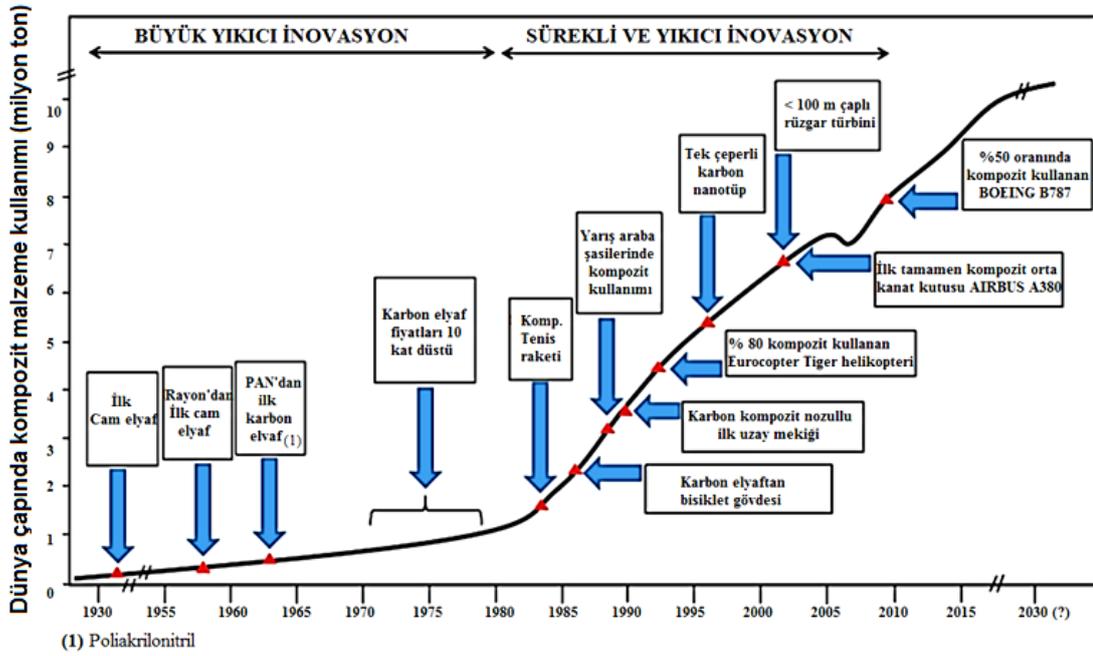
Literatürde polimerin yanma direncini artırmak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalarda kullanılan alevlenmeyi geciktiriciler yanmaya fiziksel, kimyasal veya her ikisi bir arada olacak şekilde etki edebilirler. Bu etki kullanılan alev geciktirici bileşiğe göre değişmektedir. Örneğin alev geciktiriciler yanma esnasında ortaya çıkan radikalleri yok edebildikleri gibi endotermik tepkimelere girerek de ısıyı azaltırlar ve yanıcı nitelikte olmayan gazların üretimi ile yanıcı gazları seyreltirler. Alev geciktirici katkıları arasında en tartışmalı olanları halojenli alev geciktiricilerdir. Bunlar HX türü (X, halojen) çevreye ve insan sağlığına olumsuz etkileri olabilecek asitler üretebildikleri için, insanların bulunduğu kapalı alanlarda kullanılan polimer esaslı malzemelere genellikle katılmazlar. Hidrat sulu alevlenmeyi geciktiriciler ise yanma ile su buharı açığa çıkardıklarından sağlık açısından sorun teşkil eden sınıftan sayılmazlar [6].

Bu alışmada, CTP'lere yanmazlık özelliği kazandırmak amacıyla inorganik kaynaklı bileşiklerin kullanılabilirliği ve ayrıca kompozit içerisinde kullanılan bu bileşiklerin kompozitin mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır.



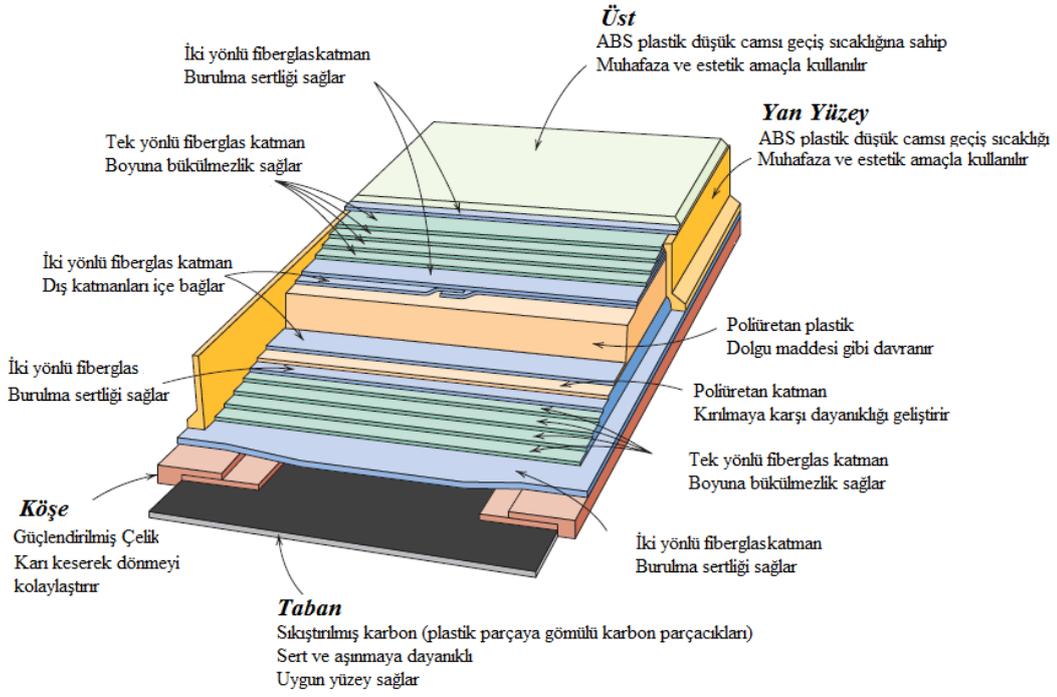
2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kompozit malzemeler eski çağlardan beri günlük yaşamda kullanılan ve tarihsel süreç içerisinde sürekli bir gelişim içerisinde olan malzemelerdir. Bu malzemeler özellikle spor, havacılık, otomotiv vb. alanlarda yoğunlukla kullanılarak günümüzün en bilinen malzemeleri haline gelmişlerdir. Tarihsel olarak incelendiğinde, Şekil 2.1’de görüldüğü gibi özellikle son elli yılda sürekli gelişim göstermiştir. 2000’li yıllardaki ekonomik krizin bir sonucu olarak %5 oranında küçülme yaşasa da daha sonraları yine gelişimine devam etmektedir [9].



Şekil 2.1. Dünyada yıllık kompozit malzeme kullanımı.

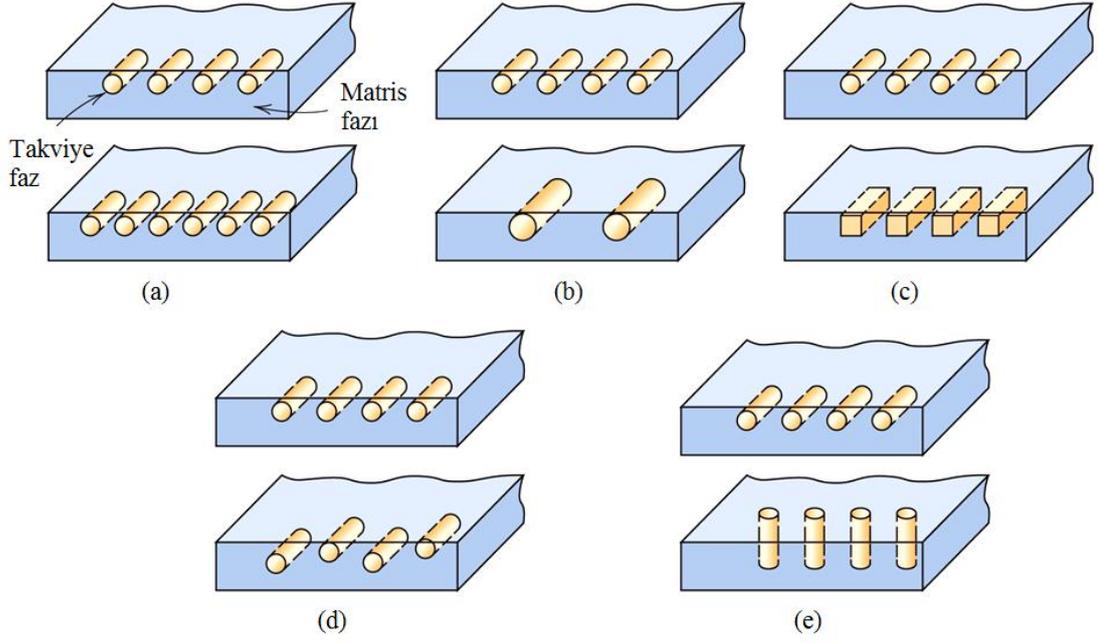
Kompozit; makroskopik seviyede bir araya getirilmiş iki ya da daha fazla bileşenden oluşan bir malzemedir. Kompoziti oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmez ve etkileşime girmezler. Kendini oluşturan bileşenlerden biri matris, diğeri takviye kısmıdır. Kompozitler, yüksek mukavemet, hafiflik, tasarım esnekliği, korozyona karşı dayanıklılık, kolay işlenebilirlik vb. özellikleri nedeniyle günümüzün vazgeçilmez malzemelerinden birisidir. Şekil 2.2’de kompozit malzemelerin tabakalı yapıları ile ilgili olarak iyi bir örnek teşkil eden yüksek performanslı modern bir kar kayağının yapısı detaylı olarak sunulmuştur [10], [11].



Şekil 2.2. Modern kompozitlerden yüksek performanslı kar kayağının yapısı.

Kompozitler farklı malzemelerin belirli bir düzen ile birlikteliğinden oluşmakta ve çoğu zaman bu malzemeler kompozitteki temas ettiği noktalardan gözle ayırt edilebilmektedir. Kompozit malzemelerin temel üretim amacı, farklı malzemelerin iyi olarak nitelendirilen özelliklerini bir araya getirmek ve daha üstün özellikler elde etmektir [7].

Kompozit içerisinde kullanılan takviye elemanları Şekil 2.3'te şematik olarak gösterildiği gibi çok farklı boyut, yoğunluk, şekil, dağılım ve yönlenmelere sahip olarak yer alabilirler [11].



Şekil 2.3. Kompozit içerisinde takviye elemanlarının kullanım türleri a) Farklı yoğunluk b) Farklı boyut c) Farklı şekil d) Farklı dağılım e) Farklı yönelme.

Kompozitlerde matris malzeme kompozit ile sürekli bir faz halindeyken takviye kısmı genellikle kesikli fazdır [6].

Kompozit malzemelerde takviyenin yeterliliği uygun matris seçimine bağlıdır. Matris seçerken takviye kısmı ile kimyasal ve fiziksel uyumu, nem ve su alma özelliği ile kullanım kolaylığı gibi unsurlar göz önüne alınır [7].

Kompozitlerin üretiminde kullanılan takviye malzemeleri genel olarak viskerler, elyaflar ve metalik teller olarak sınıflandırılabilirler. Bu takviye malzemelerinin mühendislik özellikleri de farklılıklar içermektedir. Takviye elemanı olarak kullanılan viskerler, elyaflar ve metalik tellerin altında sınıflandırılabilen malzeme türleri çeşitli mühendislik özellikleri ile birlikte Çizelge 2.1’de verilmiştir [11].

Çizelge 2.1. Kompozitlerde kullanılan takviye malzemeleri ve mühendislik özellikleri.

Malzeme	Özgül Ağırlık	Çekme Dayanımı (GPa)	Özgül Dayanım (GPa)	Elastiklik Modülü (GPa)	Özgül Modül
<i>Viskerler</i>					
Grafit	2,2	20	9,1	700	318
Silisyum nitrür	3,2	5-7	1,56-2,2	350-380	109-118
Alüminyum oksit	4,0	10-20	2,5-5,0	700-1500	175-375
Silisyum karbür	3,2	20	6,25	480	150
<i>Elyaf</i>					
Alüminyum oksit	3,95	1,38	0,35	379	96
Aramid(Kevlar 49)	1,44	3,6-4,1	2,5-2,85	131	91
Karbon	1,78-2,15	1,5-4,8	0,7-2,7	228-724	106-407
E-camı	2,58	3,45	1,34	72,5	28,1
Bor	2,57	3,6	1,40	400	156
Silisyum karbür	3,0	3,9	1,30	400	133
UHMWPE (Spectra 900)	0,97	2,6	2,68	117	121
<i>Metalik Teller</i>					
Yüksek dayanımlı çelik	7,9	2,39	0,30	210	26,6
Molibden	10,2	2,2	0,22	324	31,8
Tungsten	19,3	2,89	0,15	407	21,1

Yukarıda mühendislik özellikleri verilen elyaflardan karbon elyaf, kristal grafit bölgeleri yanında kristal olmayan ve hatalı kristal bölgeleri de içeren bir yapıda olduğundan, burada grafit yerine karbon olarak isimlendirilmiştir [11]. Kompozit malzemelerin uygulama alanları oldukça farklı sektörü içermekte olup uzay sanayisinden spor malzemelerine kadar geniş bir alana yayılmıştır. Bu alanlar arasında özellikle otomotiv, elektronik, havacılık, spor malzemesi ve inşaat sektörleri sayılabilir [5]. Kompozit malzemeler, kullanım alanlarının başında gelen havacılık sektöründe çok geniş uygulama alanı bulmaktadır. Hafif ve aynı zamanda üstün mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle uçak ve helikopterlerin iç tasarımı ve yapısal tasarımında kompozit malzemeler kullanılmaktadır.

Kompozit malzemelerin kullanıldığı havacılık sektöründen güzel bir örnek ise Şekil 2.4'te görülen Boeing 787 tipi uçaklardır. Bu uçakta kullanılan parçalarda toplamda %50 oranında kompozit malzemeler tercih edilmektedir [9].



Şekil 2.4. Boeing 787 uçağındaki kompozit parçalar.

Denizcilikte ise yat imalatında, tekne gövdesinde ve yelken direklerinde yine kompozit malzemeler kullanılmaktadır. Denizcilikte sıkça kullanılmaya başlanan kompozitlere örnek olarak Şekil 2.5’te görülen karbon elyaf gemi direği verilebilir. Yaklaşık 29 metre olan gemi direği, standart alüminyum direğe göre 318 kg daha hafif imal edilmiştir.



Şekil 2.5. Karbon elyaf kullanılan gemi direği.

Günümüzde spor malzemelerinin üretiminde kullanılan kompozitler, özellikle ağırlığın azaltılması ve bu sayede hareket yeteneğinin artırılması ve dayanıklı malzeme tasarımında kullanılmaktadır. Kompozit spor malzemelerine ait bazı örnekler Şekil 2.6’da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Kompozit malzemedен üretilen çeşitli spor malzemeleri.

Otomotiv sektöründe ise, daha hafif malzeme kullanımı için kompozitlerden faydalanılır. Kompozit malzeme kullanımı ile araçların hafiflemesi yakıt tasarrufuna da olanak sağlamaktadır [9]. Şekil 2.7’de bir araçta kullanılan kompozit malzemeler görülmektedir [12].



Şekil 2.7. Bir araçta kompozit olarak kullanılan parçaların gösterimi.

Yukarıda yalnızca otomotiv, spor, havacılık ve denizcilik sektörleri için örnekler sunulmuş olsa da kompozit kullanımı sektörel olarak bu örneklerle sınırlı olmayıp çok fazla çeşitlilik içermektedir. Bu sektörler de dahil olmak üzere kompozit kullanılan çeşitli sektörler ve kullanım amaçları Çizelge 2.2’de özet olarak sunulmuştur [13], [14].

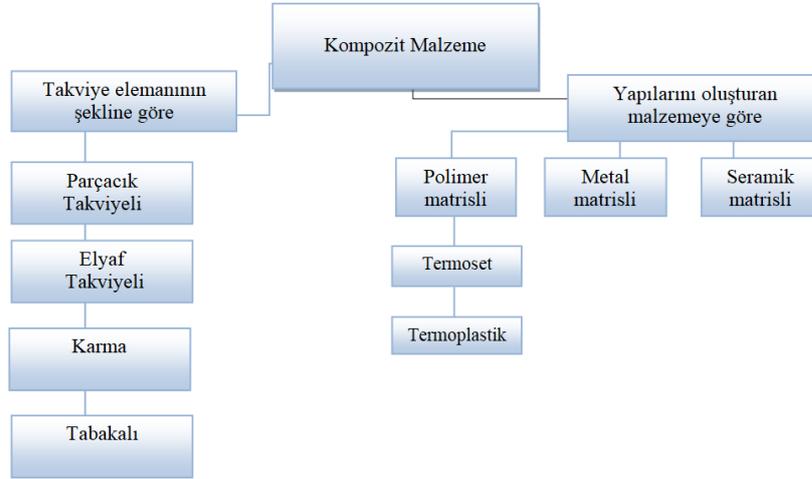
Çizelge 2.2. Kompozit malzemelerin kullanım alanları.

Kullanıldığı sektör	Kullanım amaçları
Elektrik - Elektronik	Yalıtım malzemesi, Devre kesiciler, Kablo parçaları, Rüzgar türbinleri, Baskılı devre
Yapılar ve Kamu işleri	Baca, Beton Kalıpları, Profiller, Cephe Panelleri
Karayolu Taşımacılığı	Tekerlek, Radyatör Izgarası, Kabin, Oturma Koltuğu, Römork, Şasi
Denizcilik	Kano, Kurtarma Aracı, Yat İmalatı, Tekne Gövdesi, Yelken Direği
Hava yolu	Planör, Uçak Gövde Parçaları, Kanat Ve Kuyruk Parçaları
Otomotiv	Tampon Ve Çamurluk, Araç Kapısı, Kaporta Parçaları, Gövde Panelleri, Yakıt Ve Su Deposu
Spor Ürünleri	Tenis Raketi, Bisiklet, Golf Sopası, Olta Kamışı

2.1. KOMPOZİT MALZEMELERİN SINIFLANDIRILMASI

Kompozitler, farklı yaklaşımlarla ele alındıklarında kendi içlerinde birden çok sınıflandırma yöntemi ile gruplara ayrılabilirler. Bunlardan en çok kullanılanı, takviye elemanının şekline göre ve yapılarını oluşturan malzemelere göre yapılan sınıflandırmadır.

Kompozit malzemeler takviye elemanının şekline göre elyaf takviyeli, parçacık takviyeli, karma, tabakalı kompozitler olarak dört gruba ve matris malzemesine göre ise polimer matrisli, metal matrisli ve seramik matrisli kompozit şeklinde üç gruba ayrılırlar. Kompozitlerin sınıflandırmasına ait şematik bir gösterim Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Kompozitlerin sınıflandırılması.

2.1.1. Takviye Elemanlarının Şekline Göre Kompozitler

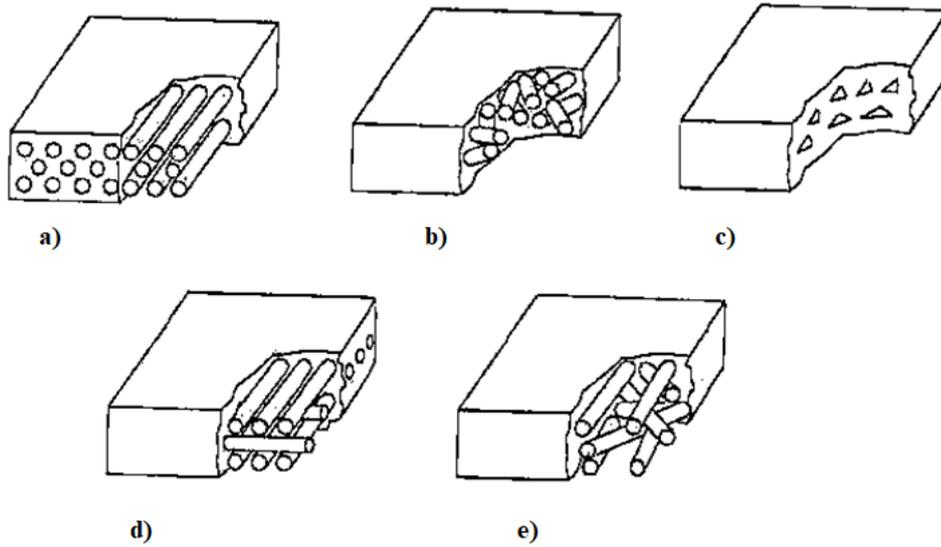
2.1.1.1. Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemeler

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler; takviye fazı sert, dayanıklı ve elastikliği yüksek olan elyaflardan oluşan ve yumuşak, sünek matris içerisine bu elyafların ilave edildiği kompozit malzemelerdir. Elyaf takviyeli kompozitler tasarlanırken özellikle düşük ağırlık ve bununla birlikte yüksek dayanım amaçlanır.

Elyaf takviyeli kompozitlerde matris kısmı metal, polimer ve seramik olarak seçilebilmektedir [11]. Matris malzemesi yükü elyaflara ileterek yumuşaklık ve tokluk özelliği sağlarken elyaf ise uygulanan yükün çoğunluğunu taşımaktadır. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyaflar farklı türlerde olabilirler. Bunlar; örme veya şerit fitil olabileceği

gibi tabakalar halindeki yönlü elyaflar da olabilmektedir. Ticari kullanımda elyaflar özellikle cam ve karbon olarak seçilmektedir. Aynı zamanda bor, silikon karbid ve alüminyum oksit gibi elyaf türleri de sınırlı kullanıma sahiptirler [15].

Elyaf takviyeli kompozitler farklı dizilişlerine göre beş gruba ayrılabilir. Bunlar Şekil 2.9' da görüldüğü gibi tek yönlü sürekli elyaflı, kırılmış (kısa) elyaflı, ortogonal elyaflı, çapraz dizilmiş sürekli elyaflı ve rastgele dizilmiş sürekli elyaflı kompozitlerdir [16].



Şekil 2.9. a) Tek Yönlü Sürekli Elyafı b) Kırılmış (Kısa) Elyafı c) Ortogonal Elyafı
d) Çapraz Dizilmiş Sürekli Elyafı e) Rastgele Dizilmiş Sürekli Elyafı.

2.1.1.2. Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler

Parçacık takviyeli kompozit malzemeler, bir matris içerisine ilave edilen parçacıklı bir malzeme (metal, seramik ve plastik vb.) ile elde edilir. Matris kısmı ile içerisinde yer alan parçacık birbiri içinde çözünmez. Parçacık boyutları kullanıldığı alana göre değişiklik göstererek iri ve ince olabilir. Bu parçacıklar metal olabileceği gibi metal dışı da olabilmektedir. Oluşan parçacık takviyeli kompozitte yük hem matris hem de parçacık tarafından taşınır.

Parçacık takviyeli kompozitlere en iyi örnek olarak beton verilebilir. Beton; kum-çakıl parçacıkları ile çimento ve suyun kimyasal reaksiyonu ile oluşturulur. Parçacık takviyeli kompozitlere örnek olarak Şekil 2.10'daki beton örneği verilmiştir [17].

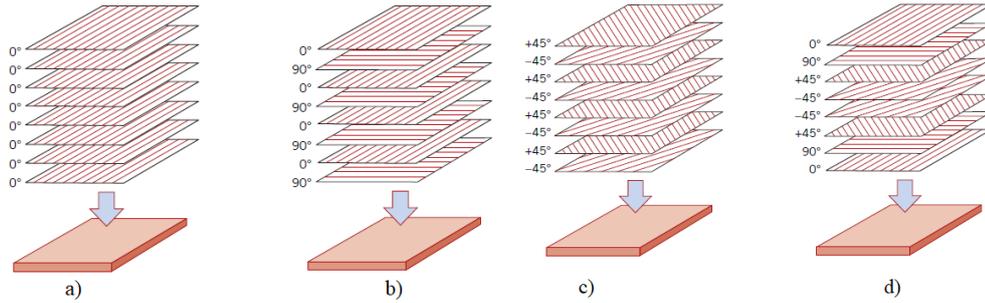


Şekil 2.10. Parçacık takviyeli kompozitlerden beton örneği.

2.1.1.3. Tabakalı Kompozit Malzemeler

Tabakalı kompozitler en yaygın kullanılan ve en eski kompozit malzemeler olup, farklı elyaf yönlenmelerine sahip tabakalar ile yüksek mukavemetli olarak elde edilirler. Isıya ve neme karşı dayanıklı olarak bilinmeleri ile birlikte hafif olmaları ve mukavemetlerinin yüksek olması nedeniyle çok fazla kullanım alanı bulmaktadırlar. Oluşum itibari ile en az iki farklı malzemenin tabakalar halinde dizilmesi ile meydana gelirler.

Tabakalı kompozitlere aynı zamanda lamine kompozit malzemeler de denilmektedir. Yapı olarak daha çok üst üste yapıştırılarak meydana getirilen levha malzeme şeklindedir. Tabakalı kompozitlerin tabakalarındaki açılal yönlendirmeler ile ilgili çeşitli uygulama biçimleri Şekil 2.11’de görülmektedir [11].

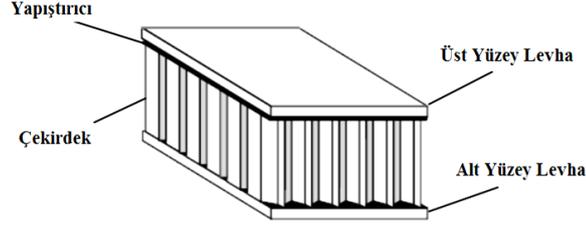


Şekil 2.11. Tabakalı kompozitler a) Tek yönlü b) Çapraz c) Açılı d) Çok yönlü.

Tabakalı kompozitleri oluşturan tabakalar farklı özellikte olabileceği gibi aynı tür malzemelerden de oluşabilmektedir [18].

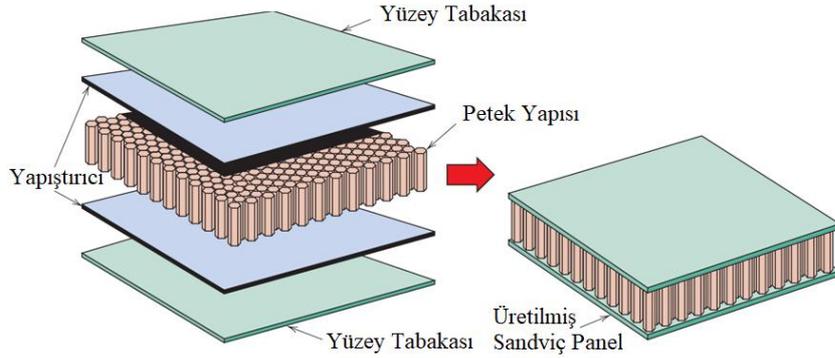
Son yıllarda geleneksel tabakalı kompozitler, uçak sektörü gibi hafif malzemeye ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılmak üzere özel yapılara ayrılmaktadır. Bunlar genel olarak sandviç kompozitler olarak adlandırılabilir gibi içerisinde bal peteği yapısı buldurmaları nedeniyle bal peteği kompozitler olarak da isimlendirilebilirler.

Sandviç kompozitlerde temel olarak, iki adet rijit ve ince tabaka arasına hafif çekirdek malzeme yerleştirilmektedir. Şekil 2.12’de bu yapılar şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Sandviç Kompozit Yapının Elemanları.

Geleneksel kompozitlere oranla oldukça hafif malzemeler olan sandviç kompozitler; bu özellikleri ile havacılık ve uzay sanayi başta olmak üzere, otomotiv ve yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bal peteği kompozitlerde ise çekirdek kısmı Şekil 2.13'te görüldüğü gibi petek yapısındadır [11].



Şekil 2.13. Petek dolgulı sandviç kompozit yapısı.

2.1.1.4. Karma Kompozit Malzemeler

Karma kompozitler, aynı kompozit malzeme matrisi içerisinde en az iki takviye elemanının kullanılması biçiminde üretilen hibrit yapıdaki kompozitlerdir. Karma kompozitler oluşturulurken en çok kullanılan sistem, cam elyafının ve karbon elyafının birlikte kullanıldığı polimer matrisli kompozitlerdir. Karbon elyafı maliyeti yüksek, güçlü ve yüksek rijitliği olan bir takviye malzemesidir. Cam elyafı ise karbona nazaran ucuz, karbon kadar yüksek rijitliği olmayan bir takviye malzemesidir. İkisinin birlikte kullanımı ile güçlü ve darbe dayanımı yüksek malzeme elde edilebilmekte ve takviye malzemesi olarak tek başına kullanılacak karbon elyafına göre daha düşük maliyetle üretilen bir kompozit malzeme ortaya çıkmaktadır.

Temel kullanım alanları arasında kara, hava ve deniz araçlarına ait parçalar, spor aletleri sayılabilir [11].

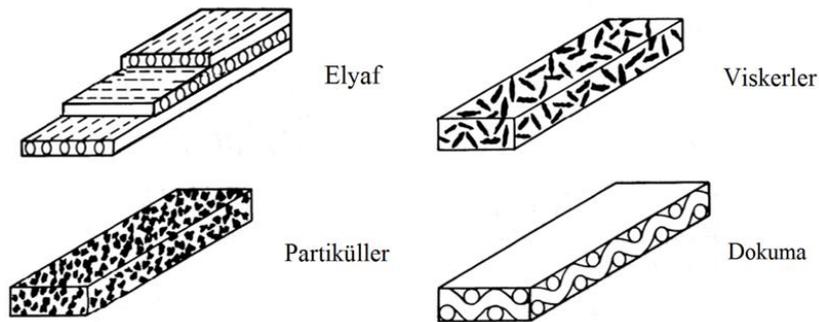
2.1.2. Yapılarını Oluşturan Malzemelere Göre Kompozitler

2.1.2.1. Polimer Matrisli Kompozitler

En yaygın kullanılan ve en gelişmiş kompozitler olarak bilinen polimer matrisli kompozitlerde matris olarak polimer (epoksi, üretan, polyester vb.) ile ince çaplı takviye malzemesi olan elyaf (grafit, aramid, boron vb.) birlikte kullanılmaktadır. Bu malzemeler, kolay üretilebilmeleri, yüksek mukavemetleri vb. nedenlerle geniş bir kullanım potansiyeline sahiptirler. En yaygın kullanılan polimer matrisli kompozitler CTP'dir [11].

Kullanılan takviye elemanı polimer matrisli kompozitte yüksek mukavemet ve sertlik sağlamaktadır. Matris ise lifleri birbirine bağlar, bir arada tutar ve yük aktarımında köprü görevi görür.

Metal matrisli kompozitlere kıyasla üstün korozyon ve yorulma direnci içeren polimer kompozitlerde matris yüksek sıcaklıklarda bozunma riski taşımaktadır. Polimer matrisli kompozitlerde takviye elemanlarının şekli Şekil 2.14'te görüldüğü gibi farklı türlerde olabilmektedir.



Şekil 2.14. Kompozit takviye tiplerinin şematik gösterimi.

Polimer kompozitteki matris fazı termoset ve termoplastik olarak iki grupta incelenebilir [3].

Termosetler, çapraz bağlı zincirler içeren polimerlerdir. Çapraz bağ içermeleri nedeniyle sert yapıları vardır ve çözücülerde çözünmezler. Buna karşın yeterli ısı aldıklarında kolaylıkla bozunurlar. Günümüzde kullanılan bilgisayar klavyesi, prizler ve melamin tabaklar termoset polimerlerle üretilen başlıca ürünlerdendir.

Termoplastikler, termosetlerden farklı olarak sıcaklık etkisiyle moleküller arası bağ kuvvetleri zayıflatılarak yeniden şekillendirilebilen polimerlerdir. Termoplastiklere örnek olarak; polietilen, polistiren, polivinil klorür (PVC) ve polipropilenler verilebilir.

Termoplastiklerde çapraz bağlanma gözlenmezken zincirleri arasında doğrusal ve dallanmış yapılar gözlenir. Kullanım alanları olarak; plastik bardaklar, poşetler, oyuncaklar, kalem gövdeleri, gözlük çerçevesi, vb. ürünler sayılabilir [6], [19].

CTP'ler polimer matrisli kompozitlerin en bilinen örneklerindedir. Cam elyaf takviyeli polyester kompozitlerde cam elyafının başlıca kullanım sebeplerinden birkaçı aşağıda verilmiştir:

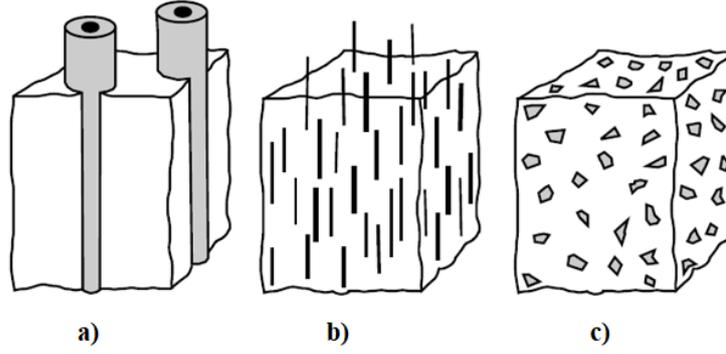
- Eriyik halden yüksek mukavemetli elyaflara kolayca çekilebilir.
- Kolay ulaşılabilir ve ekonomik bir malzemedir.
- Elyaf olarak mekanik özellikleri iyidir ve reçine içerisinde yer alarak kompozit üretildiğinde, üretilen kompozit yüksek bir özgül mukavemete sahip olur.

CTP'ler kompozit malzemeler arasında ilk geliştirilen ve uygulanan malzemelerden bir tanesidir. 1940'lı yıllarda Amerikalılar cam elyaf ve polyesteri kullanarak el yatırması ile askeri radar ve uçak yakıt deposu üretimi gerçekleştirmiş ve o zamandan beri askeri alanda ve havacılıkta önemli bir mühendislik malzemesi haline gelmiştir [11].

2.1.2.2. Metal Matrisli Kompozitler

Metal matrisli kompozitler; bir takviye fazının (elyaf ya da parçacık şeklinde olabilir) içerisine dağıldığı metal veya metal alaşımı matris ile birlikteliğinden oluşmaktadır. Metal matrisli kompozitlerin üretiminde toz metalürjisi, sıkıştırılmalı ve karıştırılmalı döküm gibi yöntemler kullanılmaktadır [11].

Üretimde çok çeşitli bileşimlerde alüminyum alaşımları matris malzemesi olarak geniş bir kullanım alanına sahiptir. Örnek olarak güç iletim hatlarındaki Al_2O_3 (alümina) fiber takviyeli alüminyum matrisli kompozitler ve otomotiv, ısıl uygulamalarda kullanılan SiC partikül takviyeli alüminyum matrisli kompozitler verilebilir. Metal matrisli kompozitler takviye elemanlarının tipine göre üç grupta incelenebilir. Bunlar; partikül takviyeli metal matrisli kompozitler, kısa fiber veya visker takviyeli metal matrisli kompozitler ve sürekli fiber veya tabaka takviyeli metal matrisli kompozitlerdir. Şekil 2.15'te şematik olarak üç grup metal matrisli kompozitler gösterilmiştir [20].



Şekil 2.15. Takviye elemanı tipine göre metal matrisli kompozitler.

Metal matrisli kompozitler diğer malzemelere oranla; düşük yoğunluk, yeniden üretilebilir içyapı, yüksek mukavemet ve esneklik modülü, yüksek tokluk ve darbeye dayanıklılık, yüksek yüzey sertliği, yüzey çatlamasına karşı düşük hassasiyet, sıcaklık değişimine karşı düşük hassasiyet, yüksek ısıl iletkenlik gibi özellikleri ile önemli bir avantaja sahiptir. Diğer bir yandan metal matrisli kompozitlerin bazı sınırlayıcı özellikleri de mevcuttur. Bunlar; sürekli fiber takviyesi olduğu durumda kompozit üretiminin zahmetli ve karmaşık sürece sahip olması, metallere oranla sünekliklerinin düşük olması ve üretimde daha yüksek maliyetli üretim sistemlerine ihtiyaç duyulması olarak sayılabilir [21].

2.1.2.3. Seramik Matrisli Kompozitler

Seramik matrisli kompozitler $Li_2O_2-Al_2O_3-SiO_2$, SiO_2 ve SiC gibi seramik matrislerin bir takviye elemanı ile birleşimi sonucu oluşturulmaktadır. Takviye olarak ise Al_2O_3 , SiC gibi malzemeler kullanılmaktadır. Seramik matrisli kompozitler özellikle havacılık, nükleer ve otomotiv sektöründe artan bir kullanım alanına sahiptir.

Seramik matrisli kompozitler; kimyasal inertlik, yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılık, düşük yoğunluk, hafiflik, sertlik gibi özellikleri ile tercih edilebilen malzemelerdendir. Ancak oldukça gevrek malzemeler olarak bilinirler.

Seramikler içerisinde bulundurdukları boşluk yapısından kaynaklı olarak kolaylıkla kırılırlar. Bu özellikleri sebebiyle içerisine bağlayıcılar ilave edilerek hem boşluğu doldurma hem de matris ile takviye liflerinin ara yüzünde bir tabaka oluşturma görevi üstlenirler [22], [23].

2.2. KOMPOZİT MALZEME ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Genel olarak kompozit üretim yöntemleri kullanılarak nihai ürün elde edebilmek için iki ana malzeme gerekmektedir. Bunlar matris ve takviye malzemesidir. Kompozit üretimi gerçekleştirilirken aşağıdaki unsurlara önem verilmelidir.

- Matris ve takviye kısmı arasındaki bağlanmanın iyi olması
- Elyafların doğru yönlendirilmesi
- Hacim bakımından uygun miktarda elyaf bulunması
- Elyafların matris içersinde homojen dağılımı
- Boşluk ve kusurun minimum düzeyde olması
- İyi bir boyut kontrolü

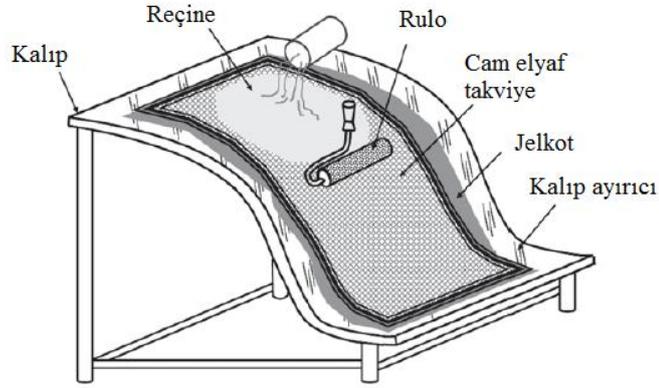
Kompozitte özellikle elyafların homojen dağılmaması yüklenme altında kırılmayı kolaylaştırır. Kompozit malzemeler istenen amaca yönelik farklı prosesler yardımıyla üretilmektedir. Bu prosesler arasında; el yatırması, otoklav, elyaf sarma, profil çekme – pultrüzyon, reçine transfer kalıplama (RTM), püskürtme (Spray-up) ve vakum torbalama yöntemleri sayılabilir. Bu bölümde kompozit üretim yöntemleri ayrıntılı bir şekilde tanımlanmıştır [24].

Bir kompozit ürünün elde edilme sürecinden önce hangi üretim yöntemine dayanılarak üretiminin yapılacağı önemli bir konudur. Bu süreci doğru yönetebilmek için üretimle ilgili bazı özelliklerin bilinmesi gereklidir. Bunlar; üretim sıklığı, maliyet, boyut, şekil vb. özelliklerdir. Bu özellikler yardımıyla malzeme için en uygun üretim yöntemi seçilebilir.

2.2.1. El yatırması yöntemi

Bu yöntem, düşük maliyetli ve az sayıda ürünün üretiminde, yoğun işçilik gerektirmeyen durumlarda kullanılmaktadır. Bu üretim yönteminde en yaygın kullanılan malzemeler cam elyaf ve polyester reçinedir. Yöntem temel olarak oda sıcaklığında sertleşen reçine kullanılarak tek taraflı olarak kalıba sürülme biçimindedir. Takviye kısmı dokuma kumaş olabildiği gibi kırılmış elyaf da olabilmektedir. Şekil 2.16'da el yatırma yöntemi şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemde genellikle cam elyaf takviyeli plastikten yapılmış kalıplar kullanılır. Kalıp yüzeyinin kullanım öncesi pürüzsüz olmasına özen gösterilir. Matris reçinesi uygun sertleştirici ve hızlandırıcı ilavesi ile oda sıcaklığında karıştırıldıktan sonra kalıp ayırıcı sürülmüş kalıba elyaf

sonrası bir miktar koyularak emdirilir. Bu işlemde elyaf ile matrisin iyi karışması önemlidir. Daha sonra bir fırça ya da rulo yardımıyla reçine iyice sürülür. Bu işlem istenen kalınlığa gelene kadar her bir tabaka için tekrarlanır [24]. Şekil 2.17’de el yatırması ile üretilen bir ürünün görseli verilmiştir [25].



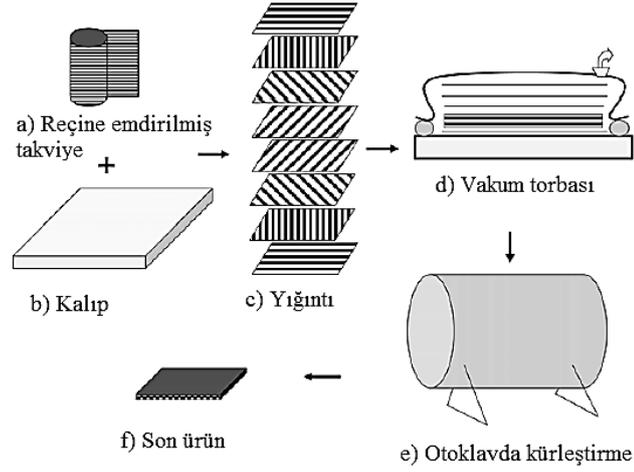
Şekil 2.16. El yatırması yöntemi şematik gösterimi.



Şekil 2.17. El yatırması yöntemi ile ilgili bir görsel.

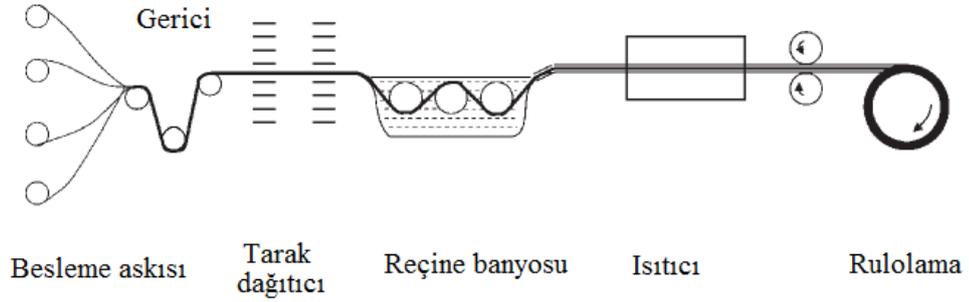
2.2.2. Otoklav yöntemi

Diğer yöntemlere nazaran daha pahalı bir yöntem olan otoklav yöntemi havacılık sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Önemli miktarda zaman gerektirir. Yüksek kalitede kompozit üretimi için uygundur. Otoklav işleminin ana adımları Şekil 2.18’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Otoklav üretim prosesinin ana adımları.

İlk adımda kısmen sertleştirilen reçine ile elyaflar birleştirilerek ön emdirme gerçekleştirilir. Ön emdirme işlemi Şekil 2.19’da şematik olarak görülmektedir.



Şekil 2.19. Ön emdirme işlemi.

Ön emdirme işlemi sırasında kuru elyaflar tarak dağıtıcılar yardımıyla beslenerek reçine banyosuna girerek ıslanırlar. Daha sonra elyaf/reçine kombinasyonu ısıtılarak reçine kısmen sertleştirilir. Ön emdirme sonrası ısıtılarak elde edilen ürüne ön reçine emdirilmiş elyaf denilmektedir. Daha sonra rulo haline getirilerek depolanırlar. Kullanım sırasında ise buldukları dondurucudan alınarak birkaç saat oda koşullarına bırakılırlar. Oda sıcaklığında yumuşamaya başladıklarında istenilen ölçüde kesilirler. Uygulamada kullanılan bir örnek Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Karbon fiber / epoksi reçine prepreg örneği.

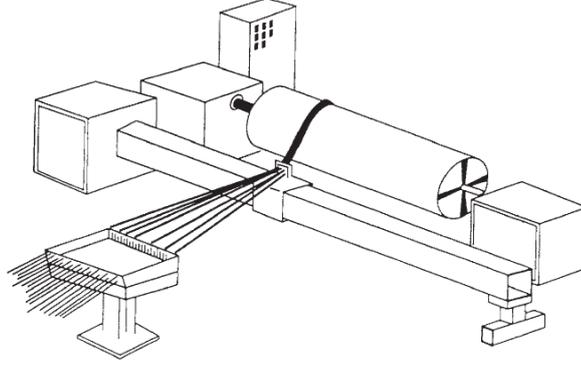
Hazırlanan örnekler vakum torbasına yerleştirilerek otoklav fırınına yerleştirilir. Gelişmiş kompozitler 180 °C' de 600 kPa basınçta sertleştirilmektedir. Otoklav fırınında iç basınç ve sıcaklık kontrol edilebilen basınçlı kap şeklinde tasarlanmıştır. Şekil 2.21'de endüstriyel otoklav örneği verilmiştir.



Şekil 2.21. Otoklav prosesi görseli.

2.2.3. Elyaf Sarma yöntemi

Bu yöntem özel biçime sahip ürün elde etmek amacıyla kullanılmaktadır. Kısaca, elyaflar otoklav prosesindeki gibi reçine ile ıslandıktan sonra bir makaradan geçirilerek dönen bir kalıba sarılırlar. Ürün sertleştikten sonra kalıptan ayrılır. Bu yöntem özellikle silindirik boru imalatında, depolama tankı ve basınçlı tank gibi içi boş kapların üretiminde kullanılır. Şematik olarak elyaf sarma makinesi Şekil 2.22'de gösterilmiştir [15].



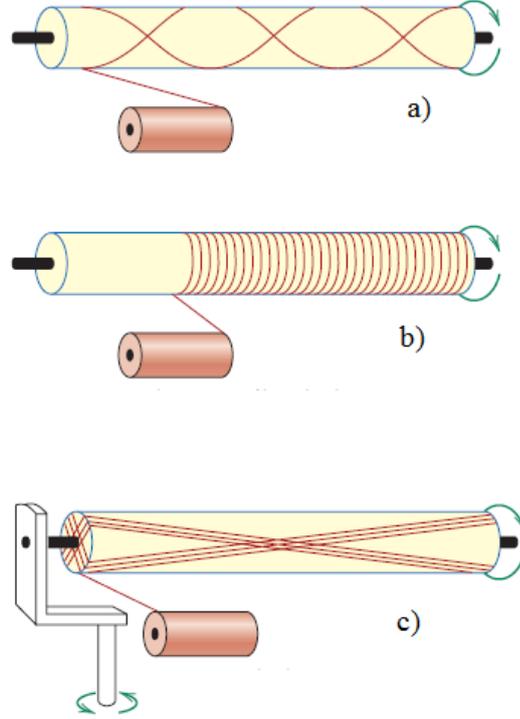
Şekil 2.22. Elyaf sarma makinesi şematik gösterimi.

Sürekli elyaf sarma yöntemini kullanarak CTP boru üretimi gerçekleştiren bir firmanın üretim prosesine ait bir görsel ise Şekil 2.23’de sunulmuştur [26].



Şekil 2.23. Sanayide kullanılan elyaf sarma sistemi örneği.

Sarma işlemi farklı şekillerde gerçekleştirilebilir. Bunlar polar, helisel ve çevresel sarımdır. Şekil 2.24’te sarma şekilleri şematik olarak gösterilmiştir [11].

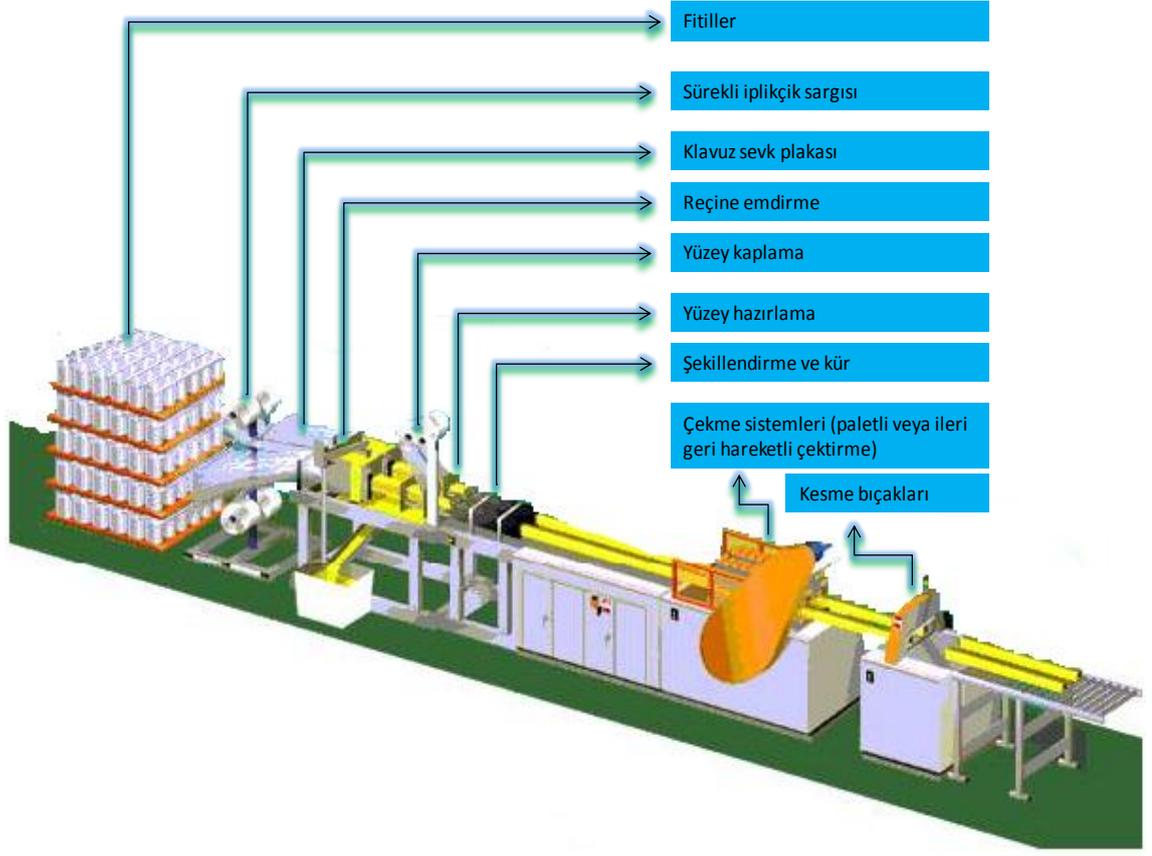


Şekil 2.24. Elyaf sarma şekilleri. a) Helisel b) Çevresel c) Polar

Polar sarma uçtan uca sarma olup, genellikle basınçlı kap üretiminde kullanılır. Helisel sarmada mandrel (çelik sacın sarıldığı mekanizma) sabit hızda dönerken elyaf kaynağı helisel açı verecek şekilde hareket eder. Çevresel sarmada, elyaf ve mandrel arasında 90° 'lik bir açı vardır.

2.2.4. Profil Çekme –Pultrüzyon yöntemi

Profil çekme yöntemi, düşük maliyetli, yüksek hacimli ürünü hızlı bir üretim ile elde etmek amacıyla kullanılabilir. Boru ve içi boş basınçlı kap ve aynı zamanda tabela direği, kiriş, panel ve petrol sondaj kuleleri yapımında kullanılırlar. Şekil 2.25'te profil çekme yöntemi ile üretim aşamaları görülmektedir.



Şekil 2.25. Profil çekme makinesi şematik gösterimi [27].

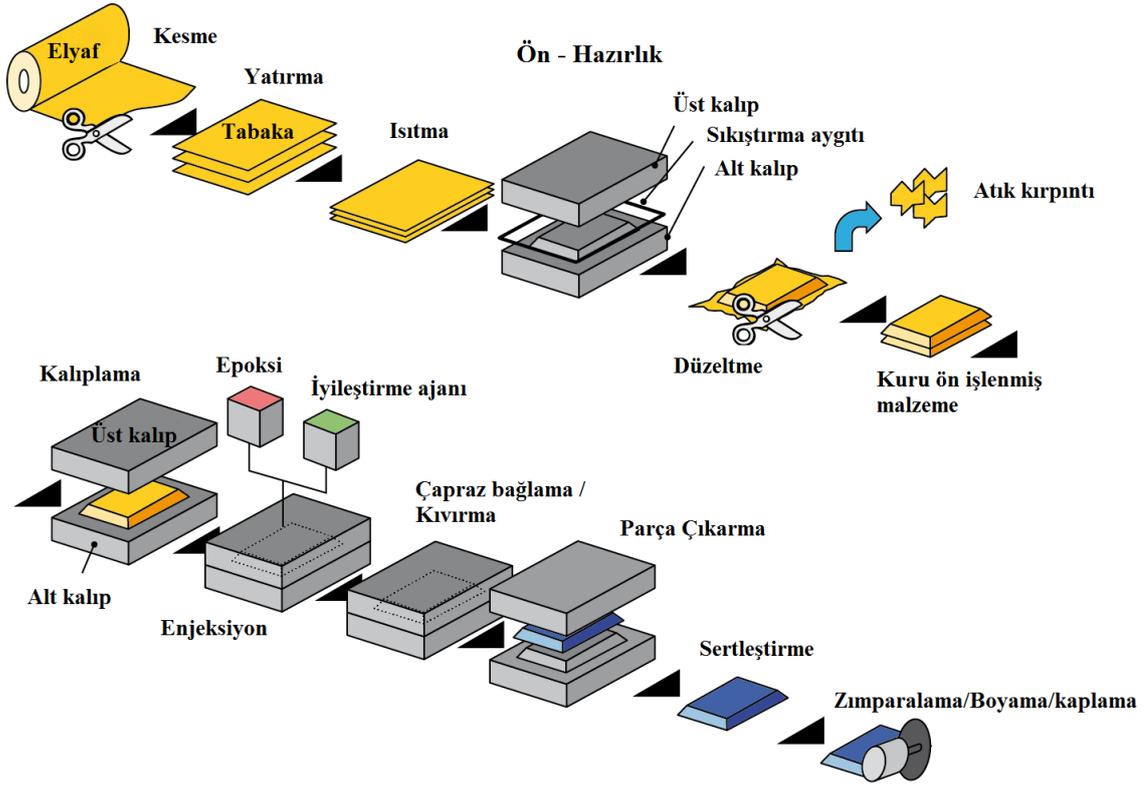
Profil çekme yönteminde, malzeme kalıp boyunca çekilerek üretilir. Profil hattında çalışma şeklinde makineden ayrı bir bölümde bulunan elyaflar bobinler yardımıyla çekilir. Bu elyaflar öncelikle reçine içerisinden geçer ve daha sonra içerisindeki hava ve fazla reçineden arındırılır. Arındırma işlemi sonrası dış etmenlerden korunması amacıyla yüzeyi kalıba girmeden önce kaplanır. Kalıptan sonra profiller paletlerle çekilerek sistemde süreklilik sağlanır ve istenen uzunluk sağlandığında bıçaklar yardımıyla kesme işlemi gerçekleştirilir [28].

2.2.5. Reçine Transfer Kalıplama (RTM) yöntemi

RTM, karmaşık şekillerdeki kompozit parçaların üretimi için etkili bir yöntem olmakla birlikte elle yatırmaya nazaran daha hızlı ve uzun ömürlüdür. Üretimde iki parçalı kalıp kullanılır. Takviye kısmı önceden kalıba yerleştirilir ve kalıp kapatılır. Reçine ise basınç altında kalıba pompalanır. Bu işlem fazla zaman gerektirmektedir. İçeride biriken havanın dışarıya çıkarılabilmesi için vakum kullanılabilir. Kalıp kapalı olduğu için salınan zararlı gazlar azalmaktadır [29].

Bu yöntem özellikle Formula 1 yarışlarında kullanılan araçlarda ve uçak parça

imalatında kullanılmaktadır. Şekil 2.26’da RTM Prosesi genel hatları şematik olarak verilmiştir.

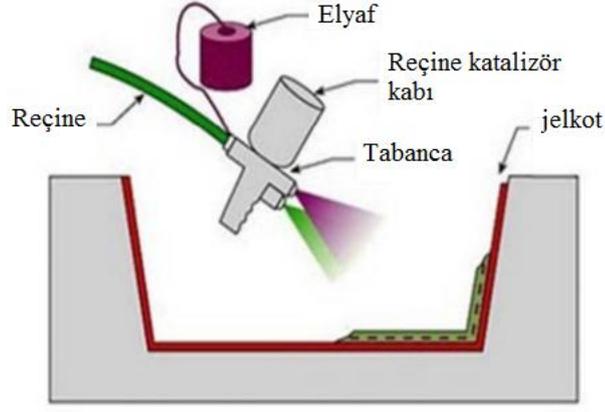


Şekil 2.26. RTM Prosesi şematik gösterimi.

2.2.6. Püskürtme (Spray-up) yöntemi

Püskürtme işlemi el yatırması işlemine benzer şekilde olup el yatırmasının tabanca vb. bir aparatla yapılan biçimi olarak kabul edilir. Bu yöntemde reçine matris basınçlı hava yardımıyla püskürtme tabancası kullanılarak püskürtülür. Elyaf da eş zamanlı olarak kesilerek hava ile püskürtülür. Püskürtme işlemi sonrası yüzey bir rulo ile düzeltilir ve ürün hazırlanır [30].

Püskürtme yöntemiyle kompozit üretimine şematik olarak Şekil 2.27’de gösterilmiş olup uygulanmasına ait bir görsel ise Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.27. Püskürtme yöntemi şematik gösterimi [31].



Şekil 2.28. Püskürtme yöntemi ile üretime ait bir görsel [32].

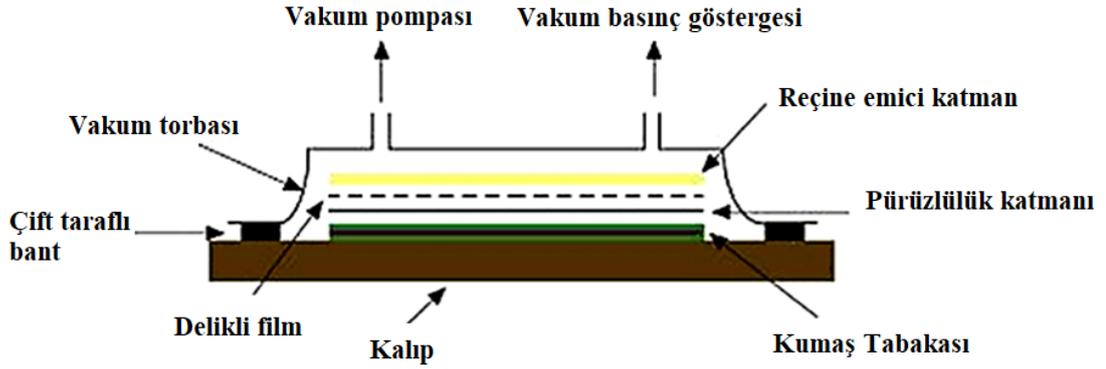
2.2.7. Vakum Torbalama

Vakum torbalama yöntemi lifli kompozit kumaş malzemenin kalıp içerisine yatırılması ve reçinenin elle kalıp içine dağıtılması sürecinden sonra vakum uygulama esasına dayanır. Vakum uygulanarak kumaş ve reçine arasındaki hava dışarı çekilir ve hava kabarcıklarından arınmış bir ürün imal edilir. Ayrıca vakum sayesinde reçinenin tüm bölgelerin içine nüfuz etmesi sağlanabilmektedir. Vakum torbalamada uygulanan adımlar aşağıda verilmiştir:

- Kalıp hazırlama – kalıp ayırıcı ve sonrasında jelkot sürülmesi
- Reçine karışımı sürülmesi
- Elyafı yatırma ve üzerine tekrar reçine sürülmesi
- Hazırlanan malzemenin üzerine pürüzlülük katmanı ve delikli naylon yerleştirilme

- Delikli naylonun üzerine de fazla reçineyi tutması ve hava çıkışını sağlaması amacı ile kumaş yerleştirme
- Kalıbın kenarlarına çift taraflı bant yapıştırma
- Vakum torbasının hava almayacak şekilde bantların üzerine doğru konulması
- Vakum hortumlarını sisteme bağlama
- Vakum pompası yardımıyla vakumlama işlemi
- Vakum kesildikten sonra kürleştirmeye bırakılması
- Kalıptan çıkarma

Vakum işlemine ait görsel Şekil 2.29'da ve örnek vakum uygulaması Şekil 2.30'da gösterilmiştir.



Şekil 2.29. Vakum torbalama yöntemi ile kompozit malzeme üretimi [33].



Şekil 2.30. Vakum torbalama yöntemi ile kompozit üretim uygulaması [34]

3. KOMPOZİT MALZEMELERDE YANMA

Çeşitli mühendislik malzemeleri çok farklı alanlarda kullanılabilirler. Kullanıldığı alanda maruz kaldıkları etkilere göre yüksek durabilite göstermesi açısından özel tasarımlarla da üretilebilen mühendislik malzemeleri çeşitli çevresel koşullar nedeniyle hasara uğrayabilmektedir. Bunun yanı sıra sürekli olmayan ve ani gelişen etkiler de malzemeleri hasara uğratarak bozunmalarına neden olabilirler. İstenmeyen ve ani şekilde ortaya çıkan durumlardan biri de yangın oluşumudur. Malzemelerin yüksek ısı ile olan ilişkisi yalnızca yangın etkisi ile değil bazı durumlarda sürekli ısı ortamlarında bulunması sonucu da olabilmektedir. Bu durum kompozit malzeme açısından ele alınacak olursa özellikle kompozitin ana matrisinin ısı ile bozunma riskinin yüksek olduğu düşünüldüğünde kompozit malzemelerin yüksek ısı veya yangın etkisindeki davranışını geliştirmek için yapılacak çalışmalar çok önemli bir araştırma alanı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu bölümde yanma mekanizması, polimerlerde yanma etkisi, yanma etkisine maruz polimerlerde alev almayı geciktirici malzeme kullanımı konuları genel olarak tanımlanmıştır.

3.1. YANMA MEKANİZMASI

Yanma olayı; ısı, oksijen ve yakıt kaynağının bir araya gelerek gerçekleştirdiği katalitik ekzotermik bir reaksiyon olarak tanımlanabilir. Isı artışının etkisiyle başlayan yanma olayında atmosferdeki oksijenin de etkisi büyüktür. Yanma oluşması için öncelikle alevlenmenin başlaması gerekmektedir [6].

Alev gaz fazlı bir yanma işlemidir. İki şekilde oluşabilir. İlki; gaz yakıt ve oksijenin yanma öncesi karıştırılması işlemidir. Örnek olarak bunzen beki ve evlerde kullanılan pişirme ocaklarının alevleri verilebilir. İkincisi ise yanma için gerekli oksijenin atmosferdeki gaz karışımına yayılarak oluşturduğu difüzyon alevidir. Buna en iyi örnek mum alevi verilebilir. Alevden çıkan ısı mumu fitil boyunca eritir ve yüzeyinde 600-800 °C sıcaklıklarda pirolize edilir [35].

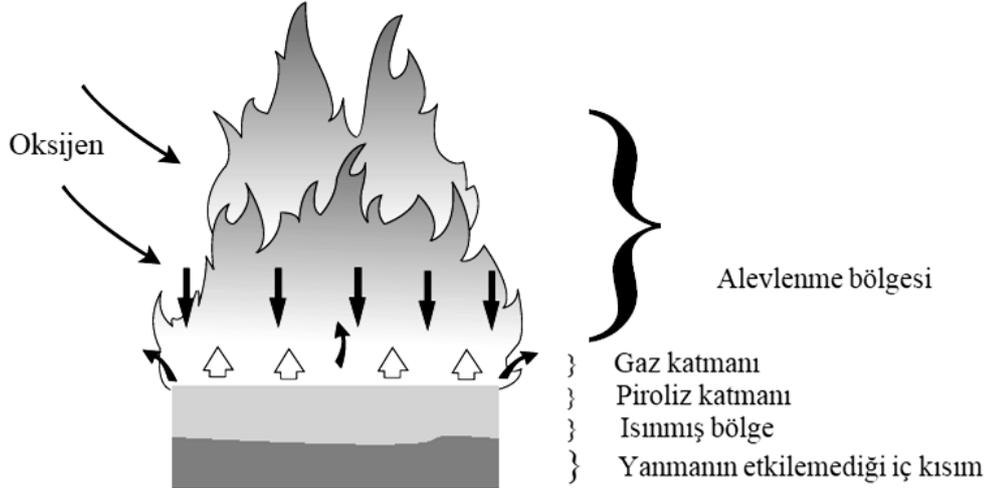
3.2. POLİMERLERDE YANMA ETKİSİ

Doğal ve sentetik polimerler yeterli bir ısı kaynağına maruz bırakıldıklarında yanma eğilimi gösterirler. Çizelge 3.1’de bazı polimerlerin bozunma sıcaklık aralıkları verilmiştir.

Çizelge 3.1. Bazı polimerlerin bozunma ve tutuşma sıcaklıkları.

Polimer	Bozunma Aralığı (°C)	Tutuşma Sıcaklığı (°C)	Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı (°C)	$\Delta H_c/kJkg^{-1}$
LDPE	340–440	340	350	46.5
Polipropilen	330–410	350-370	390-410	46.0
Polistiren	300–400	345-360	490	42.0
PVC (katı)	200–300	390	455	20.0
PMMA	170–300	450	450	26.0
Selüloz	280–380	210	400	17.0

Yanma olayı gerçekleşirken polimer direkt olarak yanma olayını tetikleyen yakıt görevi görür. Yanma olayı üç aşamada incelenirse bunlar; polimerik malzemenin ısınmaya başlaması, ısı etkisi ile bozunması ve bozunma sonucu oluşan yanıcı gazların malzemeyi tutuşturmaya başlamasıdır. Yanma mekanizması şematik olarak Şekil 3.1’de detaylandırılmıştır.



Şekil 3.1. Yanma Mekanizması.

Şekil 3.1’de görüldüğü üzere malzemenin en iç kısmı yanmadan etkilenmeyen kısım olarak adlandırılabilir ve bunu sırasıyla ısınmış bölge ve piroliz katmanı izlemektedir. Isıdan etkilenmeyen iç kısmın üst bölgesi ısınan ama yanmanın tam olarak gözlemlenmediği bölgedir. Daha sonraki bölgede ise ısının etkileri gözlenir ve

bozunmuş atıkların (kurum vb.) bulunduğu piroliz katmanını yer almaktadır. Malzemenin haricinde yanmanın başladığı noktanın bir üst kısmı gaz katmanını olarak söylenebilir. Bu bölgede bulunan yanıcı gazlar havadaki oksijenin varlığı ile alevlenme bölgesinde yanarlar ve en dış katman yanma ürünleri bölgesine doğru ilerlerler [6].

Polimerlerin yanma işlemine ait evreler Şekil 3.2’de görülen diyagram üzerinde verilmiştir. Diyagramda özetlendiği gibi yanmayı başlatan üç temel aşama ısıtma, termal ayrışma-piroliz ve ateşlemedir. Polimerin sıcaklığı termal geri dönüş ile yükselmektedir [35].



Şekil 3.2. Polimer yanma aşamaları.

3.3. POLİMERLERDE KULLANILAN ALEV GECİKTİRİCİLER

Günlük hayatta halılardan plastik sandalyelere, giyeceklerden koltuklara kadar her yerde karşımıza çıkan polimerlerin yanma özelliklerinden dolayı geliştirilen bazı alevlenmeyi geciktirici malzemeler yanmanın etkisini azaltıcı etkisi yaratması açısından kullanılmaktadır. Alev geciktiricilerden istenen ilk özellikler; alev geciktirme yeteneğine sahip olması ve içine eklendiği malzemenin diğer özelliklerine zarar vermeden bu özelliğini kullanmasıdır. Bu nedenle doğru tercih edilmiş bir alev geciktiricinin uygun miktarda kullanımı önemlidir [36].

Alevlenmeyi geciktiriciler yanmayı fiziksel, kimyasal veya her iki alanda birden etkileyebilirler. Fiziksel etkiler arasında soğutma ve koruyucu katman oluşturma ile seyreltme sayılabilir. Bunlardan soğutma etkisi, alevlenmeyi geciktiricilerin oluşturacakları endotermik tepkimeler ile yanma için gerekli sıcaklığı düşürücü etkidir. Koruyucu katman oluşturmada alevlenmeyi geciktiriciler, yanma bölgesi üzerinde gaz tabakası oluşturarak bu bölgeye oksijen girişini engeller ve oksijen varlığının azalması

ile yanıcı gazların çıkışı azalır. Seyreltme etkisinde ise kompozit karışımına yanıcı etkisi olmayan katkı maddeleri katılarak alev etkisine maruz kalan kompozitin gaz fazındaki yanıcı madde derişimi düşürülür ve tutuşma sınırını geçmesi engellenir.

Alevlenmeyi geciktirici malzemelerin kimyasal etkileri ise katı ve gaz fazında yaptıkları tepkimeler ile gözlenir. Gaz fazında, alev geciktiriciler ekzotermik radikalik yanma tepkimelerini durdurucu etkileri ile sistemi soğuturlar ve bununla birlikte yanıcı gaz üretimi azalarak zamanla durma eğilimi gösterir. Katı fazda yarattıkları etkiye bakılacak olursa ilk olarak alevlenmeyi geciktiriciler polimerin yanmasını hızlandırır ve kısa sürede yanma için gerekli yakıt miktarını azaltırlar. Diğer bir etkileri ise katının yüzeyinde çapraz bağlı polimer oluşumu ile yanıcı olmayan bir tabaka oluşturmalarıdır. Alevlenmeyi geciktiricilerin yanmayı birden çok aşamada etkilediği bilindiğinden bir malzemenin yanma aşamasında gerçekleşen tepkimelerin tamamı çoğu zaman açıklanamaz.

Alevlenmeyi geciktirici olarak kullanılan kimyasallar, yanmayı önleyen veya geciktiren malzemelerdir. Yanma olayının aşamalarından yanıcı maddenin ısınması, bozunması, tutuşması ve alevin büyümesi adımlarından birisinde etki ederler ve yanma için gerekli olan ısı, oksijen ve yakıt faktörlerinden birisini ve birkaçını ortadan kaldırarak ya da sınırlayarak yanmayı durdurur veya yavaşlatırlar [6].

Alev geciktirici kimyasallar normal katkı ve reaktif katkı olarak iki grupta incelenebilir. Bu gruplar içerisindeki normal katkılar polimerizasyon aşamasında veya sonrasında ilave edilir. Günümüzde en çok tercih edilen katkılar normal katkı malzemeleridir. Reaktif katkılarda ise katkılar polimerleşmenin bir parçasıdır ve polimer omurgasına kimyasal olarak bağlanmaktadır. Her bir alev geciktirici kimyasal, malzemeye üç mekanizmadan biri üzerinden etki eder. Bunlar; gaz fazlı tepkimeyle yaptığı etki, endotermik davranış ile yaptığı etki ve kömür oluşturarak yaptığı etkidir. Gaz fazda etki eden alev geciktiricilere örnek halojenli ve fosforlu yapılar verilebilir. Endotermik alev geciktiriciler yanma esnasında yanıcı olmayan gazları (H₂O, CO₂) serbest bırakarak gaz fazında ve yoğunlaşma fazında seyreltme işlevi görürler.

3.3.1. Halojenli Alev Geciktiriciler

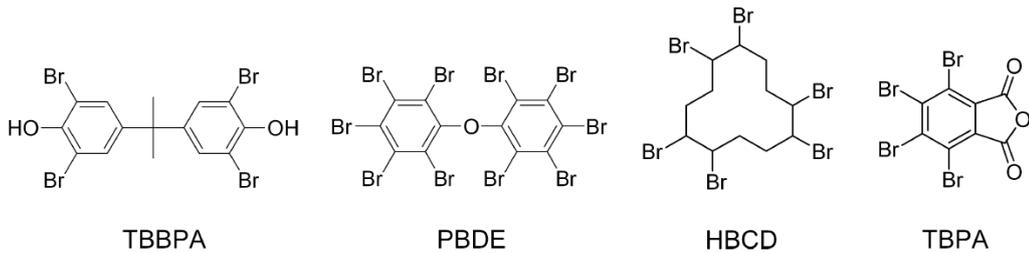
Halojenli alev geciktiriciler yapılarında brom, klor gibi halojenler bulundurur. Halojenin türüne göre yanmaya olan etkisi değişmektedir. Halojen olarak florür ve iyodür

kullanılmaz; nedeni ise polimerin yanmasına etkileri bulunmadığıdır [37]. Yanma üzerine halojenli alev geciktiricilerin temel etkileri radikalleri yok etmeleridir. Yanma esnasında polimerler oldukça reaktif H ve OH gibi serbest türler açığa çıkarılırlar. Halojenli alev geciktiriciler ise bu türler ile reaksiyona girerek polimerin yanmasını durdurabilirler.

Radikallerin polimerle tepkimeye girerek daha yanıcı küçük moleküllere ayrılmasını ve bu nedenle yanma için gerekli yakıtın oluşumunu engellemektedirler. Radikalleri yok ederler ve radikallerin polimerle tepkimeye girip daha yanıcı küçük moleküllere parçalanmasını dolayısıyla yanma için gerekli yakıt (küçük moleküller) oluşumunu engellerler. Alev üzerinde yanmayan gazlardan oluşan bir örtü oluşturarak oksijenin yanma bölgesine girmesi engellenir. Alevlenmeyi geciktiricinin parçalanması endotermik olduğu için aynı zamanda soğutucu etkisi vardır ve ısıyı yok eder. Halojenli bir bileşiğin yanma esnasındaki durumları aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.



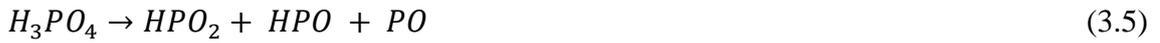
Halojen içeren alev geciktiriciler halojenür radikalleri verecek şekilde bozunurlar ve halojenür radikalleri, radikal zincir tepkimelerine karışarak serbest radikal tutucu gibi davranır ve yanma sırasında oluşabilecek H, HO türü radikallerle tepkimeye girerler. Halojenli alev geciktiricilere örnek olarak Şekil 3.3'teki kimyasal formülü verilen bileşikler verilebilir [37].



Şekil 3.3. Halojenli alev geciktirici türlerinin kimyasal yapıları.

3.3.2. Fosforlu Alev Geciktiriciler

Fosforlu alev geciktiriciler içerisinde fosfor bulunduran organik ve inorganik yapıdaki bileşiklerdir. Fosforlu alev geciktiriciler yüzey üzerinde yanmayan bir katman oluşturmaları temel özelliklerindedir. Bu katman polimer yüzeyi üzerindeki yama bölgesine oksijen girmesini engeller. Ayrıca yanma ile açığa çıkan ısıyı absorplayarak yanmanın durmasına yardım ederler. Sıcaklık altında fosforlu alev geciktiricilerin uğradığı değişiklikler aşağıdaki denklemlerde verilmektedir.



Fosforlu alev geciktiricilere örnek olarak fosfatlar, fosfonatlar, fosfinatlar, fosfin oksitler, fosfatlar ve kırmızı fosfor verilebilir.

3.3.3. Hidrat Sulu Alev Geciktiriciler

Hidrat sulu alev geciktiriciler yapısında su grubu bulunduran inorganik bileşikler olarak verilmektedir. Sıcaklık arttıkça bu su grubu bileşikten ayrılarak soğutma etkisi ile yanmayı azaltıcı etki yapmaktadır. En sık kullanılan hidrat sulu alev geciktiriciler alüminyum hidroksit ($Al(OH)_3$) ve magnezyum hidroksittir ($Mg(OH)_2$). Aynı zamanda ayrılan su grubu ile ortaya çıkan metal oksitler de ısı absorpsiyonu yapmaktadır. Alüminyum hidroksitin $350\text{ }^\circ\text{C}$ ' de ve magnezyum hidroksitin $450\text{ }^\circ\text{C}$ ' de uğradıkları değişiklikler aşağıdaki denklemlerde verilmektedir.



Çalışma kapsamında kullanılan alev geciktiriciler inorganik bazlı olup yapılarında su grubu bulundurmaktadır. Bu bileşikler ve uğradığı değişiklik aşağıda Çizelge 3.2'de özetlenmiştir.

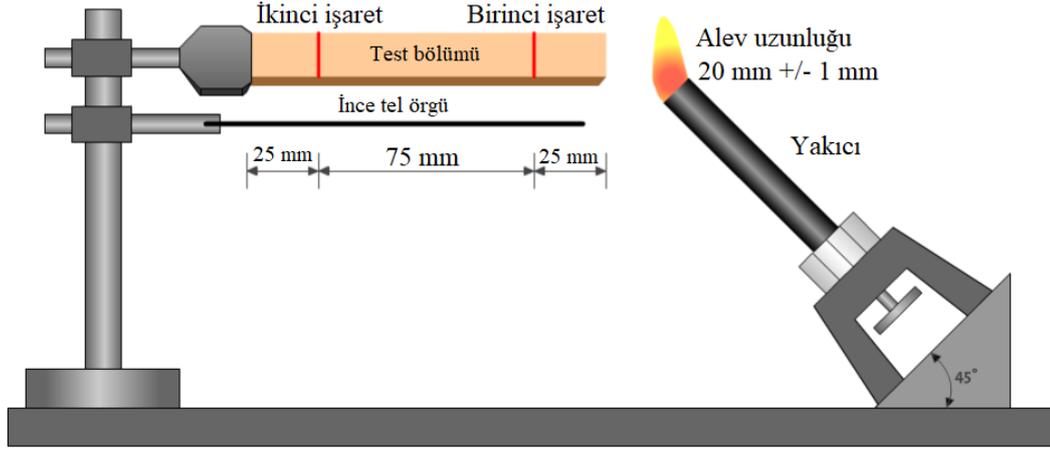
Çizelge 3.2. Sıcaklık altında alev geciktiricilerin uğradığı değişimler.

Katkı Bileşikleri	Yanma sırasındaki Reaksiyonları		
	Sıcaklık (°C)	Reaksiyon	Bağlı su
Sepiyolit	20 – 200	$\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 - 8\text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 + 8\text{H}_2\text{O}$	Higroskopik ve Zeolitik
	200 – 400	$\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_4 \Rightarrow \text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	Zayıf bağlı kristal
	400 – 600	$\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4(\text{H}_2\text{O})_2 \Rightarrow \text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	Güçlü kristal
	600 – 875	$\text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30}(\text{OH})_4 \Rightarrow \text{Si}_{12}\text{Mg}_8\text{O}_{30} + 2\text{H}_2\text{O}$	Faz dönüşümü
Alüminyum Hidroksit	200	$2 \text{Al}(\text{OH})_3 \Rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	
Antimon Trioksit		$\text{SbO} + 2\text{HX} \Rightarrow 2\text{SbOX} + \text{H}_2\text{O}$ X: F, Cl, Br, I	
Çinko Borat		$2\text{ZnO} \cdot 3\text{BrO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{ZnOB}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$	

3.4. POLİMERLERDE YANMA DİRENCİ TESTLERİ

3.4.1. ASTM D-635 – Yatay Yanma Testi

Bu standart plastik levhalardan kesilerek veya kalıplanma ile üretilen çubuk şeklindeki deney parçalarının yatay durumdaki yanma hızı veya yanma süresi ve yanma miktarının küçük ölçekte laboratuvarında tayinini kapsamaktadır. Standardın ana amacı kontrollü koşullardaki ürünlerin ve malzemelerin ısı düzeneklerindeki tepkisini ve yanıtını ölçmek içindir. Test örnekleri 125 ± 5 mm uzunluğunda, $13,0 \pm 0,5$ mm genişliğinde olmalı ve minimum kalınlık $3,0 (-0,0 +0,2)$ mm olmalıdır. Bu şekilde en az 10 çubuk örnek hazırlanır. Daha sonra her bir örnek iki dik çizgi ile 25 ± 1 ve 100 ± 1 mm sondan ölçülerek uzunlamasına işaretlenir. Yanma testi kapalı bir bölmede ya da laboratuvar çeker ocağında yapılır. Yöntemin uygulama aşamasına gelindiğinde ilk olarak test edilecek yatay çubuk numunelerinin 25 mm referans işaretinden en uzaktaki ucu destek elemanına bir uçtan desteklenir. Yatay tel bez örneğin altına Şekil 3.4'te görüldüğü gibi sıkıştırılır. Çubuğun serbest ucu 30 saniye gaz alevine maruz bırakılır. Zaman ve yanma derecesi ölçülür ve eğer numune 100 mm kadar yanmadıysa rapor edilir. Eğer yanan ucundan 100 mm işareti kadar yanarsa ortalama yanma hızı rapor edilir [38].



Şekil 3.4. ASTM D-635 yanma test gösterimi.

Deney aşaması sonlandığında ilk olarak doğrusal yanma hızı aşağıdaki Denklem 3.12’ den bulunur. V , doğrusal yanma hızını ifade etmekte olup ve her bir örnek için alevin 100 mm referans örneğine ulaşma anındaki uzunluktur.

$$V = 60L/t \quad (3.12)$$

Doğrusal yanma hızı bulunduğunda yukarıdaki eşitlikten bulunduktan sonra aşağıdaki Çizelge 3.3.’ten uygun olduğu yanma sınıfı belirlenir.

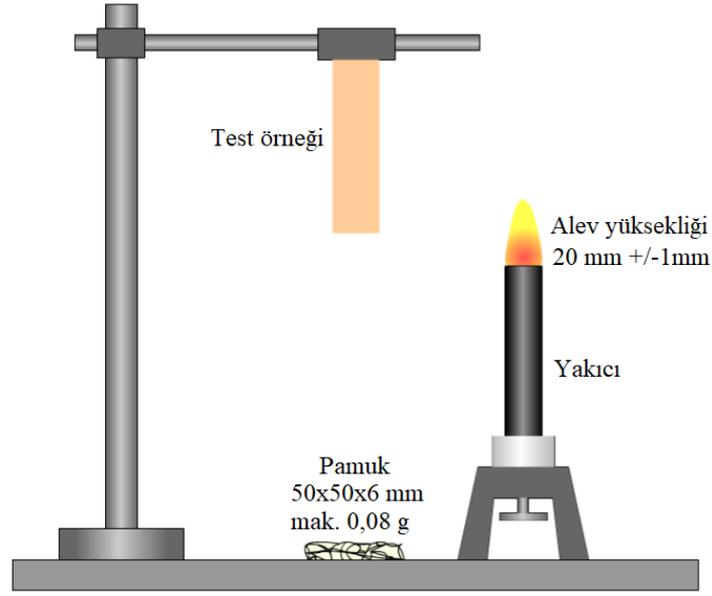
Çizelge 3.3. ASTM D-635 yanma sınıfı belirleme.

Ölçüt Durumu	Yanma hızı, V	Yanma Sınıfı
Test örneği kalınlığı (3-13 mm)	≤ 40 mm / min	HB
Test örneği kalınlığı < 3 mm	≤ 75 mm / min	HB
Alev ilk işaretten önce sönmeye durumu	$= 0$ mm/min	HB

3.4.2. ASTM D-3801 – Dikey Yanma Testi

Bu standart, dikey pozisyonda tutulan katı plastik örneklerin yanma karakteristiğini tayin etmek amacıyla uygulanan küçük ölçekli laboratuvar prosedürünü kapsamaktadır. Test örnekleri $13,0 \pm 0,5$ ile 125 ± 5 mm olmalıdır. Bu test metodunda 13 mm’ den kalın olan malzemeler test edilemez. Yüzeyler pürüzsüz ve kırılmamış olmalıdır. Köşe yarıçapı 1,3 mm’ yi geçmemelidir.

Yöntemde ilk olarak örneğin uzunluğunun 6 mm kadarı eksene dik bir şekilde sıkıştırılır. Şekil 3.5’te testin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.5. Dikey yanma testi (V-0 V-1 ve V-2 sınıflandırma için).

İlk alev uygulaması ($10.0 \pm 0,5$ s) sonrası alev süresi ölçülür (t_1). Örnekteki alev, ilk uygulama sonrası söndüğü zaman hemen ikinci uygulamaya geçilir. İkinci uygulama sonrası da alev süresi ve yanma süreleri kayıt edilir (t_2) ve (t_3). Örnekten düşen herhangi bir parça varsa yanma sırasında not edilir. Eğer örnekten damlalar oluşuyorsa ya da malzeme uygulama sırasında yanıyor alev 45° açı ile eğilir. Uygulama sonrası not edilen sürelerden (t_f , $t_{1,i}$, $t_{2,i}$; toplam yanma süresi, ilk uygulama sonrası yanma süresi, ikinci uygulama sonrası yanma süresi) hareketle Çizelge 3.4'ten uygun yanma sınıfları belirlenir.

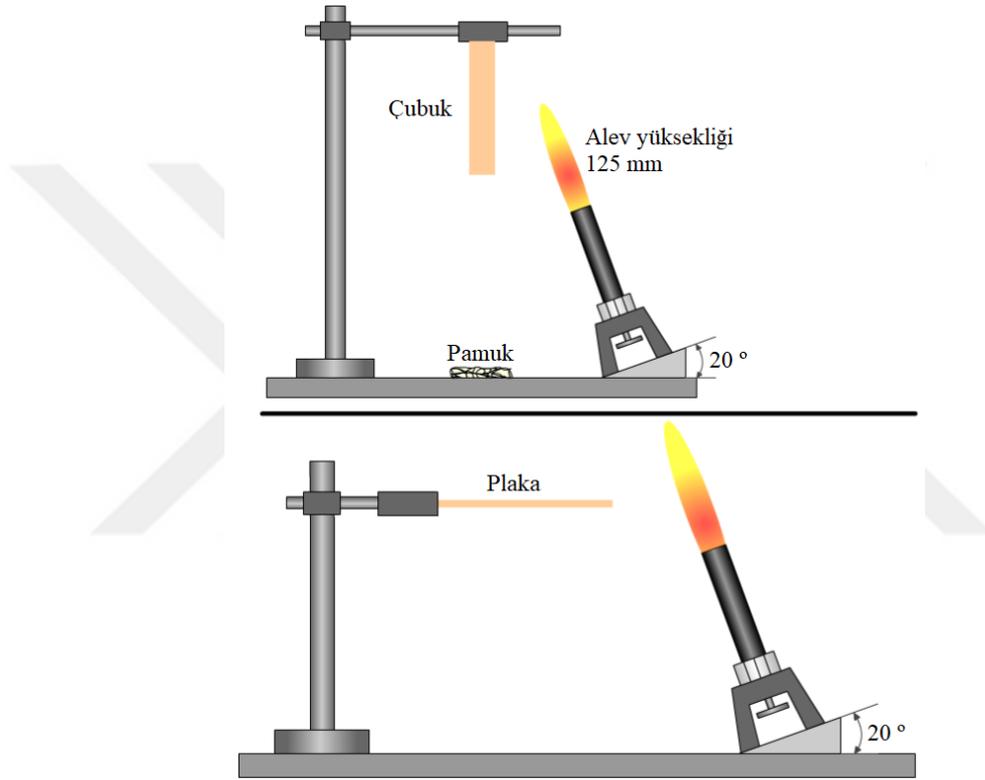
Çizelge 3.4. ASTM D3801 – Dikey yanma testi ile yanma sınıfı belirleme.

Ölçüt Durumu	V-0	V-1	V-2
Her bir örneğin yanma süreleri	≤ 10 s	≤ 30 s	≤ 30 s
Toplam yanma süreleri	≤ 50 s	≤ 250 s	≤ 250 s
İkinci uygulama sonrası yanma ve tutuşma süreleri (t_2+t_3)	≤ 30 s	≤ 60 s	≤ 60 s
Örneğin tamamen yanma durumu	-	-	-
Yanan örneğin pamuğa damlayıp tutuşturması	-	-	+

3.4.3. ASTM D5048 - 125 mm Alev Yüksekliği Kullanılarak Dikey Yanma Testi

Bu standart, dikey şekilde duran test çubuklarının ve yatay şekildeki test plakalarının alev direncinin ve kendini söndürme performansının ölçülmesine dayanmaktadır.

Test örnekleri $13 \pm 0,5$ mm ile 125 ± 5 mm olarak ve plaka örnekleri 150 ± 5 mm olarak kesildikten sonra uygulamaya geçilir. Uygulamada alev yüksekliği 125 mm olarak ayarlanır. Örnekler 5 saniye kadar aleve maruz bırakılır. Daha sonra alev geri çekilir ve beş saniye bekledikten sonra tekrar aleve maruz bırakılır. Beşinci uygulamadan sonra çubuk örnekleri için yanma ve tutuşma süreleri toplamı kayıt edilir. Plaka örneklerinde de alev, $20 \pm 5^\circ$ açı yapacak şekilde destek ile tutularak plakanın alt yüzeyinin merkezine 5 saniye duraksamalı olarak 5 kere ve 5 saniye olarak uygulanır. Şekil 3.6'da test örneği verilmiştir.



Şekil 3.6. ASTM D5048 Yanma testi şematik görünümü.

Alev uygulamasından sonra Çizelge 3.5'ten yanma sınıfı belirlenir [39].

Çizelge 3.5. ASTM D5048 yanma sınıfı belirleme tablosu.

Ölçüt Durumu	5VA	5VB
5 alev uygulaması sonrası çubuk örneği alevlenme ve tutuşma süresi	< 60	< 60
Pamuk parçası yandı mı? Ya da çubuktan damlalar aktı mı?	-	-
Plakalardan herhangi biri delindi mi?	-	+

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Mizuno ve diğerleri yaptıkları çalışmada, katılma polimerizasyonu ile üretilen polinorbornen (PNB) ve zeolit ilave edilen PNB'lerde yanıcılık ve termal bozunma arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Katılma polimerizasyonu ile % 70 molnorboren ve % 30 molglisidil grupları ile polimerize edilen PNB'lerin ayrıca ağırlıkça % 1, 10, 20 oranında zeolit ilaveli örnekleri de oluşturulmuştur. Katkısız örneklerde alevlenme gözlemlenmiştir. %10 ilaveli zeolit örneği ile durum değişmiş ve yanma kısıtlanmıştır. Zeolit ilavesi ile bozunmada artış ile birlikte düşük molekül ağırlıklı ürünlerde (H₂O vb.) artış sağlanmıştır. Alt alevlenme limitleri zeolitle birlikte 0.9'dan 1.3'e yükseltilmiştir. PNB'nin yanmazlık özelliğinin inert bir gaz olan H₂O ile ve düşük alevlenme limitinin artması ile geliştiği sonucuna ulaşılmıştır [40].

Zhang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, farklı yüzdelerde fosfor içeren ve 9,10-dihidro-9-okza-10-fosfafenantren-10-oksit (DOPO) grubu ile trifenilfosfin katalizörü (TPP) varlığında hazırlanan epoksi reçineler üzerinde limit oksijen indeksi testi (LOI), dikey yanma testi (UL-94) ile termal kararlılıkları ve alev geciktiricilik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada hazırlanan epoksi reçinelerden %1,5 fosfor içerikli örneklerde UL-94 testi ile V1 yanmazlık sınıfı ve %27 LOI değeri elde edilirken, %2,4 fosfor içerikli epoksi reçine örneklerinde UL-94 ile V0 yanmazlık sınıfı ve %31 LOI değeri elde edilmiştir [41].

Yang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, bor ve silikon içeren çapraz bağlı hibrit epoksi reçineler elde ederek bor ve silikonun birlikte kullanımının epoksi reçinenin alev geciktirme ve termal bozunma özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Çalışmada bor ve silikon farklı oranlarda epoksiye eklenerek farklı örnekler oluşturulmuştur. Çeşitli bor ve silikon içeren epoksi reçinelerin LOI değerleri deneysel olarak elde edilerek yanmazlıkları karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak bor içeriğinin artması ve silikon içeriğinin azalması ile LOI değeri artmıştır. Saf epoksi reçineye nazaran katkı miktarı ile yanıcılıkta azalma olduğu belirlenmiştir [42].

Doğan ve diğerleri yaptıkları çalışmada, kırmızı fosfor içeren epoksi reçinelere ilave edilen çinko borat, borik asit ve borik oksit ilavesinin reçinelerde termal kararlılık ve

alev geciktiricilik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Farklı oranlarda (%5, %10 ve %15) alev geciktirici katkı içeren epoksi örneklerine alev testleri uygulanmıştır. Sonuçlara göre en iyi yanmazlık değeri 9:1 oranı ile borik asit ve çinko borat birlikteliği ile elde edilmiş ve katkıların birlikte kullanımının yanmazlık sonuçlarını olumlu etkilediği görülmüştür [43].

Wang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, termoset reçine içerisine eklenen alüminyum polihekza etilen fosfinat (APHP) ve 9,10-dihidro-9-oksa-10-fosfafenantren 10-oksit (DOPO) alev geciktirici bileşiklerinin birlikte kullanımının yanmazlığa katkısı incelenmiştir. Sonuçlara göre, hazırlanan APHP/DOPO sisteminin küçük yanıcı piroliz kırıntılarını azalttığı belirlenmiştir [44].

Sain ve diğerleri yaptıkları çalışmada, magnezyum hidroksit katkılı doğal fiberli polipropilen kompozitlerin alev geciktiriciliği ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Takviye kısmı olarak talaş ve pirinç kabukları kullanılmış ve hazırlanan kompozitlere yatay yanma testi ve LOI testleri uygulanmıştır. Alev geciktirici olarak magnezyum hidroksit ile ayrıca borik asit, çinko borat ile birlikte kullanımını da incelemişlerdir. Sonuç olarak magnezyum hidroksitin doğal fiberli polipropilen kompozitte yanmayı hemen hemen %50 azalttığı görülmüştür. Aynı zamanda birlikte ilave edildiği borik asit ve çinko boratlı malzemelerin de olumlu etki yaratmadıkları sonucuna ulaşılmıştır. Mekanik özelliklerinin de katkı miktarı arttıkça azaldığı görülmüştür [45].

Demir ve diğerleri yaptıkları çalışmada, amonyum polifosfat ve pentaeritritol ve doğal zeolit katkılı polipropilen matrisli kompozitlerin yanma karakteristiği ve termal bozunması üzerinde durmuşlardır. Farklı oranlarda (0.25, 0.33, 0.5, 1, 2, 3 ve 4) amonyum polifosfat ve pentaeritritol kombinasyonu hazırlamışlar ve üzerlerine doğal zeolit yine farklı konsantrasyonlarda (%1, %2, %5 ve %10) ilave edilmiştir. Hazırlanan kompozitlerin TGA analizleri, yatay yanma testleri ve LOI değerleri yorumlanmıştır. Sonuçlara göre amonyum polifosfat ve pentaeritritol kombinasyonuna doğal zeolit ilavesinin olumlu katkı sağladığı bulunmuştur [46].

Braun ve diğerleri yaptıkları çalışmada, cam elyaf takviyeli poliamit 6,6 içerisine ilave edilen melamin-polifosfat ile alüminyum dietilfosfinatın alev geciktirme mekanizmalarını incelemişlerdir. Fosforlu grubun poliamitin bozunması üzerine etkisi; termal analiz (TG) geliştirilmiş gaz analizi (TG-FTIR) ve FTIR-ATR analizleri ile karakterize edilmiştir. Uygulanan yanma testi (UL-94, LOI) ile yanmazlıkları

araştırılmıştır. Sonuçta poliamit 6,6 içerisindeki alüminyum fosfinat yanma kısıtlayıcı gibi davranmıştır. Melamin-polifosfat ise gaz seyreltme ve duvar oluşturma etkisi göstermiştir. Bu iki malzeme melamin-polifosfat ile alüminyum dietilfosfinatın birlikte kullanımının sonucu olarak güçlü bir duvar oluşumu sağlanmış ve kömürleşme görülmüştür. Bu etkiler, çinko borat varlığı ile daha da güçlü hale getirilmiştir [47].

Li ve diğerleri yaptıkları çalışmada, üç farklı polimere (termoplastik poliüretan – TPU, polipropilen – PP, poli 2, 6-dimetil-1, 4-fenilen oksit – PPO) ilave edilen alüminyum fosfinatın (AlPi) alev geciktiriciliğe etkisi araştırılmıştır. Analizler, konik kalorimetre, dikey yanma testi (UL-94), sınırlı oksijen indeksi (LOI), termogravimetrik analiz (TGA) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) sonuçları ile elde edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, UL-94 testinde yanmazlığın sağlandığı V-0 sınıfına girebilmesi için alüminyum fosfinat miktarının sırasıyla ulaşması gereken miktar polimerlere göre şu şekilde sıralanabilir: PPO %0, TPU - %30, PP %50. Termal bozunma davranışı ve polimerlerin kömürleşme miktarlarına göre karşılaştırmalar yapılmıştır. PPO kompozitleri içerisine ilave edilen AlPi ile en iyi alev geciktirici özellik sağlanmıştır. TPU kompozitleri ince kömürlü bir katman oluşturmuş ve PP kompozitleri yanma boyunca kömürleşme yaşamamıştır. Sonuç olarak, AlPi ilavesi ile eriyik damla oluşumu azaltılmış ve TPU matrisli kompozitlerin alev geciktiricilik özellikleri yükseltilmiştir [48].

Gu ve diğerleri yaptıkları çalışmada, iki yeni tür halojensiz alev geciktirici (DP-DDE ve DP-DDS) sentezi yapmışlardır. Sentez, 9,10-dihidro-9-okza-10- fosfafenantren-10-oksit (DOPO) ve iminin Pudovik reaksiyonuna dayanmaktadır. Üretilen bileşikler 2,2-bis (4-glisidiloksifenil) propan epoksi reçinesi içerisine ilave edilmiştir. Hazırlanan kompozitlere UL-94 yanma testleri uygulanmıştır. Sonuçta yüksek alev geciktirme performansı elde edilmiştir. Katkı bileşikleri DP-DDE ve DP-DDS'nin düşük oranda ilavesi ile UL-94 testi ile V-0 yanmaz sınıfına ulaşılabilmiştir. Üretilen bu termosetler yüksek termal kararlılığa, yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahiptir [49].

Zhang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, sırasıyla PEPA (1-okzo 4 hidroksimetil-2,6,7-triokza-1-fosfabisiklooktan), APP (Amonyum polifosfat) ve DOPO (9,10-dihidro-9-okza-10-fosfafenantren-10-oksit), OPS (Oktafenilpolihedraloligomeriksilseskioksan) ilaveli ve ilavesiz olarak eklenerek bir seri epoksi reçine hazırlanmıştır. PEPA, APP ve DOPO bileşiklerinin kimyasal yapısı itibarıyla etkileri de değişmektedir. Hazırlanan kompozitlere uygulanan TGA analizleri ile PEPA'nın yoğunlaşma fazında daha yüksek

alev geciktirici etki sağladığı, DOPO'nun ise gaz fazında yüksek alev geciktirici etki sağladığı tespit edilmiştir. Yanmazlık testleri LOI ve UL-94 ile yapılmıştır. Sonuç olarak organofosforlu PEPA ve DOPO'nun inorganik fosforlu APP' ye göre daha iyi alev geciktirici etki sağladığı görülmüştür [50].

Zhou ve diğerleri yaptıkları çalışmada, katı asit bor fosfat (BP) üretimini ve epoksi reçine içerisindeki alev geciktirici ve piroliz sırasında BP'nin katalitik etkisini araştırmışlardır. Daha sonra hazırlanan kompozitlere uygulanan UL-94 ve LOI testleri ile bazı sonuçlara ulaşılmıştır. BP'nin epoksi içerisindeki miktarı arttıkça epoksi reçinenin alev geciktiricilik özelliği artmıştır. Bu artış BP'nin katalitik etkisi ile oluşan kömürümsü tabakanın oluşumu ile ilişkilendirilebilir [51].

Laachachi ve diğerleri yaptıkları çalışmada, epoksi reçine içerisinde genleştirilmiş grafit (EG)'in alev geciktirici olarak kullanımını incelemiştir. Farklı oranlarda (En yüksek % 50) eklenen katkılarla hazırlanan epoksilere bazı testler uygulanmıştır. Bu testler, X-ışını difraktometresi, taramalı elektron mikroskobu (SEM), konik kalorimetre cihazları ile uygulanmıştır. Beklenmedik bir şekilde, genleştirilmiş grafit ile konik kalorimetre ile ısı salım hızında yüksek sonuçlar elde edilmiştir. EG aynı zamanda ateşleme süresinde gecikme sağlamıştır. Bu davranış yüzeyden yığına ısı transferine izin veren termal yayılımının artışı ile belirlenmiştir [52].

Yang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, epoksi reçineye alev geciktirici etki yaratmaları için, fosfor bazlı bileşiklerden DOPO (9,10-dihidro-9-okza-10- fosfafenantren10-oksit) ve HPCP (hekza-fenoksisiklotrifosfazan) ile genleştirilmiş grafit eklenmiştir. Hazırlanan kompozitlere TGA analizi, LOI ve UL-94 dikey yanma testi uygulaması yapılmıştır. Sonuçlara göre grafit ilavesi epokside bariyer oluşumuna neden olarak güçlü bir etkide bulunmuştur. Ayrıca grafitle birlikte fosforlu bileşiklerin de ilave edilmesi ile birlikte kullanımın daha da gelişmiş alev geciktirici özellik sağlamaktadır [53].

Müller ve diğerleri yaptıkları çalışmada, melamin poli(metal fosfat) içeren çoklu bileşenli sistemlerin alev geciktirici olarak kullanımını araştırmıştır. Çalışma epoksi reçinenin bozunması, yanma kalıntılarının morfolojisi ve moleküler mekanizmasına yoğunlaşmıştır. Seçilen bileşiklerle (melamin polifosfat (MPP) ve AlO(OH)), melamin polimetalfosfatın birlikte kullanımı araştırılmıştır. Alev geciktirici katkıları daima % 20 wt olarak ilave edilmiştir. MPZnP (melamin poliçinkofosfat), epoksi bozunmasına önemli ölçüde etkide bulunmuştur. Bu birliktelik ile baskın karbonil gruplarının azaldığı

TGA-FTIR analizi ile tespit edilmiştir. Aynı zamanda MPZnP ve MPP'nin epoksinin bozunmasında karşılaştırılabilir etkisi olduğu belirlenmiştir [54].

Zhao ve diğerleri yaptıkları çalışmada, epoksi matriste yeni nesil fenilfosfanat esaslı alev geciktirici N, N'-diamil-p-fenilfosfonik-diamit (P-MA) geliştirmişlerdir. P-MA'nin epoksi matris ve cam elyaf takviyeli epoksi kompozitin (CTP) yanıcılığı üzerine etkisini LOI, UL-94 ve konik kalorimetre testi ile araştırmışlardır. Aynı zamanda malzemelerin termal kararlılıkları için de termal analizden (TGA) faydalanılmıştır. Sonuç olarak CTP'nin içerisine ilave edilen P-MA ile yanıcılığı epoksi matristeki kadar olmasa da önemli ölçüde azaltılmıştır [55].

Wang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, hipofosforöz asit ve alüminyum iyonlarından polimerik bir yapıya sahip alüminyum poliheksametilenfosfinat (APP) alev geciktirici katkı malzemesi üretimi gerçekleştirerek epoksi termosetlerde alev geciktirme mekanizmasını araştırmışlardır. Çalışmada sadece %4 AHP içeren termosetlerin LOI değeri % 32.7 ve UL-94 V-1 derecesine ulaşılmıştır ve bu sayede alev geciktirici etki gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır [56].

Zhang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, dekabrom bromo difenil etan (DBDPE) ile antimon trioksit (Sb_2O_3) kombinasyonunu kullanarak çelik levha güvertesinde ve tünellerde kaldırım için yaygın olarak kullanılan epoksi asfaltın alev geciktiriciliğini artırmak istemişlerdir. DBDPE/ Sb_2O_3 'ün alev geciktirici etkisini değerlendirmek için LOI (limit oksijen indeksi), termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC)'den faydalanılmıştır. Sonuç olarak DBDPE/ Sb_2O_3 'ün epoksi asfalt karışımına ilavesi ile yanmazlık değeri artmış ve LOI değeri önemli ölçüde artmıştır [57].

Tang ve diğerleri yaptıkları çalışmada, fosfafenantren ve triazin-trion grupları tarafından oluşturulan bir alev geciktirici TAD, triallilizo siyanürat (TAIC) ve 9,10-dihidro-9-oksa-10-fosfafenantren-10-oksit (DOPO) arasındaki ilave reaksiyon vasıtasıyla sentezleyerek epoksi reçine içerisinde alev geciktirici olarak kullanımını araştırmışlardır. DOPO ve diğerleri kompoziti korumak için kömürleşme artışı sağlarken TAD ise gaz fazda seyreltme ve söndürme etkisi yaratmıştır [48].

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. MATERYAL

5.1.1. Matris Sistemi

Çalışmada üretilen kompozitlerde matris elemanı olarak Omnis Kompozit firmasından temin edilen ortoftalik esaslı CTP tipi doymamış polyester reçine kullanılmıştır. Kompozit üretiminde kullanılan bu reçine el yatırması yöntemi ile üretilecek CTP ürünler için uygun, orta reaktiviteli ve orta viskoziteli reçinedir. Kullanılan bu reçine, sahip olduğu yüksek mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv sektörü, iş makinesi kabinleri, karavan yapımı, deniz tekneleri ve modüler kabin üretimi gibi çeşitli kullanım alanlarına sahip olup reçinenin elyafları iyi derecede ıslatma yeteneği de bulunmaktadır [58]. Çalışmada kullanılan reçineye ait özellikler Çizelge 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Çalışmada kullanılan doymamış polyester reçinenin özellikleri.

Özellik	Aralık
Viskozite, 23 °C (cps)	Kış dönemi-350-450 Yaz dönemi-500-550
Görünüm	Şeffaf
Monomer Oranı (%)	38-42
Asit Değeri (mgKOH/g)	18-22
Jel Süresi (dk)	Kış dönemi-08-12 Yaz dönemi-12-15

Matris sistemi için gerekli başlatıcı olarak kullanılan metil etil keton peroksit (MEK-P) ve hızlandırıcı olarak kullanılan kobalt oktoat da yine Omnis Kompozit firmasından temin edilmiş olup başlatıcı ve hızlandırıcıya ait özellikler ise Çizelge 5.2’de verilmiştir. Ayrıca kullanılan reçine, başlatıcı ve hızlandırıcıya ait görsel Şekil 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.2. MEK-P ve Kobalt oktoata ait fiziksel ve kimyasal özellikler.

Kobalt Oktoat		Metil Etil Keton Peroksit	
Görünüm	Temiz berrak sıvı	Görünüm	Renksiz
Kobalt Metali (%)	6	Peroksit içeriği (%)	33-37
Çözücü	White Spirit(Alifatik ağırlıklı hidrokarbon karışımı)	Seyreltici	DMP (Dimetilftalat)
Toplam katı (%)	37	Aktif oksijen içeriği	% 9,4-9,6
Yoğunluk (g/cm ³)	0,885	Yoğunluk (g/cm ³)	1,16±0,005



Şekil 5.1. Çalışmada kullanılan reçine, kobalt oktoat ve MEK-P.

5.1.2. Takviye Sistemi

Çalışmada Superlit Boru A.Ş. firmasından temin edilen ve Şekil 5.2’de görüldüğü gibi 30×30 cm boyutlarında kesilen mat keçe cam elyaflar el yatırması uygulamalarında takviye elemanı olarak kullanılmıştır.



Şekil 5.2. Takviye elemanı olarak kullanılan mat keçe cam elyaf.

Genel amaçlı el yatırması için uygun olan bu elyaflar; iyi ağırlık dağılımı, çabuk ve kolay ıslanma, yüksek işlenebilirlik özellikleri ile geniş bir kullanım alanına sahiptir ve silan esaslı bağlayıcısı polyester reçineye uyumludur [59]. Takviye elemanı olarak kullanılan cam elyafların özellikleri Çizelge 5.3’te sunulmuştur.

Çizelge 5.3. Takviye Elemanı olarak kullanılan mat keçe cam elyafın özellikleri.

Özellik	Değer
Cam Tipi	E
Bağlayıcı Türü	Silan
Kırılmış Demet Uzunluğu	50 mm
Reçine Uyumu	Polyester
Birim Alan Ağırlığı	225 g/m ²
İslenme	Çabuk

5.1.3. Katkı Malzemeleri

Çalışmada üretilen kompozitlerin alev etkisinde maruz kalacağı yanma/alev alma riskini azaltmak amacıyla Şekil 5.3'te görülen sepiyolit (SP), antimon trioksit (AT), alüminyum hidroksit (AH) ve çinko borat (ÇB) toz katkıları kullanılmıştır. Kullanılan katkı malzemelerinden SP, Dolsan Mineral Yapı Kimyasalları Madencilik San. ve Tic. Ltd. Şti' den, AT ile AH bileşikleri Molar Kimya Paz. ve Tic. firmasından ve ÇB ise Tıp Kim. San. Ltd. Şti firmasından temin edilmiştir. Temin edilen kimyasal bileşiklere ait genel bilgiler Çizelge 5.4'te görülmektedir.



Şekil 5.3. Kompozit üretiminde kullanılan alev geciktirici toz katkıları.

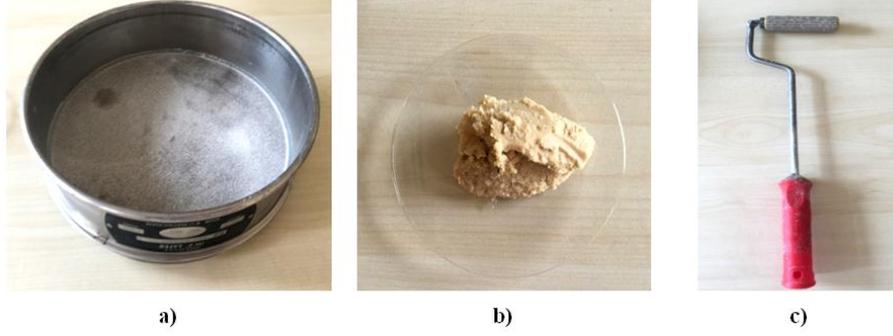
Çizelge 5.4. Katkı bileşikleri ve özellikleri.

Bileşik	Formül	Görünüm
AH	Al(OH) ₃	Beyaz toz
AT	Sb ₂ O ₃	Beyaz toz
ÇB	2ZnO.3BrO ₃ .3H ₂ O	Beyaz toz
SP	Si ₁₂ Mg ₈ O ₃₀ (OH) ₄ (H ₂ O) ₄ -8H ₂ O	Toz kil

5.1.4. Diğer materyaller

Kompozit üretimi için yararlanılan diğer malzemeler; ham halde gelen sepiyolit kil mineralini uygulama kolaylığı açısından belirli boyuta indirgemek amacıyla Düzce

Üniversitesi Asfalt laboratuvarından temin edilen 0,0059 inç göz açıklığına sahip elek, reçinenin kalıba yapışmasını önlemek amacıyla Omnis Kompozit firmasından temin edilen Polivaks kalıp ayırıcı ve mat keçe cam elyaflara reçinenin emdirilmesini sağlaması amacıyla Superlit A.Ş. firmasından temin edilen alüminyum tırtıklı rulodur (Şekil 5.4).

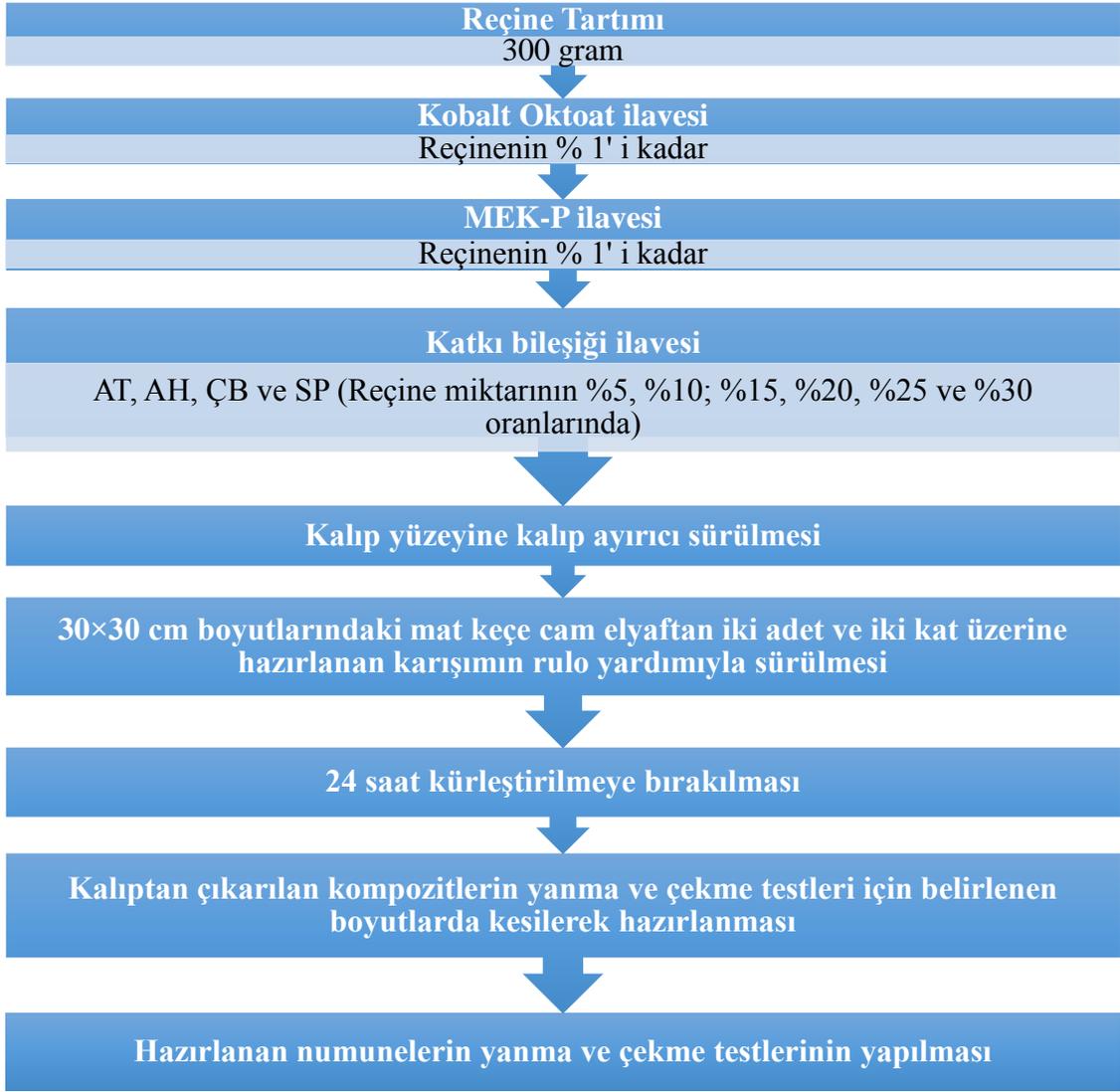


Şekil 5.4. a) Elek b) Kalıp ayırıcı c) Tırtıklı rulo.

5.2. YÖNTEM

5.2.1. Deney numunelerinin hazırlanması

Çalışmadaki üretimlerin gerçekleştirilmesi ile ilgili deneysel akış diyagramı Şekil 5.5'te görülmektedir. Şekil 5.5'te belirtilen deneysel akışın yanı sıra TGA analizlerini daha sağlıklı gerçekleştirebilmek için tüm karışımlardan elyafsız reçine matrisleri hazırlanmış ve hazırlanan katkılı/katkısız tüm matrislerden ortalama 8-10 mg parça numuneler alınarak TGA analizinde kullanılmıştır.



Şekil 5.5. Deneysel akış diyagramı.

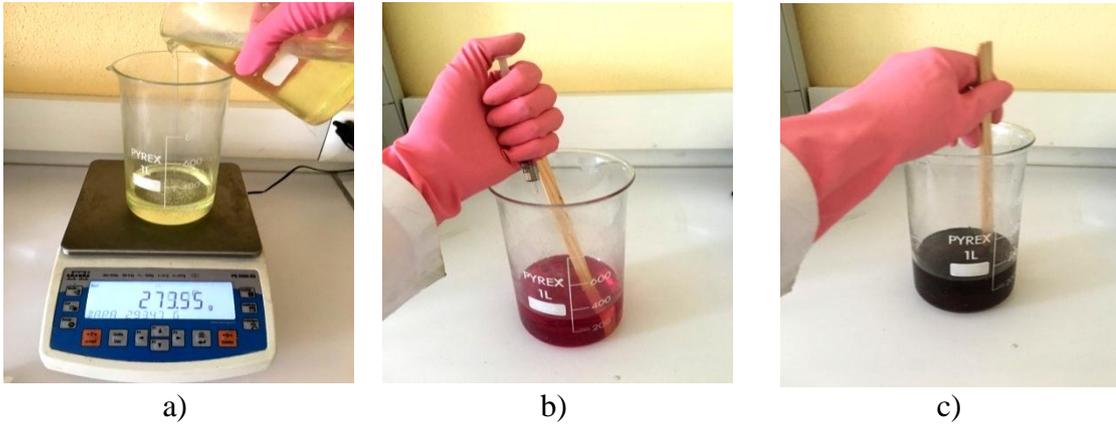
Çalışmada katkılı ve katkısız toplam 5 farklı CTP kompozit karışımının her birinden tüm yüzdesel katkı oranları için ASTM D-635-14'e uygun olarak 50 adet olmak üzere toplamda 300 adet 125×13×3 mm boyutlarında çubuk numune üretilmiştir.

Yanma testlerinde alev yüksekliği ile alev açısı (20 mm ve 125 mm yükseklik ile 20° ve 45° açı) ve aleve maruz bırakılma durumu (yatay/dikey) değişken parametreler olup bunları tanımlayan iki farklı standart kullanılması ve standartlardaki numune boyutlarının aynı olması nedeniyle toplamda 600 adet çubuk numune üretilmiştir. Çizelge 5.5'te farklı yüzdesel oranlarda AH içeren karışıma ait numunelerin boyut ve sayılarına ait detaylar referans karışımla birlikte örnek olarak verilmiştir. Çizelge 5.5'te detayları verilen örnekler yukarıda da belirtildiği gibi tüm karışımlar için üretilmiştir.

Çizelge 5.5. Katkı türü, oranı ve test standardına göre numune boyut ve sayıları.

Numune Kodu	Katkı yüzdesi (%)	Yanma Test Çubuk Örnek ve Plaka sayıları	Çekme ve Aşınma Test numune sayıları
REF	-	10 adet (ASTM D-635-14) 125×13×3 mm boyutlarında çubuk numune, 6 adet 150×150 mm boyutlarında plaka numune (ASTM D5048)	3 adet 250 mm uzunluğunda çubuk numune (çubuk dar kısım genişliği 6mm ve kalınlık 4 mm) (ASTM 638-14)
	5	10 adet (ASTM D-635-14) 125×13×3 mm boyutlarında çubuk numune, 6 adet 150×150 mm boyutlarında plaka numune (ASTM D5048)	3 adet 250 mm uzunluğunda çubuk numune (çubuk dar kısım genişliği 6 mm ve kalınlık 4 mm) (ASTM 638-14)
AH	10	10 adet (ASTM D-635-14) 125×13×3 mm boyutlarında çubuk numune, 6 adet 150×150 mm boyutlarında plaka numune (ASTM D5048)	3 adet 250 mm uzunluğunda çubuk numune (çubuk dar kısım genişliği 6 mm ve kalınlık 4 mm) (ASTM 638-14)
	15		
	20		
	25		
	30		

Deneysel çalışmalarda, el yatırması kompozitlerin üretiminde kullanılan optimum reçine miktarı, elyafların emdirilmesi ve kullanılacak toz katkıların reçine kıvamına etkisi de göz önünde bulundurularak yapılan ön denemeler sonrasında 300 gram olarak belirlenmiştir. Uygulamada öncelikle reçine tartımı yapılmıştır. Tartılarak hazırlanan reçineye ağırlıkça %1'i kadar kobalt oktoat ilave edilerek karıştırılmaya devam edilmiştir. Reçine karışımı homojen hale geldiğinde yavaşça %1 oranında metil etil keton peroksit ilavesi yapılarak tekrar karıştırılmaya devam edilmiştir. Uygulamalar Şekil 5.6'da görülmektedir.



Şekil 5.6. a) Reçine tartımı b) Kobalt oktoat ilavesi c) MEK-P ilavesi.

El yatırması ile kompozitlerin üretimi için Şekil 5.7'de görülen üretim tezgahları hazırlanmıştır. El yatırması üretiminde yüzey düzgünlüğü önemli olduğu için tezgahlar plywood kalıp malzemesi kullanılarak hazırlanmıştır.



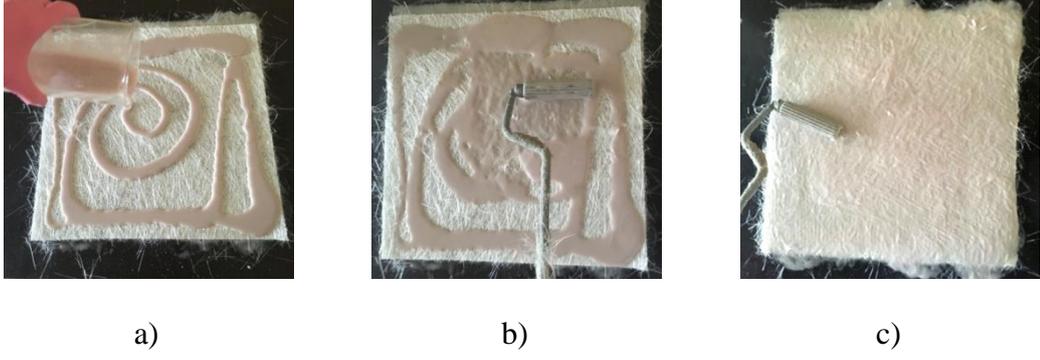
Şekil 5.7. Plywood kullanılarak hazırlanan el yatırması üretim tezgahı.

Hazırlanan karışımların elyafa emdirilmesi işleminden önce kompozitin üretileceği üretim tezgahı yüzeyine bir fırça yardımıyla kalıp ayırıcı sürülmüştür (Şekil 5.8a). Daha sonra yüzeye iki parça üst üste olacak şekilde 30×30 cm boyutlarında hazırlanan mat cam elyafı konulmuştur (Şekil 5.8b).



Şekil 5.8. a) Zemine kalıp ayırıcı sürülmesi b) İki kat 30×30 boyutlarındaki cam elyafının kalıp ayırıcı sürülen yüzeye yerleştirilmesi.

Uygulama öncesi 300 g olarak hazırlanan reçine karışımı 150 gram olarak iki parçaya bölünerek ayrılmıştır. 150 gram reçine karışımı ilk iki kat mat keçe cam elyafa elyafın uçlarından içe doğru dairesel bir şekilde dökülmüştür (Şekil 5.9a). Dökülen reçine matrisi Şekil 5.9b ve Şekil 5.9c’ de görüldüğü gibi rulo ile sürülerek boşluk ve kuru alan kalmayacak şekilde yayılmıştır. Daha sonra iki kat daha mat keçe cam elyaf serildikten sonra geriye kalan 150 gram reçine ile aynı uygulama yapılarak toplamda dört kat mat keçe cam elyaf içeren el yatırması kompozit plakanın üretimi tamamlanmıştır.



Şekil 5.9. a) Reçine karışımının elyafa dökülmesi b) Rulo yardımıyla yüzeye sürülmesi c) rulo işlemi sonrası elyaf görünümü.

Katkı içeren reçine matrislerinde ise reçineye hızlandırıcı ve başlatıcı ilave edildikten sonra %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranlarında AT, ÇB, AH ve SP, reçine matrisine eklenerek bir çubuk yardımıyla homojen bir form sağlanana kadar karıştırma işlemi uygulanmıştır (Şekil 5.10). El yatırması üretimi katkılı kompozitlerde de yukarıda tanımlandığı şekilde aynı işlem sırası ile yapılmıştır.



Şekil 5.10. Reçineye katkı ilavesi ve karıştırma uygulaması

Tüm el yatırması kompozit plakalar hazırlandıktan sonra 24 saat bekletilmiştir (Şekil 5.11). Üretim sonrası, uygulanacak testler için uygun boyutlarda kesim işlemlerini yapmak üzere hazır hale getirilen el yatırması kompozit plakalar Şekil 5.12'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. El yatırması ile üretilen kompozit örnekleri.



Şekil 5.12. Kesim işlemleri için hazırlanan el yatırması kompozit plakalar.

5.2.2. Yanma Testi

El yatırması yöntemi ile üretilen 30×30 cm boyutlarındaki kompozit plaka örnekleri; yukarıda da detaylı bir şekilde tanımlandığı gibi ASTM D-635, ASTM D-3801 ve ASTM D-5048 yanma testlerindeki ölçülere uygun olarak kesilmiş ve numuneler teste hazır hale getirilmiştir. Standartlara uygun ölçülerde kesilen ve teste hazır hale getirilen numuneler Şekil 5.13'te gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Yanma testi için hazırlanan numuneler.

Kesim işlemi sonrası yanma testleri Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi (DÜBİT) içerisinde yer alan yanma test odasında kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Yanma test cihazı Şekil 5.14’te görülmektedir.



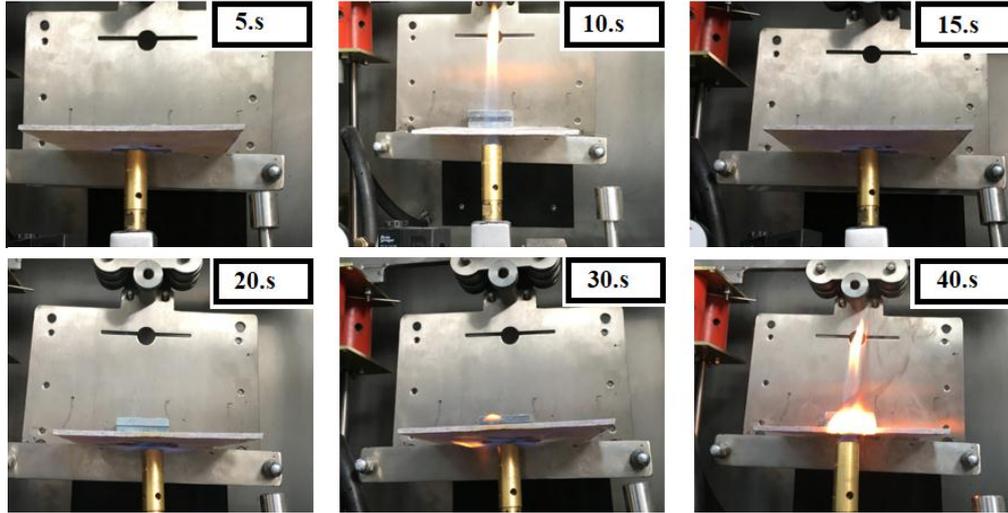
Şekil 5.14. Yanma Test Cihazı.

Gerçekleştirilen yanma testlerinde Bölüm 3.4’te detaylandırılan ASTM D635-14, ASTM 3801 ve ASTM 5048 standartları kullanılmıştır. Yanma odasında numuneler test edilmeden önce kullanılacak standartlara uygun olarak alev yüksekliği ayarlanmış ve test düzeneği test edilecek örnek boyutuna göre hazırlanmıştır (Şekil 5.15).



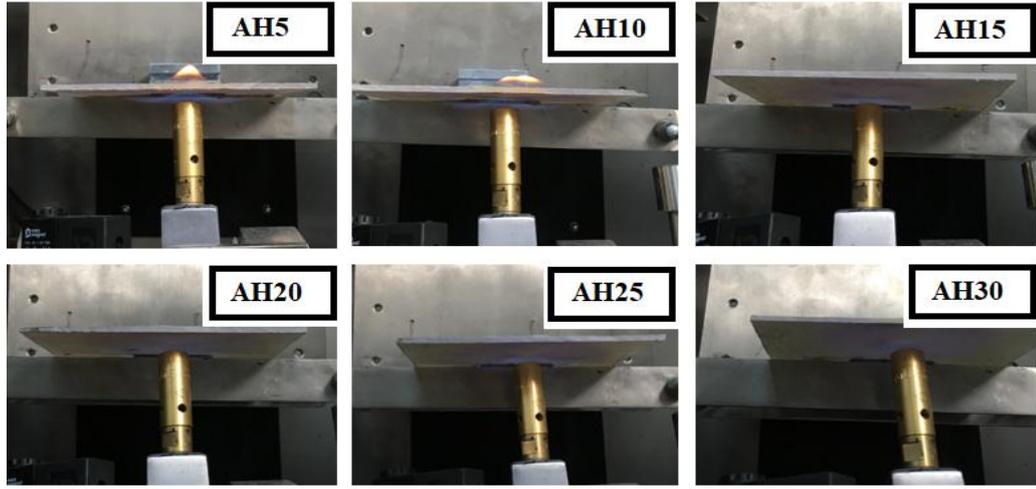
Şekil 5.15. Alev yüksekliğinin standartlara uygun olarak ayarlanması.

Şekil 5.16'da ASTM D-5048 standardında yer alan plaka yanma testi aşamaları referans örneği üzerindeki uygulama ile gösterilmiştir.



Şekil 5.16. Referans örnek plaka için ASTM D-5048 yanma testi uygulaması.

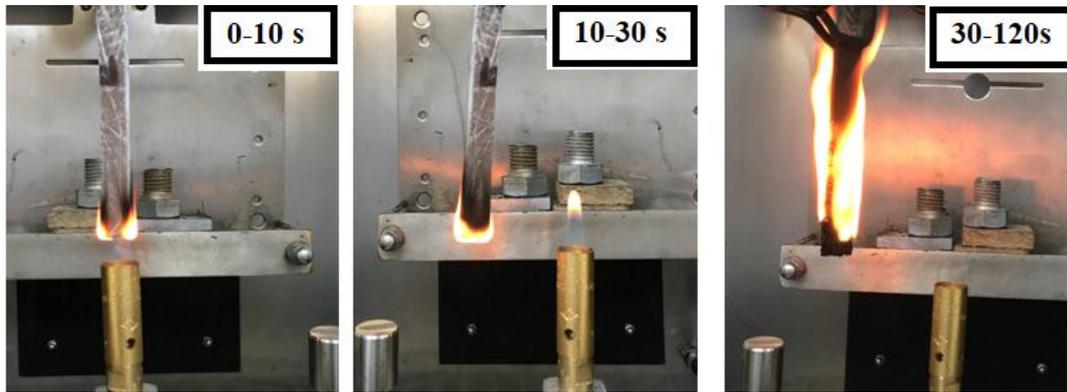
AH içeren kompozit plaka örneklerinin ASTM D-5048 yanma testi uygulaması her bir yüzde değeri için Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Diğer katkı türleri için yanma aşamaları Ek-1'de belirtilmiştir.



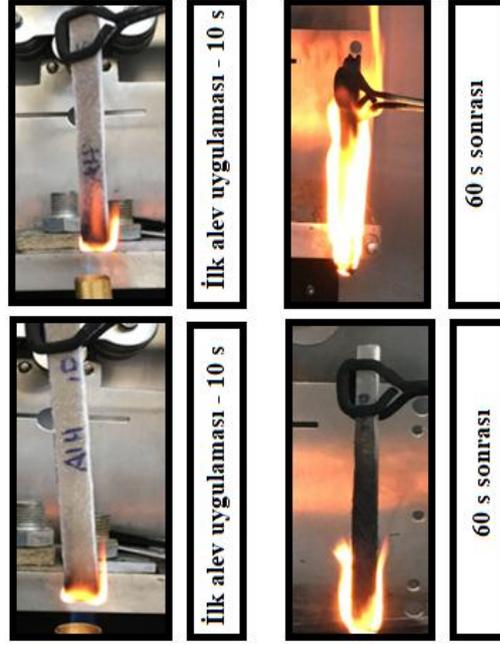
Şekil 5.17. Alüminyum hidroksit içeren 15×15 cm boyutlarındaki plaka örnekleri üzerine alev uygulaması.

ASTM D-3801 dikey yanma testinde ise 20 mm alev yüksekliği 90 °'lik açı ile kompozit çubuk numunelere uygulanmıştır. Testte alev öncelikle 10 saniye uygulanmıştır. İlk 10 saniyelik alev uygulaması sonrası numunede sönme görülür ise ikinci defa 10 saniye alev uygulaması yapılarak toplam yanma süresi not edilmiştir.

Referans karışım ile AH5 ve AH10 karışımları ilk 10 saniye sonrasında alevi hiç sönmeden yanmaya devam etmiş olup süreye bağlı olarak bu numunelere testin uygulanışı referans için Şekil 5.18'de ve AH5 ile AH10 için ise Şekil 5.19'da verilmiştir.

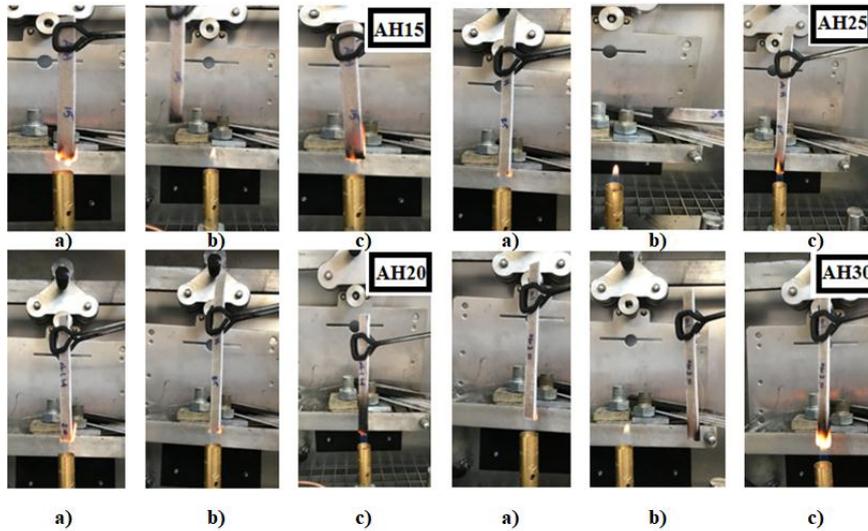


Şekil 5.18. Referans örnek için ASTM D-3801 yanma testi uygulaması.



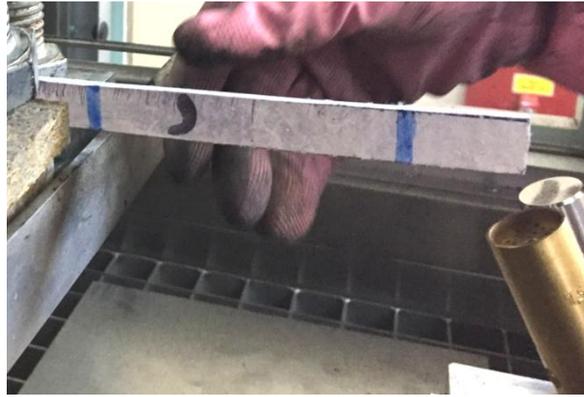
Şekil 5.19. %5 ve %10 oranlarında hazırlanan alüminyum hidroksit içerikli kompozit çubuk numunelere ASTM D-3801 yanma testi uygulaması.

Referans, AH5 ve AH10 dışındaki AH içeren diğer tüm karışımlarda birinci 10 sn. sonrası sönmeye başladığı için 2. Kez 10 saniye alev uygulamasına ihtiyaç duyulmuştur. İkinci kez alev uygulaması yapılan karışımlardan AH15, AH20, AH25 ve AH30 kodlu karışımlara ait deney Şekil 5.20’de görülmektedir. Diğer katkı türleri için yanma aşamaları Ek-1’de gösterilmiştir.



Şekil 5.20. a) AH içeren çubuk numuneler için 0 – 10 s arası ilk uygulama, b) 10 s sonrası yanmanın sönmeye başlamasını bekleme c) Alevin sönmeye başlaması sonrası ikinci 10 s’lik yanma testi uygulaması.

ASTM D-635-14 yatay yanma testinde; 20 mm alev yüksekliği uygulanarak kompozit çubuk numunelerin alev altındaki davranışları incelenmiştir. İlk olarak kompozit çubuk örnekler standartta yer aldığı gibi 25 mm ve 75 mm lik kısımlarından işaretlenmiştir. Daha sonra bu numuneler yatay yanma düzeneğine yerleştirilip 30 saniye kadar 45 °'lik alev açısı ve 20 mm'lik alev yüksekliği ile yanmaya maruz bırakılmıştır. Deney sırasında alevin ilerleme hızı mm/dk cinsinden kaydedilmiştir. Yatay yanma testi için alev açısı, alev yüksekliği ve numunenin yerleştirilmesi ile ilgili test düzeneği hazırlama işlemi Şekil 5.21'de verilmiştir. Deneyin uygulamasına ait görsel ise Şekil 5.22'de görölmektedir.



Şekil 5.21. Referans örneğin işaretlenmesi sonrası yanma düzeneğine yerleştirilmesi.



Şekil 5.22. a) 20 mm alev yüksekliğinde alev kaynağına referans örneğin 30 saniye kadar maruz bırakılması b) referans işaretin yanarak test bölgesine alevin ilerlemesi c) Test bölgesinin (75 mm) tamamen yanması.

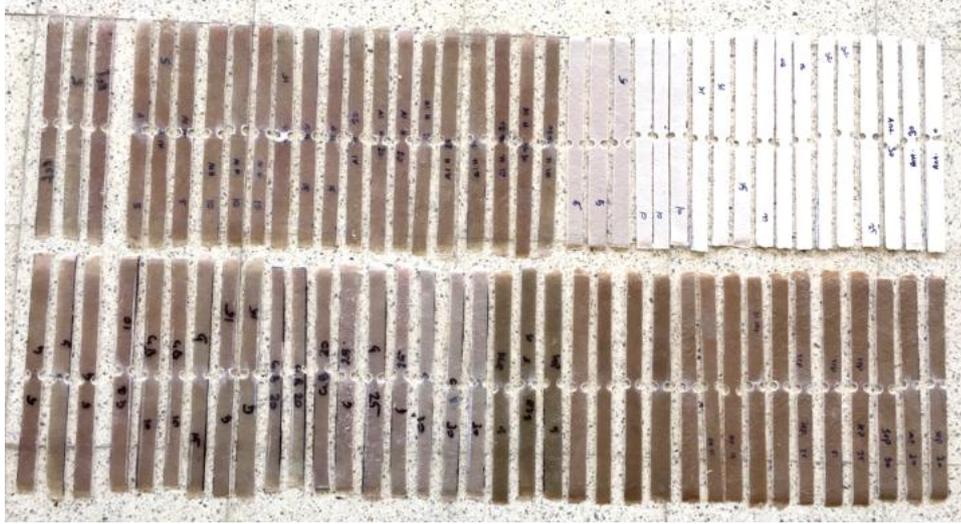
Referans örnekler sonrası %5, %10 ve %15, %20, %25 ve %30 oranlarında alüminyum hidroksit içeren çubuk örnekleri Şekil 5.23'te görüldüğü gibi aynı şekilde işaretlenerek 30 saniye kadar aleve maruz bırakılmıştır. Diğer katkı türleri için yanma aşamaları Ek-1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Farklı oranlarda AH içeren kompozit çubuk örneklere ASTM D-635-14 yanma testi uygulaması.

5.2.3. Çekme Testi

El yatırması yöntemi ile üretilen 30×30 cm boyutlarındaki kompozit plaka örnekleri ASTM D638-14 standardında çekme testleri için verilen ölçülere uygun olarak Şekil 5.24'te görüldüğü gibi hazırlanmıştır.



Şekil 5.24. Çekme testi için hazırlanan çentikli çekme numuneleri.

Testler; Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Beton Laboratuvarında bulunan Beton ve çubuk örnekler için Şekil 5.25'te görülen çekme test cihazı kullanılarak tamamlanmıştır. Çekme hızı 5 mm/dk olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.25. Çekme test cihazı.

Çekme testinde ilk olarak test edilecek çekme çubuk örnekleri üzerinde açılan ve numunenin kopma davranışının gözlenmesi beklenen çentik kısmının ölçüleri çekme gerilmesinin belirlenebilmesi amacıyla 5.26’da gösterildiği gibi dijital bir kumpas yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 5.26. Kumpas yardımıyla çekme test çubuklarının en – boy özelliklerinin belirlenmesi.

Testte çenelere yerleştirilen çubuk örnekler için kopma anındaki kuvvet kaydedilmiştir. Deney öncesi ve deney sonrası çekme çubuğunun görünümü Şekil 5.27’de verilmiştir.



Şekil 5.27. Çubuk örneklerinin çekme testi öncesi ve çekme testi sonrası durumları.

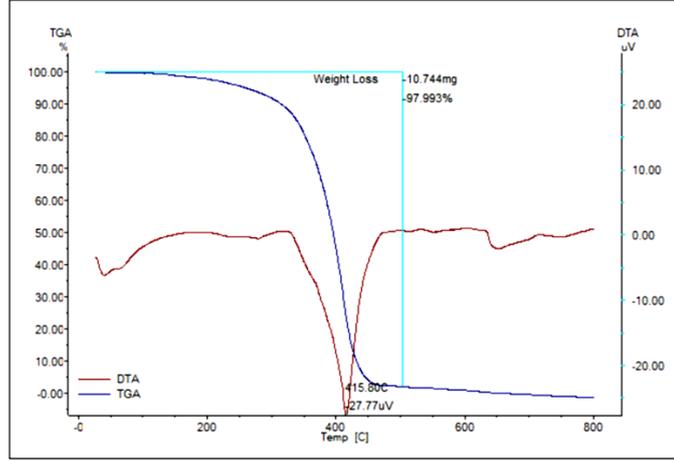


6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışması kapsamında farklı yapıdaki inorganik bileşiklerden olan antimon trioksit (AT), alüminyum hidroksit (AH), çinko borat (ÇB) ve sepiyolit (SP) katkıları CTP üretiminde kullanılmış ve kullanılan bu inorganik bileşikler ile CTP kompozitlere alev almazlık özelliği kazandırılmaya çalışılmıştır. Kullanılan katkılar kompozit üretiminde ana matris olan reçineye %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında ilave edilmiştir. Üretilen katkılı ve katkısız kompozitler üzerinde ASTM D-5048, ASTM D-635-14 ve ASTM D-3801'e göre uygun olarak alev testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca katkıların kompozitlerin mekanik özelliklerine etkisi de çekme testi ile belirlenerek elde edilen tüm bulgular bu bölümde detaylandırılmıştır.

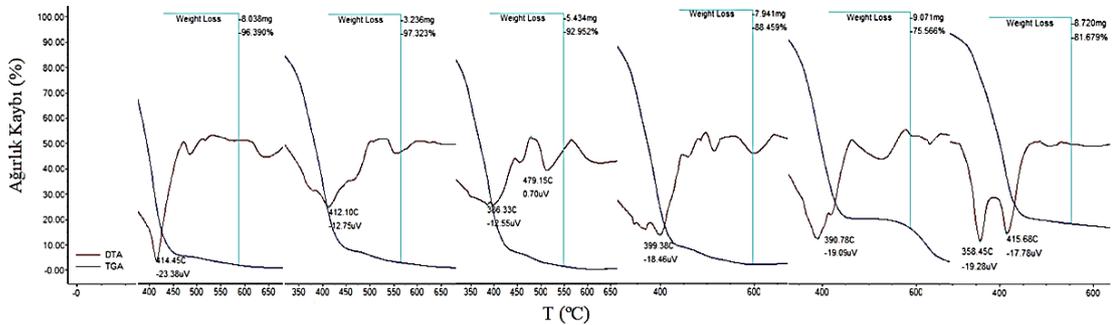
6.1. TERMAL ANALİZ (TGA-DTA)

Termal analizde inorganik katkıların ısı etkisinde kompozitin davranışına katkısını doğru yorumlayabilmek için tüm matrislerin elyafsız olarak üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerinazot gazı ile yapılan TGA-DTA analiz sonuçları referans karışım için Şekil 6.1'de ve katkılı karışımlar için ise Şekil 6.2, Şekil 6.3, Şekil 6.4 ve Şekil 6.5'te verilmiştir. Şekil 6.1'deki TGA-DTA diyagramında yer alan DTA eğrisinde referans kompozit örnek için endotermik pik referans değerin 415,80°C olduğu görülmektedir. TGA eğrisinden de anlaşılacağı üzere bu pik değere kadar geçen ısı artışında kompozit yüksek oranda ağırlık kaybına uğramıştır. Bu sıcaklık malzemenin bozunmaya uğradığı sıcaklık değeri olarak düşünülebilir. Ayrıca TGA-DTA diyagramından REF örneğinin 35 ile 500 °C aralığında ani bir düşüş ile % 97,993'lük bir ağırlık kaybına uğradığı da anlaşılmaktadır.



Şekil 6.1. REF kompozit örneği için TGA-DTA diyagramı.

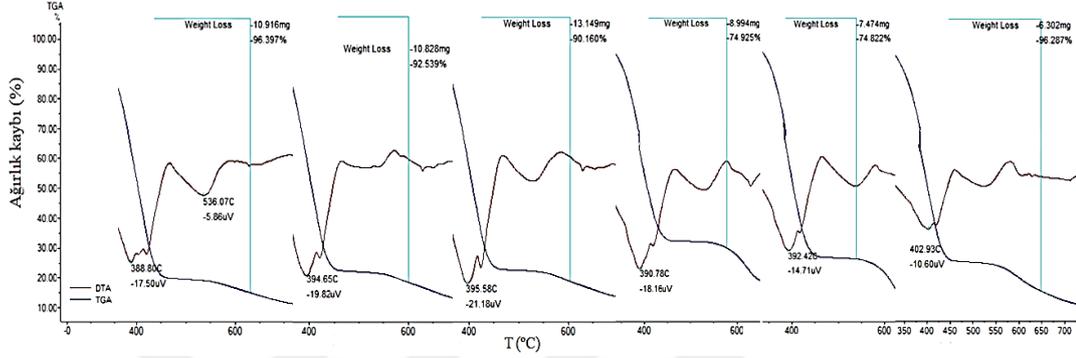
Şekil 6.2'deki TGA-DTA diyagramında yer alan DTA eğrisinde AH katkılı kompozit örneklerinde endotermik pik değerleri AH5, AH10, AH15, AH20, AH25 ve AH30 için sırasıyla; 414,45 °C, 412,10 °C, 386,33 °C, 399,38 °C, 390,78 °C ve 415, 68 °C'dir. Bu sıcaklık değerleri aynı zamanda TGA eğrisindeki ani düşüş ile yüksek ağırlık kaybına uğradıkları sıcaklık aralıklarındadır. Bu değerler malzemenin bozunma sıcaklıkları olarak düşünülebilir. Ağırlık kayıpları AH5 örneği için 50 ile 580 °C arasında ani bir düşüş ile % 96,390, AH10 örneği için 25 ile 560 °C arasında ani bir düşüş ile % 97,323, AH15 örneği için 25 ile 550 °C arasında ani bir düşüş ile % 92,952, AH20 örneği için 30 ile 600 °C arasında ani bir düşüş ile % 88,459, AH25 örneği için 20 ile 590 °C arasında ani bir düşüş ile % 75,566 ve AH30 örneği için ise 20 ile 550 °C arasında ani bir düşüş ile % 81,679 değerlerini almıştır.



Şekil 6.2. AH kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.

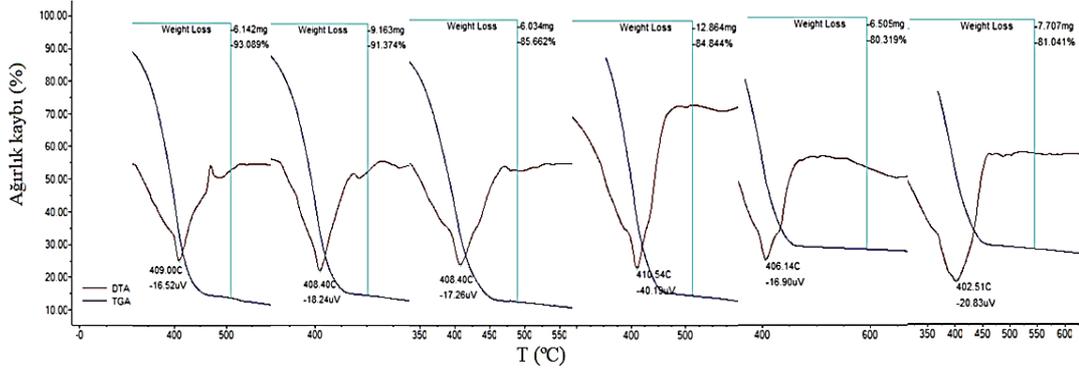
Şekil 6.3'teki TGA-DTA diyagramında yer alan DTA eğrisinde AT katkılı kompozit örneklerinde endotermik pik değerleri AT5, AT10, AT15, AT20, AT25 ve AT30 için sırasıyla; 388,80 °C, 394,58 °C, 395,58 °C, 390,78 °C, 392,42 °C ve 402,93 °C'dir. Bu sıcaklık değerleri aynı zamanda TGA eğrisindeki ani düşüşün yaşanarak yüksek ağırlık

kaybına uğradıkları sıcaklık aralıklarındadır. Bu değerler malzemenin bozunma sıcaklıkları olarak düşünülebilir. AT5 örneği için 20 ile 640 °C arasında ani bir düşüş ile % 96,397, AT10 örneği için 50 ile 600 °C arasında ani bir düşüş ile 92,539, AT15 örneği için 75 ile 600 °C arasında ani bir düşüş ile % 90,160, AT20 örneği için 25 ile 570 °C arasında ani bir düşüş ile % 74,925, AT25 örneği için 20 ile 525 °C arasında ani bir düşüş ile % 74,822 ve AT30 örneği için ise 25 ile 600 °C arasında ani bir düşüş ile % 96,287 değerlerini almıştır.



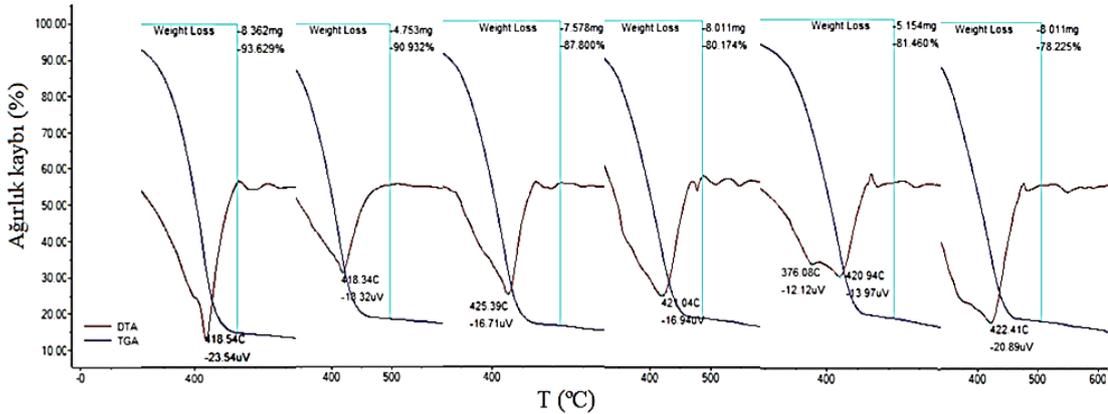
Şekil 6.3. AT kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.

Şekil 6.4'teki TGA-DTA diyagramında yer alan DTA eğrisinde ÇB katkılı kompozit örneklerinde endotermik pik değerleri ÇB5, ÇB10, ÇB15, ÇB20, ÇB25 ve ÇB30 için sırasıyla; 409,00 °C, 408,40 °C, 408,40 °C, 410,54 °C, 406,54 °C ve 402,51 °C'dir. Bu sıcaklık değerleri aynı zamanda TGA eğrisindeki ani düşüşün yaşanarak yüksek ağırlık kaybına uğradıkları sıcaklık aralıklarındadır. Bu değerler malzemenin bozunma sıcaklıkları olarak düşünülebilir. ÇB5 örneği için 20 ile 500 °C arasında ani bir düşüş ile % 93,089, ÇB10 örneği için 25 ile 500 °C arasında ani bir düşüş ile % 91,374, ÇB15 örneği için 20 ile 490 °C arasında ani bir düşüş ile % 85,662, ÇB20 örneği için 75 ile 515 °C arasında ani bir düşüş ile % 84,844, ÇB25 örneği için 26 ile 600 °C arasında ani bir düşüş ile % 80,319 ve ÇB30 örneği için ise 150 ile 550 °C arasında ani bir düşüş ile % 81,041 değerlerini almıştır.



Şekil 6.4. ÇB kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.

Şekil 6.5'teki TGA-DTA diyagramında yer alan DTA eğrisinde SP katkılı kompozit örneklerinde endotermik pik değerleri SP5, SP10, SP15, SP20, SP25 ve SP30 için sırasıyla; 418,54 °C, 418,54 °C, 425,39 °C, 421,04 °C, 420,94°C ve 422,41°C'dir. Bu sıcaklık değerleri aynı zamanda TGA eğrisindeki ani düşüşün yaşanarak yüksek ağırlık kaybına uğradıkları sıcaklık aralıklarındadır. Bu değerler malzemenin bozunma sıcaklıkları olarak düşünülebilir. SP5 örneği için 150 ile 550 °C arasında ani bir düşüş ile % 93,629, SP10 örneği için 152 ile 500 °C arasında ani bir düşüş ile % 90,932, SP15 örneği için 75 ile 500 °C arasında ani bir düşüş ile % 87,800, SP20 örneği için 25 ile 495 °C arasında ani bir düşüş ile % 80,174, SP25 örneği için 20 ile 525 °C arasında ani bir düşüş ile % 81,460 ve SP30 örneği için ise 25 ile 500 °C arasında ani bir düşüş ile % 78,225 değerlerini almıştır.



Şekil 6.5. SP kompozit örnekleri için TGA-DTA diyagramı.

6.2. YANMAZLIK TESTLERİ

Çalışma kapsamında öncelikle %20 oranında tüm inorganik bileşikler saf reçineye ilave edilerek ön değerlendirme yapmak amacıyla katkılı tüp numuneler üretilmiş ve yakma testi gerçekleştirilmiştir. Ön çalışmada 125 mm alev 30 saniye boyunca numunelere uygulanmıştır. Alev uygulaması sonrası kompozitlerin görüntüsü Şekil 6.6'da görülmektedir.



Şekil 6.6. Yakma testi sonrası tüp örnekler.

a) AT içeren örnek b) Referans c) AH içeren örnek d) ÇB içeren örnek e) SP içeren örnek.

Yanma ön deneylerinde yapılan gözlemlere göre; referans reçine matrisi alev etkisi sonrası tutuşma göstermiştir. Tutuşan matris üzerindeki alev önemli düzeyde ve hızlı bir şekilde ilerlemiş olup alev dış müdahale ile söndürülmüştür. Diğer tüm katkılı matrislerde ise tutuşma oluşmamış ve alev fazla ilerlemeden kendiliğinden sönmeye davranışı göstermiştir. Yapılan göreceli gözlemlere göre alev etkisine karşı en iyi davranış sepiyolit ve çinko borat içeren reçine matrislerinde görülmüştür.

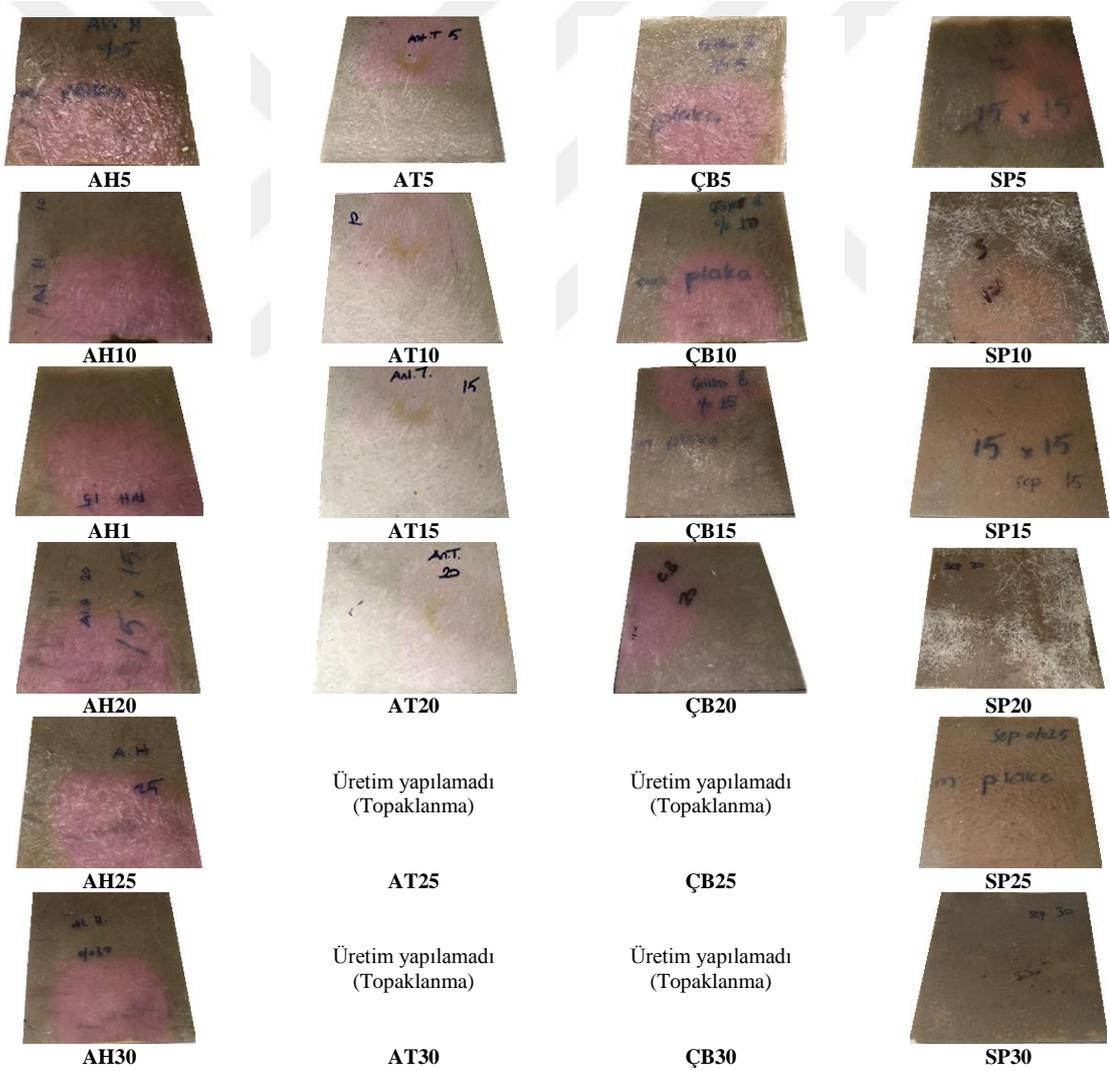
Alev etkisindeki davranışı anlamlı bir şekilde yorumlamaya katkı sağlaması amacıyla numunelerin yanma sonrası kütle kayıpları belirlenmiş ve elde edilen bulgular Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Yakma testi kütle kaybı sonuçları.

Örnek	Yakma öncesi ağırlık(g)	Yakma sonrası ağırlık (g)	Kütle kaybı (%)	Kütle Kaybı (‰)
Referans	101,2988	101,0310	0,2678	2,6436
AT	120,4387	120,3587	0,0800	0,6642
AH	121,7817	121,6029	0,1788	1,4682
ÇB	115,6274	115,5773	0,0501	0,4332
SP	119,6316	119,5547	0,0769	0,6428

Yakma sonrası örnekler karşılaştırıldığında en az kütle kaybı %0,0501 ile ÇB’de oluşmuştur. Katkılı reçine matrisleri referans ile kıyaslandığında AT ve SP içeren reçine matrisleri birbirine yakın yüzdesel kütle kaybına uğramışlardır. Referans matristen sonra en fazla kütle kaybı ise % 0,1788 ile AH içeren matrislerde görülmüştür.

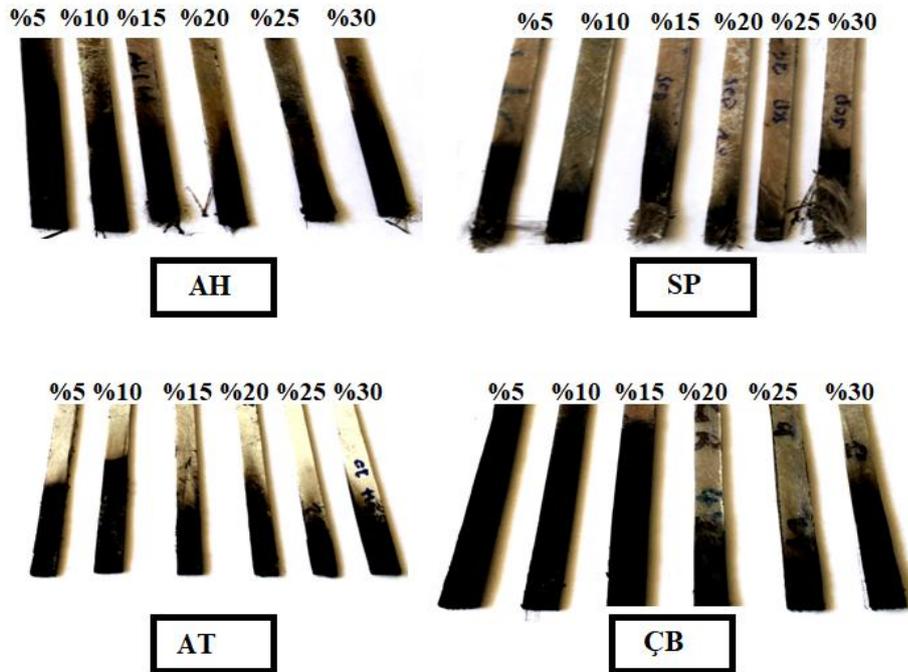
ASTM D-5048 yanma testinde; standarda uygun olarak kesilen plaka numuneleri yanma test odasında beş tekrarlı olmak üzere beş saniye kadar alev direkt olarak maruz bırakılmıştır. Testte kullanılan alev yüksekliği 125 mm olup 20°’lik açıyla numunelere uygulanmıştır. Alev uygulaması sonrası gözlem yolu ile alev davranışları incelenmiştir. Yanmaya maruz bırakılan referans plakalarda gözlem yapıldığında plakanın pembeleşerek alev etkisiyle renk değiştirdiği gözlenmiştir. Katkı içeren plakaların ASTM D-5048 yanma testi uygulaması sonrası durumları ise Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. ASTM D-5048 yanma testi uygulaması sonrası farklı plaka türleri görünümü.

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi plakaların tümünde delinme yaşanmamış olup, genel olarak tüm numuneler ASTM D-5048 yanma testine göre başarılı bir sonuç vermişlerdir. Gözlemsel analize göre; farklı katkı türleri kendi aralarında karşılaştırıldığında AH örnekleri kendi içerisinde benzer sonuçlar vermektedir. AH içeren örneklerde katkı içeriğinin artması yanma etkisiyle yüzeydeki renk değişimini fazla etkilememiştir. AT örneklerinde katkı yüzdesi arttıkça alev etkisi ile renk değiştiren bölgenin azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. ÇB örnekleri de AT örnekleri ile benzer sonuçlar içermektedir. SP örneklerinde %5 ve %10 oranlarında katkı içeren plakalarda gözlemlenen pembeleşme diğer katkı türlerindeki plakalara benzer sonuçlar verse de %15 ve daha yüksek oranda SP içeren plakalarda herhangi bir yanma bölgesi ve renk değişimi gözlenmemiş ve bu karışımlarda aleve temas eden bölgenin gözlem yapılarak belirlenmesinde zorluk yaşanmıştır.

ASTM D-3801 dikey yanma testi, hazırlanan 125×13×3 mm boyutlarındaki çubuk numunelerin 20 mm yüksekliğindeki aleve 10 saniye maruz bırakılması ve alevin sönmesi durumunda yeniden 10 saniye aleve maruz bırakılarak alevlenme ve yanma sürelerinin hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Şekil 6.8’de her bir yüzde oranlarında (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) üretilen kompozit çubuk örneklerinin yanma sonrası durumları gösterilmiştir.



Şekil 6.8. Yüzdece katkı oranına göre üretilen kompozit çubuk örneklerinin yanma sonrası durumları (ASTM D3801).

Referans örneklerine uygulanan dikey yanma testlerinde ilk on saniyede başlayıp artarak devam eden yanma değerleri gözlemlenmiş ve referans çubuk örneklerinin tamamı yanmıştır. ASTM D-3801 dikey yanma testine göre alev maruz bırakılan çubuk numuneler için yanma sınıflarını belirleyebilmek için standartta yer alan maddeler ile çizelgeler oluşturularak test edilen numunelerin genel itibari ile hangi sınıfta yer aldığı belirlenmiştir.

Dikey yanma testi sonrası kompozit çubuk örneklerinden her bir örneğe ait yanma süreleri (YS), elde edilen toplam yanma süresi (TS), ilk alev uygulaması sonrası yanma süresi (İUYS), yanmanın ilerleyip ilerlememe durumu (Yİ) ve yanan örneğin pamuğu tutuşturup-tutuşturmaması (PT) bulgularına göre malzemenin ait olduğu yanmazlık sınıflarının bulunması için hazırlanan çizelgelerden AH örneğine ait sonuçlar Çizelge 6.2’de görülmektedir.

Çizelge 6.2. ASTM D-3801 standardına göre test edilen alüminyum hidroksit içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

Numune Kodu	YS, s		TS, s		İUYS, s		Yİ		PT		Yanmazlık Sınıfı		
	≤10	≤30	≤50	≤250	≤30	≤60	Evet	Hayır	Evet	Hayır	V0	V1	V2
REF	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓			
AH5	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AH10	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AH15	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AH20	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AH25	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AH30	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓		✓	

Referans örnek kısa süre içerisinde tamamen yandığından Çizelge 6.2’de yer alan malzeme yanmazlık sınıflarından herhangi birine uymamıştır. Çizelge 6.2’de görülen AH sonuçlarına göre ise, AH5, AH10, AH15,AH20 ve AH25 kompozit örneklerinde her bir örneğin alev uygulama sonrası yanma süreleri 30 saniyeden fazla sürmekte ve toplam yanma süreleri malzeme sınıflandırma tablosuna göre olması gereken değer olan maksimum 250 saniyeyi geçmektedir. Aynı zamanda bu örnekler ikinci uygulama sonrası maksimum yanma süresi 60 saniyeyi aşmaktadır. Bu bulgulara göre karışımlar ASTM D-3801’de tanımlanan yanmaz malzeme sınıflarından herhangi birine girememiştir. Ancak örneklerin alev uygulaması sonrası tamamen yanmaması ve yanma sırasında örneğin parça kaybetmeyerek pamuğu tutuşturmaması bu karışımları V0 ve V1 grubunda bir tanıma sokmaktadır. Ancak tüm kriterler ASTM D-3801’e uygun

olarak bir arada değerlendirildiğinde %25 oranına kadar AH içeren karışımlar V0, V1 veya V2 yanmazlık sınıflarından hiçbirisini sağlamamaktadır. %30 oranında AH içeren kompozit çubuk numunelerin ise (AH30) 10 saniye alev uygulamasından sonra ortalama 20-30 saniyede yanması durmuş (ortalama 24.8 sn.) ve ikinci uygulama sonrası yaklaşık olarak ortalama 180 saniye sonunda numuneler tamamen sönmüşlerdir. Aynı zamanda deney düzeneğinin alt kısmına konulan bir parça pamuğun da yanmaması ve çubuktan parça düşmemesi sonucu AH30 örneği ASTM D-3801' e göre yanmaz sınıflardan V1'e denk gelmektedir. Sonuç olarak %30 AH kullanımı referans kompozit karışımıyla kıyaslandığında yanmaz malzeme üretimi konusunda faydalı bulgular ortaya koymuştur. AT içeren kompozitlerin dikey yanma testi sonucu elde edilen bulguları ve hangi sınıfa girdiği Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6.3'te yer alan AT5, AT10, AT15 ve AT20 kompozit örneklerinde her bir örneğin alev uygulama sonrası yanma süreleri 30 saniyeden fazla sürmekte, toplam yanma süreleri malzeme sınıflandırma tablosuna göre olması gereken değer olan maksimum 250 saniyeyi geçmektedir. Aynı zamanda bu örnekler ikinci uygulama sonrası maksimum yanma süresi 60 saniyeyi aşmaktadır. Bu bulgulara göre karışımlar ASTM D 3801'de tanımlanan yanmaz malzeme sınıflarından herhangi birine girememiştir. Ancak örneklerin alev uygulaması sonrası tamamen yanmaması ve yanma sırasında örneğin parça kaybetmeyerek pamuğu tutuşturmaması bu karışımları V0 ve V1 grubunda bir tanıma uygun hale getirmektedir. Ancak tüm kriterler ASTM D3801'e uygun olarak bir arada değerlendirildiğinde bu karışımlar V0, V1 veya V2 yanmazlık sınıflarından hiçbirisini sağlamamaktadır. AT25 kodlu kompozit örneğinde diğerlerinden farklı olarak toplam yanma süresi 250 saniyenin altında çıkmaktadır. Aynı zamanda ikinci uygulama sonrası yanma ve tutuşma süreleri toplamı 60 saniyeden küçük çıkmaktadır. Sonuçta AT25 kodlu kompozit ASTM D-3801'e göre V1 ve V2 sınıflarını karşılar nitelikte görünmektedir. Aynı zamanda deney düzeneğinin alt kısmına konulan bir parça pamuk yanmamış ve çubuktan parça düşmemiştir. Ancak her bir örneğin ilk yanma süresi maksimum değer olan 30 saniyeyi aştığı için herhangi bir sınıflandırmaya girememektedir. AT30 kodlu kompozit örneğinin ise 10 saniye alev uygulamasından sonra ortalama 25-30 saniyede yanması durmuş (ortalama 27.8 sn.) ve ikinci uygulama sonrası yaklaşık olarak ortalama 180-190 saniye sonunda numuneler tamamen sönmüşlerdir.

Aynı zamanda deney düzeneğinin alt kısmına konulan bir parça pamuğun da yanmaması ve çubuktan parça düşmemesi sonucu AT30 örneği ASTM D-3801' e göre yanmaz sınıflardan V1' e denk gelmektedir.

Çizelge 6.3. ASTM D-3801 standardına göre test edilen antimon trioksit içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

Numune Kodu	YS, s		TS, s		İUYS, s		Yİ		PT		Yanmazlık Sınıfı		
	≤10	≤30	≤50	≤250	≤30	≤60	Evet	Hayır	Evet	Hayır	V0	V1	V2
REF	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓			
AT5	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AT10	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AT15	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AT20	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	✓			
AT25	-	-	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓			
AT30	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓	-	✓		✓	

ÇB içeren kompozitlerin dikey yanma testi sonucu elde edilen bulguları ve hangi sınıfa girdiği Çizelge 6.4'te verilmiştir. Çizelge 6.4'te yer alan %5, %10, %15, %20 oranlarında çinko borat içeren ÇB5, ÇB10, ÇB15 ve ÇB20 kompozit örneklerinde her bir örneğin alev uygulama sonrası yanma süreleri 30 saniyeden fazla sürmekte, toplam yanma süreleri malzeme sınıflandırma tablosuna göre olması gereken değer olan maksimum 250 saniyeyi geçmektedir. Aynı zamanda bu örnekler ikinci uygulama sonrası maksimum yanma süresi 60 s'yi aşmaktadır. Bu bulgulara göre karışımlar ASTM D 3801'de tanımlanan yanmaz malzeme sınıflarından herhangi birine girememiştir. Ancak örneklerin alev uygulaması sonrası tamamen yanmaması ve yanma sırasında örneğin parça kaybetmeyerek pamuğu tutuşturmaması bu karışımları V0 ve V1 grubunda bir tanıma sokmaktadır. Ancak tüm kriterler ASTM D3801'e uygun olarak bir arada değerlendirildiğinde %20 ve öncesi tüm oranlar V0, V1 veya V2 yanmazlık sınıflarından hiçbirisini sağlamamaktadır. ÇB25 kompozit örneği diğerlerinden farklı olarak toplam yanma süresi açısından kriterleri karşılamakta ve 250 saniyenin altında değer vermektedir. Aynı zamanda deney düzeneğinin alt kısmına konulan bir parça pamuğun da yanmamış ve çubuktan parça düşmemiştir. Ancak ikinci uygulamanın yapılamamış olması ve her bir örneğin yanma sürelerinin 30 saniyeden fazla olması nedeniyle ASTM D3801'e herhangi bir sınıflandırmaya uygun nitelikte olmadığını göstermiştir. ÇB30 örneği de aynı şekilde toplam yanma süresi açısından kriterleri karşılamakta ve 250 saniyenin altında değer vermektedir.

Çizelge 6.4. ASTM D-3801 standardına göre test edilen çinko borat içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

Numune Kodu	YS, s		TS, s		İUYS, s		Yİ		PT		Yanmazlık Sınıfı		
	≤10	≤30	≤50	≤250	≤30	≤60	Evet	Hayır	Evet	Hayır	V0	V1	V2
REF	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓			
ÇB5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
ÇB10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
ÇB15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
ÇB20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
ÇB25	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓			
ÇB30	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓			

SP içeren kompozitlerin dikey yanma testi sonucu elde edilen bulguları ve hangi sınıfa girdiği Çizelge 6.5’de verilmiştir. Çizelge 6.5’te yer alan %5, %10, %15 ve %20 oranlarında sepiyolit içeren SP5, SP10, SP15 ve SP20 kompozit örneklerinde her bir örneğin alev uygulama sonrası yanma süreleri 30 saniyeden fazla sürmekte, toplam yanma süreleri malzeme sınıflandırma tablosuna göre olması gereken değer olan maksimum 250 saniyeyi geçmektedir. Aynı zamanda bu örnekler ikinci uygulama sonrası maksimum yanma süresi 60 saniyeyi aşmaktadır. Bu bulgulara göre karışımlar ASTM D 3801’de tanımlanan yanmaz malzeme sınıflarından herhangi birine girememiştir. Ancak örneklerin alev uygulaması sonrası tamamen yanmaması ve yanma sırasında örneğin parça kaybetmeyerek pamuğu tutuşturmaması bu karışımları V0 ve V1 grubunda bir tanıma sokmaktadır. Ancak tüm kriterler ASTM D3801’e uygun olarak bir arada değerlendirildiğinde %20 ve öncesi oranlardaki karışımlar V0, V1 veya V2 yanmazlık sınıflarından hiçbirisini sağlamamaktadır. %25 ve %30 sepiyolit içeren kompozit çubuk örnekleri farklı olarak ikinci uygulama sonrası yanma ve tutuşma süreleri bakımından kriterleri karşılamakta ve toplam süre yaklaşık olarak 40-60 saniye arasında kalarak V1 ve V2 sınıflandırmasına uygun görünmektedir. Aynı zamanda deney düzeneğinin alt kısmına konulan bir parça pamuğun da yanmaması ve çubuktan parça düşmemiştir. Ancak her bir örneğin yanma sürelerinin 30 saniyeden fazla olması ve toplam yanma sürelerinin maksimum değer olan 250 saniyeden fazla olması nedeniyle ASTM D-3801’e herhangi bir sınıflandırmaya uygun nitelikte bulunmamıştır.

Çizelge 6.5. ASTM D-3801 standardına göre test edilen sepiyolit içeren çubuk numunelerin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

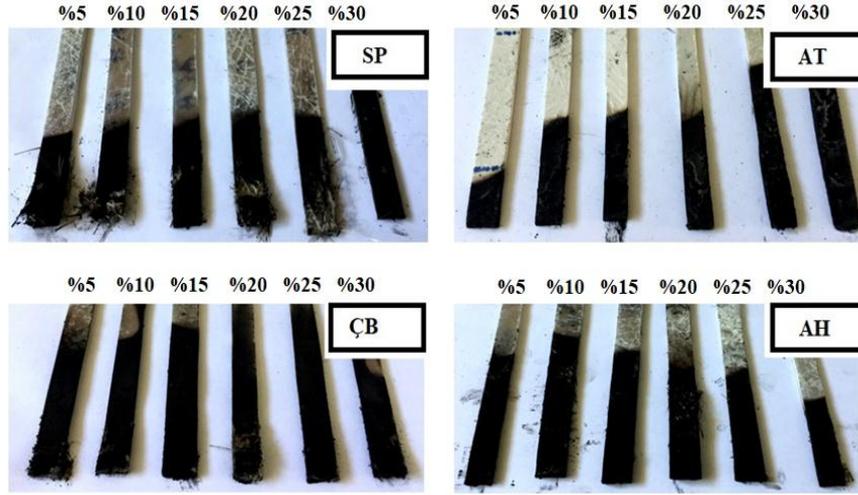
Numune Kodu	YS, s		TS, s		İUYS, s		Yİ		PT		Yanmazlık Sınıfı		
	≤10	≤30	≤50	≤250	≤30	≤60	Evet	Hayır	Evet	Hayır	V0	V1	V2
REF	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	✓			
SP5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
SP10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
SP15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
SP20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓			
SP25	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓			
SP30	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓			

ASTM D-635-14 yatay yanma testinde hazırlanan kompozit çubuk örnekleri, 45°lik açı ile eğilen 20 mm alev yüksekliğine sahip alev kaynağında 30 saniye kadar tutulmuştur. Aleve maruz bırakılan numuneler üzerinde gerçekleştirilen testte, numune üzerinde işaretlenen 75 mm'lik bölgenin yanma süreleri not edilmiştir. Referans örnekler diğer yanma testlerinde olduğu gibi burada da yoğun bir şekilde yanmayı sürdürmüş ve bir süre sonra tamamen yanmıştır. Referans numunede alev ilk 25 mm sınır çizgisine 30 saniyeden kısa bir sürede vararak hızlı bir yanma gerçekleşmiştir. Referans numunelerin yanma testi sonrası görüntüsü Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.9. ASTM D-635-14 yanma testi sonrası referans örneğin görünümü.

30 saniye boyunca 20 mm alev yüksekliğine sahip alev kaynağı ile yatay yakma gerçekleştirilen kompozit çubuk örneklerinin yanma sonrası görüntüleri Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Yüzdece katkı oranına göre üretilen kompozit çubuk örneklerinin yanma sonrası durumları (ASTM D635).

Çizelge 6.6’da yer alan malzeme sınıflandırmasına göre, referans örnek 30 saniye alev uygulamasından kısa süre sonra (30-40 saniye) yanmayı artırarak sürdürmüş ve tamamen yanmıştır. ASTM D-635’e göre değerlendirildiğinde yüksek bir yanma hızına sahip olup sınır üst sınır değer olan 40 mm/dk’yı aşmıştır. Bu nedenle ASTM D-635 – Yatay Yanma Testi sınıflarına göre Çizelge 3.4’de verilen HB sınıfı yani yavaş yanan malzeme olarak tanımlanamayacağı söylenebilir. AH örneklerinde ise yanma aşamasında 25 mm referans bölgeyi geçtikten sonra yanma hızı yavaşlamış ve 75 mm’lik işaretli bölgenin yanma hızı standarda uygun olarak düşük çıktığından malzeme ASTM D-635’e göre HB sınıfında yer almıştır.

Çizelge 6.6. ASTM D-635 standardına göre test edilen AH çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

Numune Kodu	Yanma Hızı, V	Alev ilk işaretten önce söndü mü?	
	≤40 mm/dk	Evet	Hayır
REF	-	-	✓
AH5	✓	-	✓
AH10	✓	-	✓
AH15	✓	-	✓
AH20	✓	-	✓
AH25	✓	-	✓
AH30	✓	-	✓

Çizelge 6.7’de yer alan AT sonuçları incelendiğinde, 30 saniye alev sonrası ilk referans işaretinin bulunduğu 25 mm’lik kısmı birkaç dakika içerisinde yanmıştır. Ancak daha sonra yanma hızı yavaşlamış ve 75 mm’lik test bölgesi bir dakikayı geçen sürede

yanmıştır. Bu sonuçlar AT örneklerinin de ASTM D-635'e göre HB sınıfı malzeme olduğunu göstermiştir.

Çizelge 6.7. ASTM D-635 standardına göre test edilen AT çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

Numune Kodu	Yanma Hızı, V	Alev ilk işaretten önce söndü mü?	
	≤ 40 mm/dk	Evet	Hayır
REF	-	-	✓
AT5	✓	-	✓
AT10	✓	-	✓
AT15	✓	-	✓
AT20	✓	-	✓
AT25	✓	-	✓
AT30	✓	-	✓

Çizelge 6.8'de yer alan ÇB sonuçları incelendiğinde, AT örneğine benzer olarak 30 saniye alev sonrası ilk referans işaretinin bulunduğu 25 mm'lik kısmı birkaç dakika içerisinde yanmıştır. Ancak daha sonra hızı yavaşlayarak 75 mm'lik test bölgesini bir dakikayı geçen sürede yanmıştır. Bu nedenle ÇB örnekleri de ASTM D-635'e göre HB sınıfı malzeme olarak sınıflandırılmıştır.

Çizelge 6.8. ASTM D-635 standardına göre test edilen ÇB çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

Numune Kodu	Yanma Hızı, V	Alev ilk işaretten önce söndü mü?	
	≤ 40 mm/dk	Evet	Hayır
REF	-	-	✓
ÇB5	✓	-	✓
ÇB10	✓	-	✓
ÇB15	✓	-	✓
ÇB20	✓	-	✓
ÇB25	✓	-	✓
ÇB30	✓	-	✓

Çizelge 6.9'da yer alan SP örnekleri incelendiğinde, diğer katkılı örneklere benzer olarak dakikada yanma hızları 40 mm/dk'dan düşük çıkmış ve SP örnekleri ASTM D-635'e göre HB sınıfı malzeme kategorisine girmişlerdir.

Çizelge 6.9. ASTM D-635 standardına göre test edilen SP çubuk örneklerinin alev sonrası durumlarının değerlendirilmesi.

Numune Kodu	Yanma Hızı, V	Alev ilk işaretten önce söndü mü?	
	≤ 40 mm/dk	Evet	Hayır
REF	-	-	✓
SP5	✓	-	✓
SP10	✓	-	✓
SP15	✓	-	✓
SP20	✓	-	✓
SP25	✓	-	✓
SP30	✓	-	✓

6.3. ÇEKME TESTİ

Çalışmada gerçekleştirilen çekme testleri sonuçları katkısız referans kompozit örnekleri için Çizelge 6.10’da ve AH, AT, ÇB ile SP katkılı kompozit örnekleri için ise sırasıyla Çizelge 6.11, Çizelge 6.12, Çizelge 6.13 ve Çizelge 6.14’de verilmiştir. Çekme dayanımları, deney sırasında kumpas yardımıyla ölçülen örneklere ait en ve boy ölçümleri ile analiz sonucu alınan kuvvet değerine göre hesaplanmıştır. Referansın çekme dayanım değerleri Çizelge 6.10’da gösterildiği gibi ortalama 152,33 MPa olarak elde edilmiş ve AT10 kodlu karışım dışında katkı oranına bağlı olarak azalma göstermiştir.

Çizelge 6.10. Referans örneklerin çekme testi sonuçları.

Numune Kodu	En (mm)	Boy (mm)	Kuvvet (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
REF 1	2,73	8,68	3850	162,47	152,33
REF 2	3,18	9,14	3900	134,18	
REF 3	2,45	9,8	3850	160,34	

Çizelge 6.11’de yer alan AH örnekleri için çekme dayanımı değerleri incelendiğinde en yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 138,32 MPa ile AH20 kodlu karışımında ve en düşük çekme dayanımı değeri ise 121,89 MPa ile AH15 kodlu karışımında elde edilmiştir.

Çizelge 6.11. AH örneklerinin çekme testi sonuçları.

Numune Kodu	En (mm)	Boy (mm)	Kuvvet (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
AH5-1	3,13	9,53	3150	105,60	131,62
AH5-2	3,06	8,11	3650	147,07	
AH5-3	3,04	8,79	3800	142,20	
AH10-1	3,12	11,42	5150	144,53	134,44
AH10-2	3,25	10,26	4300	128,95	
AH10-3	3,11	10,40	4200	129,85	
AH15-1	4,19	8,50	3400	95,465	121,89
AH15-2	3,44	11,94	5550	135,12	
AH15-3	3,90	8,92	4700	135,10	
AH20-1	3,26	9,99	5350	164,27	138,32
AH20-2	3,28	8,64	3900	137,61	
AH20-3	3,34	10,59	4000	113,08	
AH25-1	3,27	9,55	4650	148,90	135,26
AH25-2	3,17	10,27	4150	127,47	
AH25-3	3,34	9,60	4150	129,42	
AH30-1	3,45	11,13	4500	117,19	128,97
AH30-2	2,66	10,39	3800	137,49	
AH30-3	3,43	9,48	4300	132,24	

AT katkıli karışımlara ait sonuçların yer aldığı Çizelge 6.12 incelendiğinde en yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 181,63 MPa ile AT10 kodlu karışımda ve en düşük çekme dayanımı değeri ise 127,74 MPa ile AT20 kodlu karışımda elde edilmiştir. Burada dikkat çekici bir sonuç olarak AT10 referansa ve diğer yüzdesel katkı oranlarına kıyasla en yüksek çekme dayanımı değerini sağlamıştır.

Çizelge 6.12. AT örneklerinin çekme testi sonuçları.

Numune Kodu	En (mm)	Boy (mm)	Kuvvet (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
AT5-1	3,27	9,23	4150	137,49	
AT5-2	3,20	6,56	2800	133,38	142,49
AT5-3	3,39	9,70	5150	156,61	
AT10-1	2,55	9,61	4550	185,67	
AT10-2	2,77	9,95	4350	157,82	181,63
AT10-3	2,48	9,11	4550	201,39	
AT15-1	3,44	10,08	4800	138,42	
AT15-2	3,51	8,92	5000	159,69	146,54
AT15-3	3,43	9,58	4650	141,51	
AT20-1	3,40	10,80	4950	134,80	
AT20-2	3,44	11,85	5650	138,60	127,74
AT20-3	3,14	8,12	2800	109,81	
AT25-1	3,29	7,61	3450	137,79	
AT25-2	2,85	10,47	4200	140,75	140,83
AT25-3	3,01	11,54	5000	143,94	
AT30-1	3,72	10,55	5300	135,04	
AT30-2	3,19	9,74	4700	151,26	142,54
AT30-3	3,60	8,55	4350	141,32	

ÇB katkılı karışımlara ait sonuçların yer aldığı Çizelge 6.13 incelendiğinde yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 146,21 MPa ile ÇB15 ve en düşük çekme dayanımı değeri ise 105,00 MPa ile ÇB25 kodlu karışımda elde edilmiştir.

Çizelge 6.13. ÇB örneklerinin çekme testi sonuçları.

Numune Kodu	En (mm)	Boy (mm)	Kuvvet (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
ÇB5-1	3,33	10,42	4100	118,16	124,49
ÇB5-2	2,58	10,54	2850	104,80	
ÇB5-3	3,21	8,59	4150	150,50	
ÇB10-1	3,10	7,91	2700	110,10	121,28
ÇB10-2	2,65	10,61	3900	138,70	
ÇB10-3	2,53	9,62	2800	115,04	
ÇB15-1	2,91	8,12	2950	124,84	146,21
ÇB15-2	3,12	9,52	4550	153,18	
ÇB15-3	3,10	9,44	4700	160,60	
ÇB20-1	2,69	9,45	2200	86,54	105,27
ÇB20-2	3,10	11,06	3900	113,74	
ÇB20-3	3,36	9,66	3750	115,53	
ÇB25-1	3,36	8,33	2550	91,10	105,00
ÇB25-2	3,49	8,38	3650	124,80	
ÇB25-3	3,51	9,63	3350	99,10	
ÇB30-1	2,82	10,80	3200	105,06	109,64
ÇB30-2	3,11	9,17	2950	103,44	
ÇB30-3	2,85	9,76	3350	120,43	

SP katkılı karışımlara ait sonuçların yer aldığı Çizelge 6.14 incelendiğinde ise en yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 132,30 MPa ile SP5 ve en düşük çekme dayanımı değeri de 98,60 MPa ile SP30 kodlu karışımda elde edilmiştir.

Çizelge 6.14. SP örneklerinin çekme testi sonuçları.

Numune Kodu	En (mm)	Boy (mm)	Kuvvet (N)	Çekme Dayanımı (MPa)	Ortalama Çekme Dayanımı (MPa)
SP5-1	3,11	10,43	4550	140,27	132,30
SP5-2	2,98	9,72	4000	138,09	
SP5-3	3,12	10,95	4050	118,54	
SP10-1	3,67	8,54	3800	121,24	114,99
SP10-2	3,18	9,50	3650	120,82	
SP10-3	3,83	10,02	3950	102,92	
SP15-1	3,26	9,62	3100	98,84	121,00
SP15-2	3,23	10,29	4350	130,87	
SP15-3	3,59	9,09	4350	133,30	
SP20-1	3,52	9,07	4000	125,28	121,22
SP20-2	3,60	9,10	3500	106,83	
SP20-3	3,35	8,51	3750	131,53	
SP25-1	3,11	8,80	3250	118,75	103,65
SP25-2	4,02	9,79	3850	97,82	
SP25-3	3,72	8,26	2900	94,37	
SP30-1	3,12	9,10	2900	102,14	98,60
SP30-2	3,52	8,62	2950	97,22	
SP30-3	3,24	9,60	3000	96,45	

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

El yatırması yöntemi ile katkılı/katkısız kompozitlerin üretimi esnasında yapılan gözlemlere göre ve deneysel sonuçlara göre değerlendirme yapılacak olursa;

- 30×30 cm ölçüsünde 4 kat cam elyaf kumaşı ıslatmak ve el yatırması kompozit üretmek için gerçekleştirilen denemelerde optimum elyaf/reçine oranı 1/3 olarak belirlenmiştir.
- %5 ve %10 katkı ilavesi ile kompozit üretimi için reçine karışımı hazırlanmasında herhangi bir sorun yaşanmamış olup malzemeler reçine ile uyum göstermiştir ve reçinenin kendi viskoz yapısında gözle görünür bir fark oluşmamıştır.
- Tüm katkı malzemeleri %15 (45 g) ve artan oranlarda hazırlanıp reçineye ilave edildiğinde karıştırılması ve elyafa sürülmesi diğerlerinden daha uzun sürmüştür. Yüze homojen dağıtılmaya çalışılan reçine karışımında rulo daha dikkatli kullanılarak boşluk yapıları giderilmeye çalışılmıştır. %20, %25 ve %30 oranında katkı ilavesinde reçinenin viskoz yapısında katkının türüne bağlı olarak gözle görünür artışlar meydana gelmiştir.
- %20 oranında sepiyolit katkısı reçineye ilave edildiğinde topaklanma sorunu yaşanmıştır. Bu sorunun giderilmesi için 150 mikron boyutunda göz açıklığına sahip elekten geçirme işlemi gerçekleştirilmiş ve sepiyolit kili karışım için optimum inceliğe getirilmiştir. %20'ye kadar olan tüm karışımlar eleme sonrası yeniden üretilmiştir. Buna göre reçine viskozitesinin çok düşürülmemesi ve uygulamanın daha doğru yapılabilmesi için kullanılan malzemelerin belirli inceliğe getirilmesinin önemli olduğu görülmüştür.
- Katkı ilaveli kompozit üretiminde viskoz davranış açısından uygulamadaki gözlemlere göre reçine ile en iyi uyumu alüminyum hidroksit göstermiştir. Ayrıca AH içeren karışımlar referans matriste fazla renk değişikliği de oluşturmamıştır.
- Antimon trioksit ile üretilen kompozit numunelerde gözle görülür derecede

beyazlık değeri artmış ve antimon trioksit ilavesi reçine viskozitesini önemli düzeyde azaltmıştır. Bunun sonucu olarak reçinenin sıvılaşması elyafa emdirilmede kolaylık sağlamış ve pürüzsüz yüzeyler elde edilmiştir.

- %25 ve %30 oranında reçineye ilave edilen katkılardan çinko borat ve antimon trioksit katkı ilavesi ile hazırlanan karışımda çinko borat ve antimon trioksit tanecikleri reçine ile karışmayarak dipte çökelti oluşturmuştur. Bu da kompozit için katkı malzemesi kaybına neden olmuştur. Aynı zamanda bu katkılarla hazırlanan reçine karışımlarının rulo ile elyafa sürülmesinde zorluk yaşanmıştır.

İnorganik katkıların ısı etkisinde kompozitin bozunma sıcaklığı ve kütle kaybı davranışına katkısı belirlemek için gerçekleştirilen termal analizde elde edilen sonuçlara göre;

- Referans örnek için DTA eğrisinde gözlenen endotermik pik değerinden alınan bozunma sıcaklığı 415,80 °C olup, bu değer katkı ilavesi ile değişmiştir.
- AH içeren reçine karışımlarında %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında katkı ilavesi için endotermik pik değerleri sırasıyla 414,45 °C, 412,10 °C, 386,33 °C, 399,38 °C, 390,78 °C ve 415, 68 °C’de elde edilmiştir.
- AT içeren reçine karışımlarında %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında katkı ilavesi için endotermik pik değerleri sırasıyla 388,80 °C, 394,58 °C, 395,58 °C, 390,78 °C, 392,42 °C ve 402,93 °C’de elde edilmiştir.
- ÇB içeren reçine karışımlarında %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında katkı ilavesi için endotermik pik değerleri sırasıyla 409,00 °C, 408,40 °C, 408,40 °C, 410,54 °C, 406,54 °C ve 402,51°C’de elde edilmiştir.
- SP içeren reçine karışımlarında %5, %10, %15, %20, %25 ve %30 oranında katkı ilavesi için endotermik pik değerleri 418,54 °C, 418,54 °C, 425,39 °C, 421,04 °C, 420,94°C ve 422,41 °C’de elde edilmiştir.

Sonuç olarak tüm TGA-DTA analizleri birlikte değerlendirildiğinde sepiyolit CTP kompozitin bozunma sıcaklığını referansa göre yükseltmiş ve sıcaklık etkisindeki kütle kaybını da önemli düzeyde azaltmıştır. Yanma testlerinden elde edilen sonuçlara göre değerlendirme yapılacak olursa; ASTM D5048 yanma testi için;

- Yanma testinde aynı aleve maruz bırakılan 150×150 mm boyutlarına sahip plakalarda standartta yer alan kriterlerden delinmeme durumu referans karışımda

dahil olmak üzere tüm karışımlarda sağlanmıştır.

- Plaka örneklerinde alev etkisi sonrası renk değişimi açısından gözle görünür farklar yalnızca sepiyolit içeren plaka örneklerinde elde edilmiş ve sepiyolit içeren karışımlar alev direnç göstermiştir.
- AT ve ÇB içeren plaka örneklerinde katkı yüzdesi arttıkça yanma bölgesinin azalmaya başladığı gözlemlenmiştir. AH içeren örnekler de benzer şekilde sonuç vererek plaka örneklerde de katkı yüzdesi arttıkça yanma bölgesi azalmıştır.

ASTM D3801 yanma testi için;

- AH katkılı kompozitlerde, AH5 ve AH10 örneklerinde yoğun bir yanma oluşmasına ve ikinci uygulamaya geçilememesine karşın AH15, AH20, AH25 ve AH30 örneklerinde ikinci uygulama gerçekleştirilmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Aynı zamanda deney düzeneğinin alt kısmına konulan bir parça pamuğun da yanmaması ve çubuktan parça düşmemesi sonucu AH30 ASTM D-3801' e göre yanmaz sınıflardan V1'e denk gelmektedir.
- AT katkılı kompozitlerde, AT25 örnekleri ilk uygulama sonrası yaklaşık olarak 40 saniye içerisinde sönmüş ve ikinci uygulama sonrası ise 80-90 saniye aralıklarında sönmeye başlamıştır. Aynı şekilde AT30 örneklerinde 10 saniyelik alev sonrası yanma 20-30 saniye aralıklarında sürmüştür ve daha sonraki ikinci uygulama sonrası ise 40-50 saniye aralıklarında yanma gözlemlenmiştir. Buna göre AT30 örneği ASTM D-3801' e göre yanmaz sınıflardan V1'e denk gelmektedir.
- SP katkılı kompozitlerde, SP25 ve SP30 örnekleri 60 saniyeyi aştıktan sonra yanmayı durdurmuş ve sonrasında ise 120 saniyeye yakın bir değerde ikinci uygulama sonrası yanmayı kesmiştir. Ancak bu sonuçlar SP içeren kompozitleri sınıflandırmak için yeterli olmamaktadır.

ASTM D635-14 yanma testi için;

- Referans dışındaki diğer tüm kompozit karışımlarının 25 mm referans işaretinden sonra yanma hızları yavaşlamış ve 75 mm' ye ulaşmaları için 240 sn'den 650 saniyeye kadar bir aralıkta değişen süreler kaydedilmiştir. Bu sonuçlara göre tüm katkılı kompozitler HB – yatayda yavaş yanan malzeme sınıfında yer almıştır.

Katkı kullanımının kompozitteki mekanik performansa etkisini ortaya koymak için ASTM D638-14'e göre gerçekleştirilen direkt çekme testi sonuçlarına göre;

- Katkı içermeyen referans CTP karışımının ortalama çekme dayanımı değeri 152,33 MPa olarak elde edilmiştir.
- AH örneklerinde en yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 138,32 MPa ile %20 oranında katkı içeren AH20 kodlu karışımda ve en düşük çekme dayanımı değeri ise 121,89 MPa ile %15 oranında katkı içeren AH15 kodlu karışımda elde edilmiştir.
- AT örneklerinden yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 181,63 MPa ile %10 oranında katkı içeren AT10 kodlu karışımda ve en düşük çekme dayanımı değeri ise 127,74 MPa ile %20 oranında katkı içeren AT20 kodlu karışımda elde edilmiştir.
- ÇB örneklerinden yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 146,21 MPa ile %15 oranında katkı içeren ÇB15 kodlu karışımda ve en düşük çekme dayanımı değeri ise 105,00 MPa ile %25 oranında katkı içeren ÇB25 kodlu karışımda elde edilmiştir.
- SP örneklerinde en yüksek ortalama çekme dayanımı değeri 132,30 MPa ile %5 oranında katkı içeren SP5 kodlu karışımda ve en düşük çekme dayanımı değeri ise 98,60 MPa ile %30 oranında katkı içeren SP30 kodlu karışımda elde edilmiştir.
- Çekme dayanımına ait bulgular genel olarak değerlendirildiğinde ise çekme dayanımını arttıran tek katkı AT olup katkı oranı ise %10 olarak belirlenmiştir. Diğer tüm katkılarda katkı yüzdesine bağlı olmaksızın çekme dayanımları düşmüştür. Çekme dayanımlarını en çok düşüren katkı SP olup en az düşüren katkı ise AT olarak belirlenmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlar özetlenerek bundan sonra yapılacak araştırmalar açısından tez çalışması değerlendirilecek olursa;

- El yatırması ile CTP kompozit üretiminde reçinenin viskozitesinin üretim açısından önemli bir parametre olduğu belirlenmiştir. Reçineye eklenecek ilave katkıların reçinedeki viskoz davranışı olumsuz etkileyerek uygulama

zorluklarına neden olmaması için optimum bir oranın belirlenmesi faydalı olacaktır. Bu çalışmadaki tüm katkılar için optimum oranın %15'in altında katkı kullanımı olduğu sonucuna varılmıştır. Deneysel çalışmalarda sepiyolit in alev etkisine maruz kalan kompozitlerde alev geciktirici olarak kullanılabilirliği üzerine faydalı ön bulgular elde edilmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda sepiyolit in alev geciktirici olarak kullanımı konusunda yapılacak araştırmaların literatüre önemli düzeyde katkılar sağlayacağı görölmektedir. %30 oranında Alüminyum Hidroksit ve yine aynı oranda antimon trioksit ilave edilen reçinelerle üretilen CTP'lerin ASTM D-3801'de yer alan sınıflandırmalara göre V1 sınıfında yanmaz malzeme olarak üretilebileceği sonucu da ortaya çıkmıştır. Bu konuda farklı yanmazlık standartlarına göre yapılacak çok tekrarlı testler bu katkıların yanmaz CTP üretiminde kullanılabilirliğini ortaya koymak adına çok faydalı olacaktır. Bu çalışmada kullanılan alüminyum hidroksit, antimon trioksit, çinko borat ve sepiyolit katkılarıyla ASTM D-635'de yapılan sınıflandırmalara uygun olarak yatayda yavaş yanan malzeme üretimi mümkün görünmektedir. TGA analizi, sepiyolit in CTP kompozitin bozunma sıcaklığını referansa göre yükselttiğini ve sıcaklık etkisindeki kütle kaybını da önemli düzeyde azaltarak sıcaklık etkisine maruz kalan CTP'lerde faydalı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

8. KAYNAKLAR

- [1] V. Valery and I. Evgeny, *Mechanics and Analysis of Composite Materials*, 2nd ed., Oxford, UK: Elsevier, 2007, ch. 1, pp. 1-22.
- [2] A. İ. Kaya, "Kompozit Malzemeler ve Özellikleri," *Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, c. 8, s. 29, 2016.
- [3] J. H. Gibbons, *Advanced Materials by Design: New Structural Materials Technologies*, Washington, USA: Optical Society of America, 1988, ch. 2, pp. 37-50.
- [4] Y. Şahin, *Kompozit Malzemelere Giriş*, 3. baskı, İstanbul, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2015, böl. 1, ss. 3-30.
- [5] D. Gay, S. V Hoa, and S. W. Tsai, *Composite Materials and Applications*, 2nd ed., Florida, USA: CRC Press, 2003, ch.1, pp. 3-9.
- [6] M. Saçak, *Polimer Teknolojisi*, 1. baskı, Ankara, Türkiye: Gazi Kitabevi, 2005, böl. 10, ss. 275-291.
- [7] Y. Bulut and Ü. H. Erdoğan, "Usability of Cellulose Based Natural Fibers As Reinforcement Materials in Composite Manufacturing," *Journal of Textiles & Engineers*, vol. 18, no. 83, pp. 26-35, 2011.
- [8] A. R. Horrocks and D. Price, *Fire Retardant Materials*, 1st ed., Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2001, ch. 2, pp. 31-56.
- [9] S. İnkaya, "Dünyada ve Türkiye'de Kompozit Sektörü," *Mühendis ve Makina*, c. 52, s. 613. ss. 30-34, 2011.
- [10] Autar K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed., Florida, USA: Taylor & Francis, 2005, ch. 1, pp. 3-35.
- [11] W. Callister and D. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 9th ed., New York, USA: Wiley Press, 2013, pp. 578-610.
- [12] Anonim, (26 Şubat 2017). [Online]. Erişim: <https://www.theengineer.co.uk/issues/25-june-2012/lightening-the-load-new-materials-for-automotive>.
- [13] D. D. L. Chung, *Composite Materials Science and Applications*, 2nd ed., New York, USA: Springer, 2010, pp. 1-33.
- [14] Anonim, "Türk Kompozit Sektörü 2015 Yılı Değerlendirmesi ve 2016 Yılı Beklentileri", *Composite Turkey*, s. 12, ss. 38-40, 2016.
- [15] P. K. Mallick, *Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, 3rd ed., Florida, USA: CRC Press, 2008, pp. 30-110.
- [16] H. İşler, "Elyaf takviyeli kompozit malzemelerin esneklik katsayılarının ultrasonik ölçümü", Yüksek lisans tezi, Fizik Bölümü, Necmettin Erbakan Üniversitesi, Konya, Türkiye, 2015.

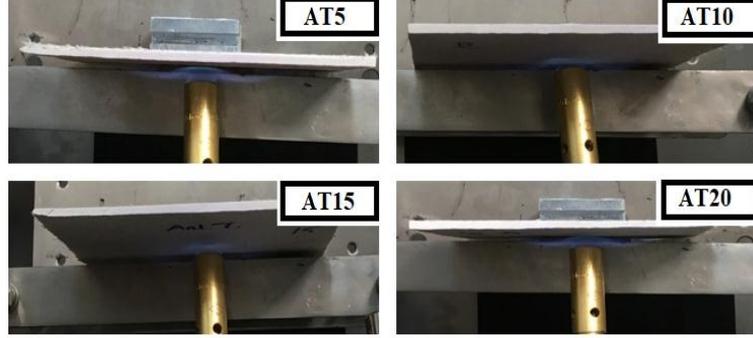
- [17] Anonim, (2 Haziran 2017). [Online]. Erişim: <http://fi.construct-yourself.com/building-materials-and-constructions/construction-materials/the-composition-of-wood-concrete-blocks.html>.
- [18] M. Gençoğlu, “Tabakalı kompozit levhalarda burkulma analizi”, Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2011.
- [19] A. H. Demirci, *Mühendislik Malzemeleri*, 2. baskı, Bursa, Türkiye: Aktüel Yayınları, 2004, böl. 3, ss. 45-60.
- [20] R. Ekici, “Metal matrisli kompozitlerin batma altında mekanik davranışlarına mikroyapının etkisi” Yüksek lisans tezi, Makine Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, 2009.
- [21] A. Kalemtaş, “Metal Matrisli Kompozitlere Genel Bir Bakış,” *Poliüretan ve Kompozit Sanayi Dergisi*, ss. 18-30, 2014.
- [22] A. Okada, “Ceramic-Matrix Composites”, *Handbook of Advanced Ceramics: Materials, Applications, Processing and Properties*, 2nd ed., Massachusetts, USA: Elsevier, 2003, pp. 417-443.
- [23] O. Gavaldia Diaz and D. A. Axinte, “Towards understanding the cutting and fracture mechanism in ceramic matrix composites,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, pp. 12-25, 2017.
- [24] S. K. Mazumdar, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, Florida, USA: CRC Press, 2002.
- [25] E. C. Bağcivan. (2017, 14 Şubat). *Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerde El Yatırma Yöntemi* [Online]. Erişim: <https://malzemebilimi.net/elyaf-takviyeli-kompozit-malzemelerde-el-yatirma-yontemi.html>.
- [26] Anonim, (9 Şubat 2017). *Sürekli Elyaf Sarma* [Online]. Erişim: <http://www.superlit.com/tr/teknoloji/surekli-elyaf-sarma/>.
- [27] H. Y. Aruntaş, A. Beycioğlu, ve S. Subaşı, “Yeni nesil lif takviyeli polimer betonarme donatı çubukları”, *7th International Advanced Technologies Symposium*, İstanbul, Türkiye, 2013, ss. 20-30.
- [28] S. V. Hoa, *Principles Of The Manufacturing Of Composite Materials*, Pennsylvania, USA: DEStech Publications, 2009.
- [29] M. K. Kang, W. I. Lee, and H. T. Hahn, “Analysis of vacuum bag resin transfer molding process,” *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 32, no. 11, pp. 1553-1560, 2001.
- [30] T. Kikuchi, Y. Tani, Y. Takai, A. Goto, and H. Hamada, “Mechanical properties of jute composite by spray up fabrication method,” *Energy Procedia*, vol. 56, pp. 289-297, 2014.
- [31] P. Kesarwani, S. Jahan, and K. Kesarwani, “Composites: Classification and its manufacturing process,” *International Journal of Applied Research*, vol. 1, no. 9, pp. 352-358, 2015.
- [32] Anonim, (9 Şubat 2017). *RS Chopper Gun* [Online]. Erişim: <http://www.graco.com/tr/tr/products/composites/rs-chop-gun.html>.
- [33] İ. Durgun, O. Vatansever, R. Ertan, ve N. Yavuz, “Otomotiv Sektöründe Kullanılan Kompozit Parça İmalat Yöntemlerinin Deneysel Olarak

- Karşılaştırılması,” *Mühendis ve Makine*, c. 55, s. 649, ss. 58–63, 2014.
- [34] Anonim, (15 Haziran 2017). [Online]. Erişim: <https://www.smooth-on.com/tutorials/creating-vacuum-bag-ez-spray-silicone-20>.
- [35] R. Horrocks ve D. Price, *Advances in Fire Retardant Materials*, 1st ed., Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2008, ch. 2, pp. 31-56.
- [36] M. Kaya ve D. Oz, “Mineral Esaslı Alev Geciktirici ve Duman Bastına Katkı Maddeleri”, *3.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 1999, ss. 152–162.
- [37] F. Laoutid, L. Bonnaud, M. Alexandre, J. M. Lopez-Cuesta, and P. Dubois, “New prospects in flame retardant polymer materials: From fundamentals to nanocomposites,” *Materials Science and Engineering R: Reports*, vol. 63, no 3, pp. 100–125, 2009.
- [38] *Standard Test Method for Rate of Burning and / or Extent and Time of Burning of Plastics in a Horizontal Position*, ASTM D635 Standard, 2015.
- [39] *Standard Test Method for Measuring the Comparative Burning Characteristics of Solid Plastics in a Vertical Position*, ASTM D3801 Standard, 2015.
- [40] K. Mizuno, T. Ueno, A. Hirata, T. Ishikawa, and K. Takeda, “Thermal degradation and flame retardancy of polynorbornene by a zeolite,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 92, no. 12, pp. 2257–2263, 2007.
- [41] Y. C. Zhang, G. L. Xu, Y. Liang, J. Yang, and J. Hu, “Preparation of flame retarded epoxy resins containing DOPO group,” *Thermochim. Acta*, no. 643, pp. 33–40, 2016.
- [42] H. Yang, X. Wang, B. Yu, L. Song, Y. Hu, and R. K. K. Yuen, “Effect of borates on thermal degradation and flame retardancy of epoxy resins using polyhedral oligomeric silsesquioxane as a curing agent,” *Thermochim. Acta*, no. 535, pp. 71–78, 2012.
- [43] M. Dogan and S. Murat Unlu, “Flame retardant effect of boron compounds on red phosphorus containing epoxy resins,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 99, pp. 12–17, 2014.
- [44] J. Wang, L. Qian, Z. Huang, Y. Fang, and Y. Qiu, “Synergistic flame-retardant behavior and mechanisms of aluminum poly-hexamethylenephosphinate and phosphaphenanthrene in epoxy resin,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 130, pp. 173–181, 2016.
- [45] M. Sain, S. Park, F. Suhara, and S. Law, “Flame retardant and mechanical properties of natural fibre-PP composites containing magnesium hydroxide,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 83, no. 2, pp. 363–367, 2004.
- [46] H. Demir, E. Arkiş, D. Balköse, and S. Ülkü, “Synergistic effect of natural zeolites on flame retardant additives,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 89, vol. 3, pp. 478–483, 2005.
- [47] U. Braun, B. Schartel, M. A. Fichera, and C. Jager, “Flame retardancy mechanisms of aluminium phosphinate in combination with melamine polyphosphate and zinc borate in glass-fibre reinforced polyamide 6,6,” *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 92, no. 8, pp. 1528–1545, 2007.
- [48] S. Tang, L. Qian, X. Liu, and Y. Dong, “Gas-phase flame-retardant effects of a

- bi-group compound based on phosphaphenanthrene and triazine-trione groups in epoxy resin,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 133, pp. 350–357, 2016.
- [49] L. Gu, G. Chen, and Y. Yao, “Two novel phosphorus-nitrogen-containing halogen-free flame retardants of high performance for epoxy resin,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 108, pp. 68–75, 2014.
- [50] W. Zhang, X. He, T. Song, Q. Jiao, and R. Yang, “The influence of the phosphorus-based flame retardant on the flame retardancy of the epoxy resins,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 109, pp. 209–217, 2014.
- [51] Y. Zhou, J. Feng, H. Peng, H. Qu, and J. Hao, “Catalytic pyrolysis and flame retardancy of epoxy resins with solid acid boron phosphate,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 110, pp. 395–404, 2014.
- [52] A. Laachachi, N. Burger, K. Apaydin, R. Sonnier, and M. Ferriol, “Is expanded graphite acting as flame retardant in epoxy resin?,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 117, pp. 22–29, 2015.
- [53] S. Yang, J. Wang, S. Huo, M. Wang, J. Wang, and B. Zhang, “Synergistic flame-retardant effect of expandable graphite and phosphorus-containing compounds for epoxy resin: Strong bonding of different carbon residues,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 128, pp. 89–98, 2016.
- [54] P. Müller, M. Morys, A. Sut, C. Jager, B. Illerhaus, and B. Scharrel, “Melamine poly(zinc phosphate) as flame retardant in epoxy resin: Decomposition pathways, molecular mechanisms and morphology of fire residues,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 130, pp. 307–319, 2016.
- [55] X. Zhao, L. Yang, F. H. Martin, X. Q. Zhang, R. Wang, and D. Y. Wang, “Influence of phenylphosphonate based flame retardant on epoxy/glass fiber reinforced composites (GRE): Flammability, mechanical and thermal stability properties,” *Compos. Part B Eng.*, no. 110, pp. 511–519, 2017.
- [56] J. Wang, L. Qian, B. Xu, W. Xi, and X. Liu, “Synthesis and characterization of aluminum poly-hexamethylenephosphinate and its flame-retardant application in epoxy resin,” *Polym. Degrad. Stab.*, no. 122, pp. 8–17, 2015.
- [57] Y. Zhang, “Flame retardancy, thermal, and mechanical properties of mixed flame retardant modified epoxy asphalt binders,” *Constr. Build. Mater.*, no. 68, pp. 62–67, 2014.
- [58] Anonim, “CE 92 TBF Teknik Bilgi Formu,” yayınlanmamış rapor.
- [59] Anonim, “MAT 8 Cam Elyaf - Glass Fiber,” yayınlanmamış rapor.

9. EKLER

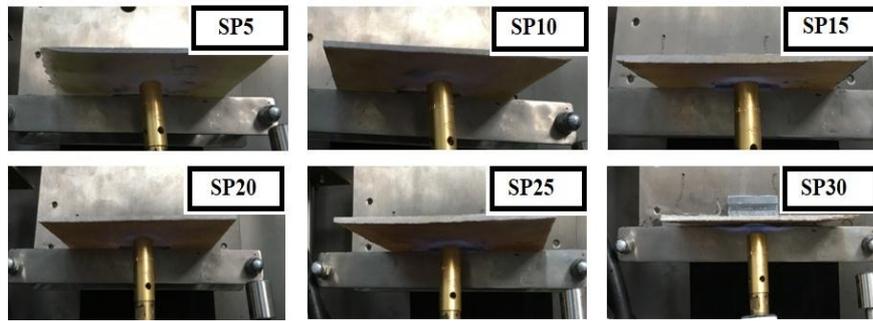
9.1. EK 1: YANMA TESTLERİ



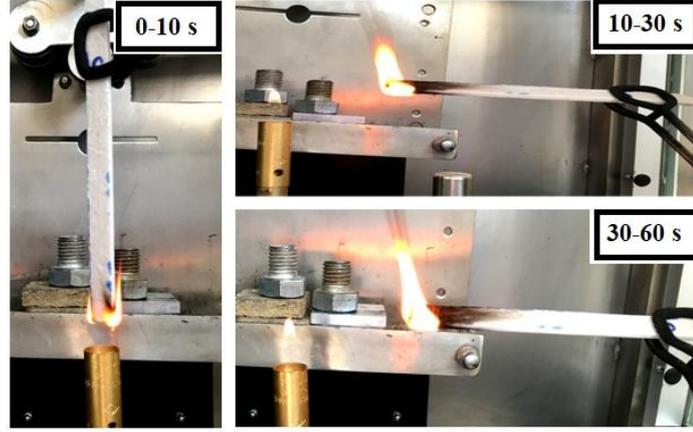
Şekil 9.1. Antimon trioksit içeren 15×15 cm boyutlarındaki plaka örnekleri üzerine alev uygulaması



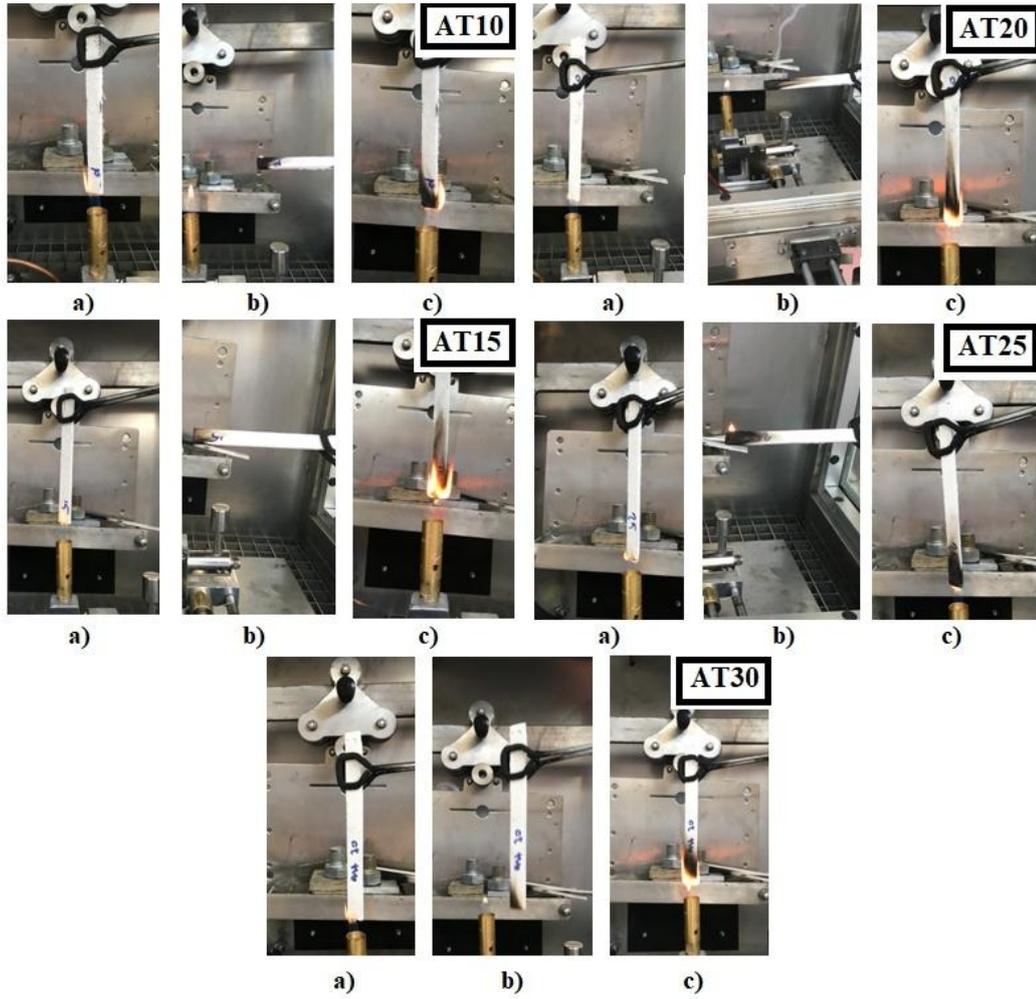
Şekil 9.2. Çinko borat içeren 15×15 cm boyutlarındaki plaka örnekleri üzerine alev uygulaması



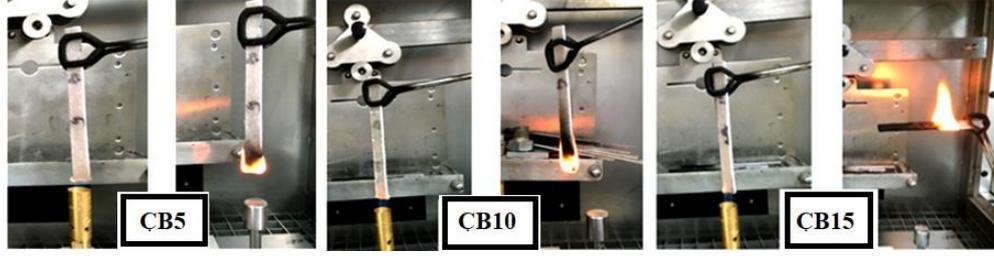
Şekil 9.3. Sepiyolit içeren 15×15 cm boyutlarındaki plaka örnekleri üzerine alev uygulaması



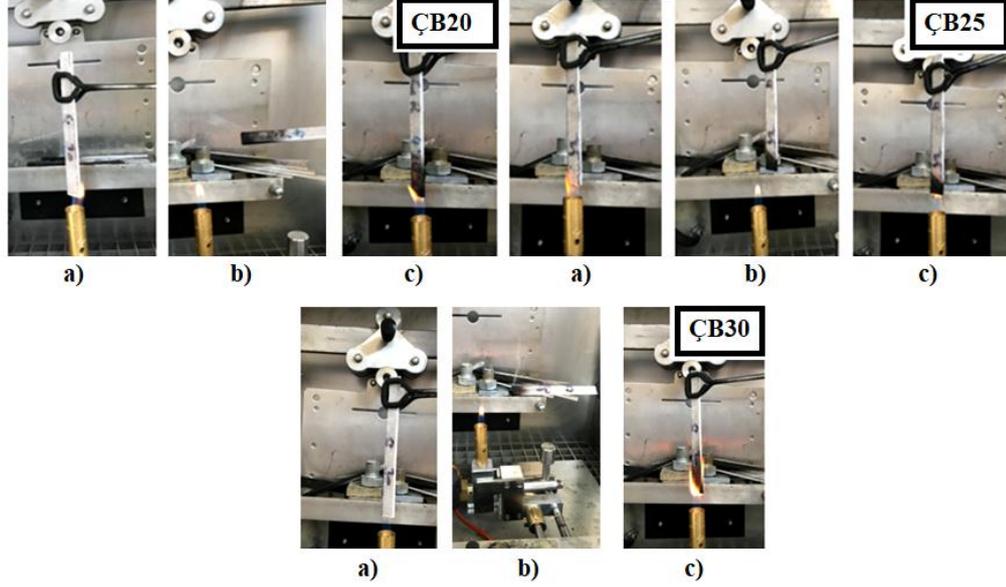
Şekil 9.4. %5 oranında antimon trioksit içerikli olarak hazırlanan kompozit çubuk numunelere ASTM D-3801 yanma testi uygulaması (İlk alev uygulaması)



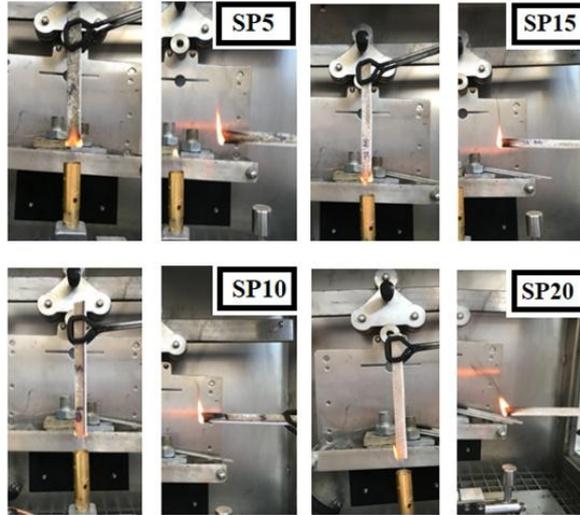
Şekil 9.5. a) Antimon trioksit içeren çubuk numuneler için a) 0 – 10 s arası ilk uygulama, b) 10 s sonrası yanmanın sönmesini bekleme c) Alevin sönmesi sonrası ikinci 10 s lik yanma testi uygulaması



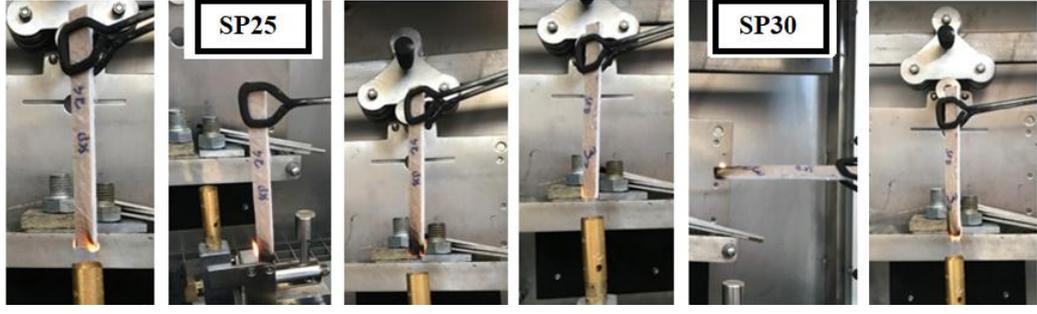
Şekil 9.6. %5, % 10 ve %15 oranında çinko borat içerikli olarak hazırlanan kompozit çubuk numunelere ASTM D-3801 yanma testi uygulaması (İlk alev uygulaması)



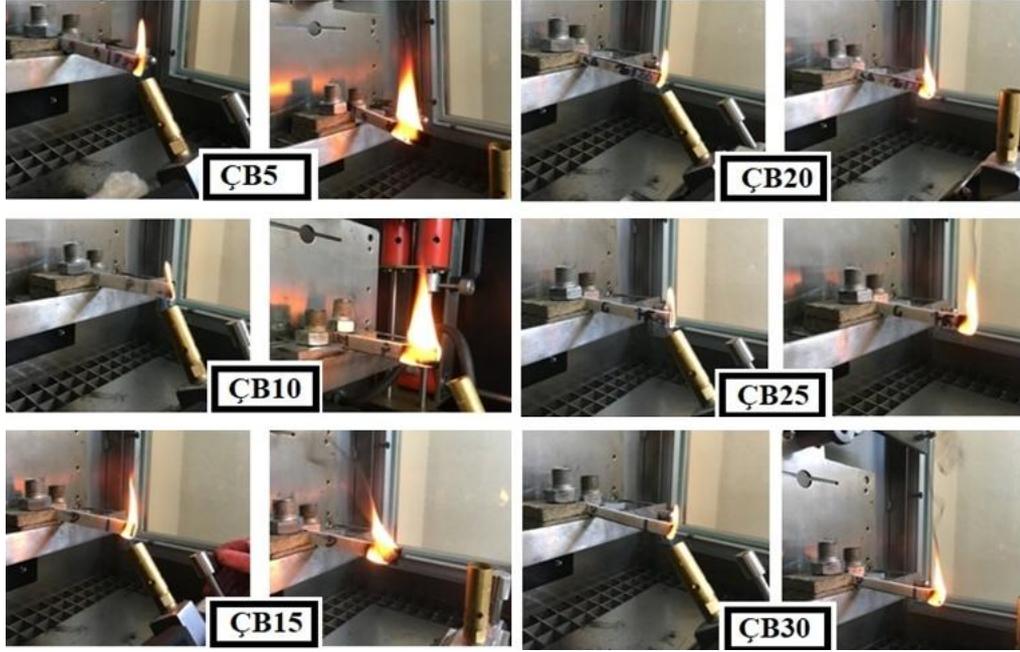
Şekil 9.6. a) Çinko borat içeren çubuk numuneler için a) 0 – 10 s arası ilk uygulama, b) 10 s sonrası yanmanın sönmesini bekleme c) Alevin sönmesi sonrası ikinci 10 s lik yanma testi uygulaması



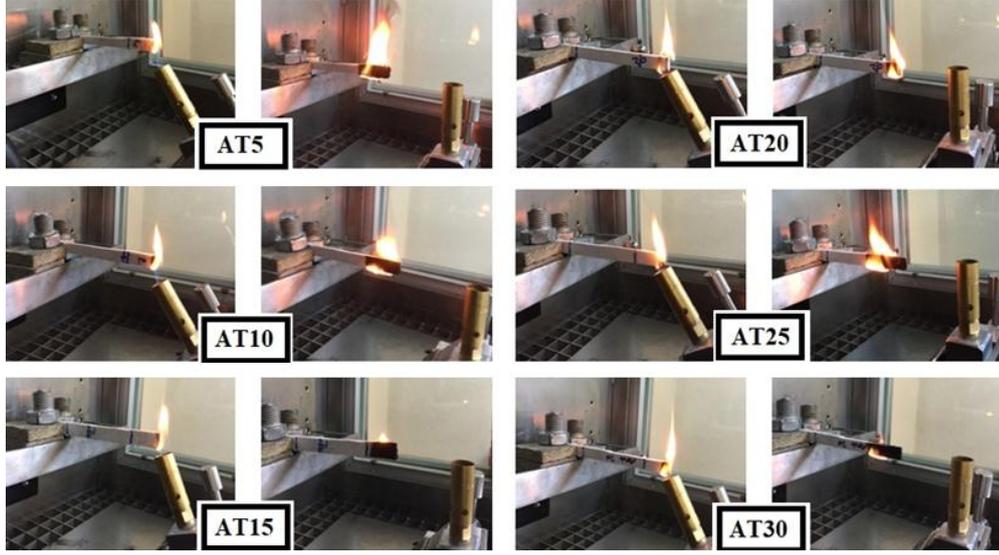
Şekil 9.7. %5, % 10, %15 ve %20 oranında sepiyolit içerikli olarak hazırlanan kompozit çubuk numunelere ASTM D-3801 yanma testi uygulaması (İlk alev uygulaması)



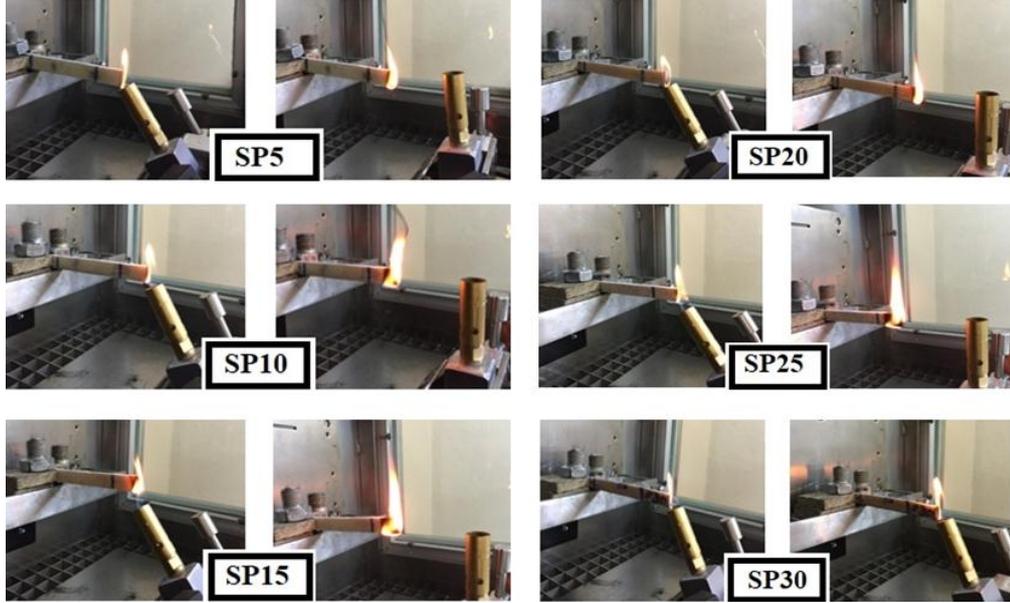
Şekil 9.8. a) Sepiyolit içeren çubuk numuneler için a) 0 – 10 s arası ilk uygulama, b) 10 s sonrası yanmanın sönmesini bekleme c) Alevin sönmesi sonrası ikinci 10 s lik yanma testi uygulaması



Şekil 9.9. Farklı oranlarda çinko borat içeren kompozit çubuk örneklere ASTM D-635-14 yanma testi uygulaması



Şekil 9.10. Farklı oranlarda antimon trioksit içeren kompozit çubuk örneklerine ASTM D-635-14 yanma testi uygulaması



Şekil 9.11. Farklı oranlarda sepiyolit içeren kompozit çubuk örneklerine ASTM D-635-14 yanma testi uygulaması

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Eda YILMAZ
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.09.1990 Düzce
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ce.edayilmaz@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri ABD	Düzce Üniversitesi	2017
Lisans	Kimya Müh.	Ankara Üniversitesi	2014
Lise	Fen Bilimleri	Düzce Anadolu Arsal Lisesi	2009