



**ZEOLİTİK TÜF İÇERİKLİ JEOPOLİMER
KAPLAMA MALZEMELERİNİN
ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Mücahit HAYAT

**2022
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. İlker TEKİN**

**ZEOLİTİK TUF İÇERİKLİ JEOPOLİMER KAPLAMA
MALZEMELERİNİN ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

Mücahit HAYAT

**T.C
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. İlker TEKİN**

**KARABÜK
Haziran 2022**

Mücahit HAYAT tarafından hazırlanan “ZEOLİTİK TÜF İÇERİKLİ JEOPOLİMER KAPLAMA MALZEMELERİNİN ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu tasdiklerim.

Doç. Dr. İlker TEKİN

.....

Tez Danışmanı, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 03/06/2022

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. İsmail Özgür YAMAN (ODTÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Serkan SUBAŞI (DÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. İlker TEKİN (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edilip sunulduğunu; ayrıca bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları, bu kural ve ilkelere riayet ederek yaptığımı beyan ederim.”

Mücahit HAYAT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ZEOLİTİK TÜF İÇERİKLİ JEOPOLİMER KAPLAMA MALZEMELERİNİN ELEKTROMANYETİK KALKANLAMA ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Mücahit HAYAT

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. İlker TEKİN

Haziran 2022, 142 sayfa

Yapı malzemelerinin üretiminden açığa çıkan karbon dioksit (CO_2), karbon ayak izi ve iklim değişikliğinin temel sebeplerinden birisidir. Bundan dolayı, bilim insanları tatmin edici mekanik ve fiziksel özelliklere sahip yeni proses geliştirme arayışına girmişlerdir. Alkali aktive malzemeler ve üretim prosesi çevre dostu ve kalıcı malzeme üretim proseslerinden birisi olarak kabul edilmektedir.

Diğer taraftan elektromanyetik kirlilik her geçen gün insanları çevreleyerek, teknolojik bakımdan olumlu olsa da insan sağlığı bakımından büyük risk oluşturmaktadır. Cep telefonları, bluetooth ve Wi-Fi aygıtlar, mikrodalga cihazlar elektromanyetik kirlilik oluşturarak, gün geçtikçe temiz yaşam alanlarını daraltmaktadır. Yenilikçi yapı malzemelerinde elektromanyetik alan (EMA)

etkilerinin sönümlenmesi sağlanarak bu tehditleri azaltmak araştırmacılar tarafından çalışılmaktadır.

Bu çalışmada, alkali aktive edilmiş kompozit hamurların (AAH) üretiminde alümina silikat kaynağı olarak Bayburt ilinden yeşil ve beyaz renkli volkanik tüfler ile birlikte toz halde mikronize kalsit kullanılmıştır. Alkali aktivatör olarak Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sodyum Silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Elektromanyetik özellikleri geliştirmek amacıyla manyetit (ferro-ferrik oksit), hacimce %2, %4 ve %8 oranında karışıma eklenmiştir. Ayrıca üretilen AAH'lerin mekanik, fiziksel ve elektromanyetik özelliklerini iyileştirmek için toplam malzemenin hacmince %2 polipropilen, kırılmış karbon ve pirinç kaplı mikro çelik lif kullanılmıştır. Prizma ve küp AAH numuneler üzerinde 2, 28 ve 90 gün yaşlarında mekanik ve fiziksel özellikleri ve 300x300x10 mm boyutlu kaplama malzemeleri üzerinde 90 gün yaşında 900 - 6000 MHz aralığında elektromanyetik iletim ve yansıma özellikleri test edilmiştir. Ayrıca, 90 gün yaşında AAH numuneler üzerinde mikro yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, maksimum 90 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri sırasıyla 20.2 MPa ve 37.4 MPa'dır. Elektromanyetik ölçümlerde 900 – 6000 MHz frekansları için en yüksek EMF kalkanlama ve yansımadan kaynaklı EMF kalkanlama değerleri sırasıyla 56 dB ve 35 dB olarak ölçülmüştür.

Anahtar Kelimeler : Alkali Aktive Malzemeler, Zeolitik Tüf, Manyetit, Polipropilen Lif, Karbon Lif, Çelik Lif, Mekanik ve Fiziksel Özellikler, Elektromanyetizma, Mikroyapısal Analiz

Bilim Kodu : 91127

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

ENHANCEMENT OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING PROPERTIES OF ZEOLITIC TUFF-CONTAINING GEOPOLYMER COATING MATERIALS

Mücahit HAYAT

**Karabuk University
Institute of Graduate Programs
Department of Civil Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. İlker TEKİN

June 2022, 142 pages

Carbon dioxide (CO₂) released from the production of building materials is one of the main causes of carbon footprint and climate change. Therefore, scientists have sought to develop new processes with satisfactory mechanical and physical properties. Alkali activated materials and production process are accepted as one of the environmentally friendly and permanent material production processes.

On the other hand, electromagnetic pollution surrounds people day by day and poses a great risk in terms of human health, although it is in technologically affirmative. Cell phones, bluetooth and Wi-Fi devices, microwave devices create electromagnetic pollution, and restrict non-exposed habitat. Researchers are trying to reduce these threats by dampening the effects of electromagnetic field (EMF) by producing innovative building materials.

In this study, green and white volcanic tuffs as alumina silicate source from Bayburt province together with powdered micronized calcite were used in the production of alkali-activated pastes (AAP). Sodium Hydroxide (NaOH) and Sodium Silicate (Na_2SiO_3) were used as alkali activators. In order to improve the electromagnetic properties, magnetite (ferro-ferric oxide) was added to the mixture at 2%, 4% and 8% by volume. In addition, 2% by volume polypropylene, chopped carbon and brass coated micro steel fiber were used to improve the electromagnetic properties of the AAPs. Mechanical and physical properties were tested on prism and cubic AAP specimens at 2, 28 and 90 days, and electromagnetic transmission and reflection properties were tested on cladding materials of 300x300x10 mm size at 90 days of age in the range of 900-6000 MHz. In addition, microstructural analyzes were performed on 90th day. According to the results, maximum 90-days flexural and compressive strength values are 20.2 MPa and 37.4 MPa, respectively. In electromagnetic measurements, the highest total EMF shielding and EMF shielding for reflection values for 900 – 6000 MHz frequencies were measured as 56 dB and 35 dB, respectively.

Key Words : Alkali-Activated Materials, Zeolitic Tuff, Magnetite, Polypropylene Fiber, Carbon Fiber, Steel Fiber, Mechanical and Physical Properties, Electromagnetism, Microstructural Analysis

Science Code : 91127

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması sürecinde ihtiyaç duyduğum her türlü desteği sağlayan, aşıladığı motivasyonla ve gerekli yönlendirmeleriyle yoluma ışık tutan, engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım sayın hocam Doç. Dr. İlker TEKİN’e, birçok konuda yardımını esirgemeyen Arş. Gör. Mahfuz PEKGÖZ’e ve beraber çalışmaktan keyif aldığım laboratuvar arkadaşım Sheir Ahmad RAHMANİ’ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım süresince hiçbir desteğini esirgmeden yanımda olan aileme teşekkürü borç bilirim.

Manyetit (mikronize manyetit) temininde desteklerinden dolayı Dimin Madencilik A.Ş.’ye ve Erdemir Madencilik San. ve Tic. A.Ş.’ye, mikronize kalsit temininde desteklerinden dolayı Karya Dış Ceph Sistemleri Şti’ye ve Nigtaş A.Ş.’ye teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez, TUBİTAK 217M431 nolu *“Bayburt Taşı İle Üretilen Lifle Güçlendirilmiş Geopolimer Kaplama Ve Duvar Malzemelerinin Elektromanyetik Özelliklerinin Belirlenmesi Ve Elektromanyetik Dalga Emen-Yansıtıcı Veya İleten Yeni Kaplama Malzemesinin Geliştirilmesi (Determination of Electromagnetic Properties of Geopolymers Covering and Wall Materials Powdered By Fiber Produced With Bayburt Stone and Development of New Covering Materials Absorbing-Reflecting or Conducting Electromagnetic Wave)”* Ar-Ge projesi kapsamında desteklenmiştir. Bu kapsamda Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu’na (TUBİTAK) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvii

BÖLÜM 1	1
---------------	---

GİRİŞ	1
-------------	---

BÖLÜM 2	6
---------------	---

KURAMSAL TEMELLER	6
-------------------------	---

2.1. ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ MALZEME	6
------------------------------------------	---

2.1.1. Alkali Aktive Edilmiş Malzemenin Tarihçesi	7
---------------------------------------------------------	---

2.1.2. Alkali aktive malzeme- Jeopolimer Farkı.....	10
-----------------------------------------------------	----

2.1.3. Alkali Aktive Edilmiş Malzemelerin Mekanizması (Kimyası).....	11
----------------------------------------------------------------------	----

2.1.3.1. Yüksek Kalsiyumlu Alkali Aktivasyon Sistemi ((Na,K) ₂ O-CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O).....	14
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

2.1.3.2. Düşük Kalsiyumlu Alkali Aktivasyon Sistemi ((N,K) ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O).....	17
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

2.2. ALKALİ AKTİVE MALZEME BİLEŞENLERİ	21
----------------------------------------------	----

2.2.1. Puzolanik Malzemeler	21
-----------------------------------	----

2.2.1.1. Doğal Puzolanlar.....	21
--------------------------------	----

2.2.1.2. Yapay Puzolanlar	23
---------------------------------	----

2.2.2. Alkali Aktivatörler.....	24
---------------------------------	----

2.3. ALKALİ AKTİVE MALZEMELERDE LİF KULLANIMI.....	26
----------------------------------------------------	----

2.4. ELEKTROMANYETİZMA VE ELEKTROMANYETİK SPEKTRUM	27
----------------------------------------------------------	----

Sayfa

2.4.1. Elektromanyetik Dalgaların Oluşturduğu Etkiler	29
2.4.2. Elektromanyetik Dalgaların Maddeyle Etkileşimi	30
2.4.3. Elektromanyetik Kalkanlama	31
2.4.4. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması	33
2.4.4.1. Manyetik Malzemelerin Elektromanyetik Kalkanlamaya Etkisi	35
2.5. LİTERATÜR TARAMASI	37
 BÖLÜM 3	 45
MATERYAL VE YÖNTEM	45
3.1. MATERYAL	45
3.1.1. Doğal Puzolan (Tras)	46
3.1.2. Bayburt İli Beyaz Renkli Zeolitik Tüf	47
3.1.3. Mikronize Kalsit (CaCO_3)	51
3.1.4. Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	51
3.1.5. Manyetit	52
3.1.6. Su ve Alkali Aktivatörler	53
3.1.7. Deneylerde Kullanılan Lifler	53
3.2. YÖNTEM	54
3.2.1. Alkali-Aktive Edilmiş Hamurların Üretimi ve Karışım Tasarımı	54
3.2.2. Taze Haldeki Alkali Aktifleştirilmiş Hamur Deneyleri	58
3.2.2.1. Yayılma Tablası Deneyi	58
3.2.3. Sertleşmiş Haldeki Alkali Aktifleştirilmiş Hamur Deneyleri	59
3.2.3.1. Büzülme Deneyi	59
3.2.3.2. Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri	60
3.2.3.3. Su Emme Deneyi	61
3.2.3.4. Elektromanyetik Özellik Ölçümleri	62
3.2.3.5. Mikroyapısal Analizler	64
 BÖLÜM 4	 65
BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	65
4.1. PRİZ SÜRESİ VE YAYILMA TABLASI DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	65

Sayfa

4.2. EĞİLME VE BASINÇ DAYANIMI DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	68
4.2.1. AAH Numunelerinde Ön Deneme Deney Sonuçları ve Değerlendirmeleri.....	68
4.2.2. Nihai (manyetit homojen dağıtıldığı) AAH Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları ve Değerlendirmeleri	71
4.3. ÖZGÜL AĞIRLIK, SU EMME VE GÖRÜNEN POROZİTE SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	86
4.4. BÜZÜLME DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME.....	88
4.5. ELEKTROMANYETİK ÖZELLİK TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	94
4.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM), ENERJİ DAĞILIMLI X-IŞINI SPEKTROSKOPİSİ (EDS) VE X-IŞINI DİFRAKSİYONU (XRD) ANALİZİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	115
 BÖLÜM 5	 128
SONUÇ	128
KAYNAKLAR	131
 ÖZGEÇMİŞ	 142

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Alkali aktive sistemlerle diğer bağlayıcıların karşılaştırılması.	10
Şekil 2.2.	İki aşamalı jeopolimer reaksiyon mekanizması.	13
Şekil 2.3.	Uçucu kül alkali aktivitesinin bir modeli.	13
Şekil 2.4.	Davidovits'in jeopolimer terminolojisi (poli-sialat yapılar).	14
Şekil 2.5.	Alkali ile aktifleştirilen bir cüruf partikülünde reaksiyon mekanizması.	16
Şekil 2.6.	Alümina silikat esaslı malzemelerin polimerizasyon süreci.	20
Şekil 2.7.	Elektrik ve manyetik alan etkileşimi.	28
Şekil 2.8.	Elektromanyetik Spektrum.	29
Şekil 2.9.	Malzeme-EMD etkileşimine dayalı ekranlama etkinliği mekanizması.	32
Şekil 2.10.	Manyetit ve hematit demir oksitlerinin manyetizasyon-sıcaklık eğrisi.	35
Şekil 2.11.	Yayın istatistiği (2000-2021) a) jeopolimer çalışmalarının istatistiği, b) elektromanyetik kalkanlama çalışmalarının istatistiği.	38
Şekil 3.1.	Bayburt ili Yeşil Trasının öğütüldükten sonraki görüntüsü	46
Şekil 3.2.	BYT'nin minerolojik (XRD) analizi.	46
Şekil 3.3.	BYT'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi).	47
Şekil 3.4.	Zeolitik Bayburt beyaz tufünün öğütüldükten sonraki görüntüsü.	48
Şekil 3.5.	BBT'nin minerolojik (XRD) analizi.	48
Şekil 3.6.	BBT'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi).	49
Şekil 3.7.	Kalsit (CaCO_3).	51
Şekil 3.8.	Alüminyum Oksit (Al_2O_3).	51
Şekil 3.9.	Manyetit.	52
Şekil 3.10.	Manyetite ait tane boyutu dağılım analiz sonucu.	53
Şekil 3.11.	a) Polipropilen lif, b) Karbon lif ve c) Çelik lif.	54
Şekil 3.12.	Üretim kombinasyonlarının şematik görünümü.	55
Şekil 3.13.	Yayılma tablası ve yayılma çapı ölçümü.	58
Şekil 3.14.	Büzülme ölçüm aşamaları.	60
Şekil 3.15.	a) Eğilme Dayanımı Testi. b) Basınç Dayanımı Testi.	60
Şekil 3.16.	Su emme deneyi.	62

Şekil 3.17. Elektromanyetik test için kullanılan ekipmanlar: a) Faraday kafesi, b) dalga jeneratörü ve spektrum analizörü (yansıma), c) spektrum analizörü (iletim) ve numune, d) spektrum analizörü.	63
Şekil 3.18. Ekipmanların kurulumu ve kaplamanın elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi.....	63
Şekil 4.1. Yeşil tüf esaslı AAH’lerde yayılma ve priz deneyi sonuçları.	66
Şekil 4.2. Beyaz tüf esaslı AAH’lerde yayılma ve priz deneyi sonuçları.	67
Şekil 4.3. Yeşil tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH’lerin eğilme ve basınç dayanımları.....	72
Şekil 4.4. a) Eğilme dayanımı deneyinde YPD4, b) PP lifin dağılımı.	74
Şekil 4.5. Yeşil tüf esaslı kırılmış karbon lifle güçlendirilmiş AAH’lerin eğilme ve basınç dayanımları.....	74
Şekil 4.6. a) Basınç dayanımı deneyi sırasında YKD8, b) Karbon lifin dağılımı. ..	75
Şekil 4.7. Yeşil tüf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH’lerin eğilme ve basınç dayanımları.....	76
Şekil 4.8. a) Eğilme dayanımı testi uygulanan YÇD2 numunesi, b) Çelik lifin numune içindeki dağılımı.....	77
Şekil 4.9. Yeşil tüf esaslı tüm AAH’lerin eğilme dayanımı deney sonuçları.....	78
Şekil 4.10. Yeşil tüf esaslı tüm AAH’lerin basınç dayanımı deney sonuçları.	78
Şekil 4.11. Beyaz tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH’lerin eğilme ve basınç dayanımları.....	80
Şekil 4.12. a) Eğilme dayanımı deneyi sırasında BPD0, b) PP lifin dağılımı.	81
Şekil 4.13. Beyaz tüf esaslı kırılmış karbon lifle güçlendirilmiş AAH’lerin eğilme ve basınç dayanımları.....	81
Şekil 4.14. a) Basınç dayanımı deneyi sırasında BKD4, b) Karbon lifin dağılımı. ..	83
Şekil 4.15. Beyaz tüf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH’lerin eğilme ve basınç dayanımı sonuçları.	83
Şekil 4.16. a) Eğilme dayanımı deneyi sırasında BÇD8, b) Çelik lifin dağılımı.	84
Şekil 4.17. Beyaz tüf esaslı tüm AAH’lerin eğilme dayanımı deney sonuçları.	85
Şekil 4.18. Beyaz tüf esaslı tüm AAH’lerin basınç dayanımı deney sonuçları.....	85
Şekil 4.19. AAH’lerin eğilme dayanımı/basınç dayanımı verileri.	86
Şekil 4.20. Beyaz tüf esaslı AAH’lerin 2, 28 ve 90 günlük su emme deney sonuçları.	87
Şekil 4.21. Yeşil tüf esaslı PP lif takviyeli AAH’lerin büzülme sonuçları.	89
Şekil 4.22. Yeşil tüf esaslı karbon lif takviyeli AAH’lerin büzülme sonuçları.....	90
Şekil 4.23. Yeşil tüf esaslı çelik lif takviyeli AAH’lerin büzülme sonuçları.	91

Şekil 4.24. Beyaz tuf esaslı PP lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.....	92
Şekil 4.25. Beyaz tuf esaslı karbon lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.	92
Şekil 4.26. Beyaz tuf esaslı mikro çelik lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.	93
Şekil 4.27. Yeşil tuf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.....	95
Şekil 4.28. Yeşil tuf esaslı ve PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.....	96
Şekil 4.29. Yeşil tuf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.....	97
Şekil 4.30. Beyaz tuf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.....	97
Şekil 4.31. Beyaz tuf esaslı ve PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıtma özellikleri.	99
Şekil 4.32. Beyaz tuf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.....	99
Şekil 4.33. Yeşil tuf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.	100
Şekil 4.34. Yeşil tuf esaslı ve karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıma özellikleri.	101
Şekil 4.35. Yeşil tuf esaslı ve karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.	102
Şekil 4.36. Beyaz tuf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.	103
Şekil 4.37. Beyaz tuf esaslı ve karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıma özellikleri.	104
Şekil 4.38. Beyaz tuf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.	105
Şekil 4.39. Yeşil tuf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.	105
Şekil 4.40. Yeşil tuf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıma özellikleri.	106
Şekil 4.41. Yeşil tuf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.	107
Şekil 4.42. Beyaz tuf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.	108
Şekil 4.43. Beyaz tuf esaslı ve çelik lifle takviye edilmiş kaplamaların elektromanyetik dalga yansıma özellikleri.....	109
Şekil 4.44. Beyaz tuf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.	110

Şekil 4.45. Yeşil tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar. ...	111
Şekil 4.46. Yeşil tüf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar. ...	111
Şekil 4.47. Yeşil tüf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar. ...	112
Şekil 4.48. Beyaz tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar. ...	112
Şekil 4.49. Beyaz tüf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar. ...	113
Şekil 4.50. Beyaz tüf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar. ...	113
Şekil 4.51. Hesaplama sonucu tüm gruplarda absorbe edilen EMD enerjisi.	114
Şekil 4.52. YPD8 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.	116
Şekil 4.53. YPD8 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.	117
Şekil 4.54. YKD0 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.	118
Şekil 4.55. YKD0 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.	118
Şekil 4.56. YÇD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.	119
Şekil 4.57. YÇD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.	120
Şekil 4.58. BPD2 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.	121
Şekil 4.59. BPD2 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.	121
Şekil 4.60. BPD8 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.	122
Şekil 4.61. BPD8 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.	123
Şekil 4.62. BKD0 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.	124
Şekil 4.63. BK-D0 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.	124
Şekil 4.64. BÇD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.	125
Şekil 4.65. BÇD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.	126

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Alkali aktivite bağlayıcılarla ilgili önemli tarihsel gelişmeler.....	9
Çizelge 2.2. Çeşitli bağlayıcılarla oluşan birincil ve ikincil reaksiyon ürünleri.	16
Çizelge 2.3. Çeşitli liflerin sahip olduğu özellikler.	27
Çizelge 2.4. Maddelerin manyetik özellikleri bakımından sınıflandırılması.....	33
Çizelge 3.1. BBT ve BYT'nin fiziksel ve mekanik özellikleri.	49
Çizelge 3.2. BBT, BYT ve kalsitin kimyasal özellikleri.	50
Çizelge 3.3. BBT, BYT ve kalsitin özgül ağırlık, özgül yüzey alan ve incelik (elek analizi) değerleri.	50
Çizelge 3.4. Manyetitin (ferroferrik oksit) kimyasal özelliği.	52
Çizelge 3.5. Na_2SiO_3 'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri.	53
Çizelge 3.6. Polipropilen, karbon ve çelik lifin teknik özellikleri.	54
Çizelge 3.7. BYT esaslı AAH kompozit numunelerin karışım tasarımı.....	56
Çizelge 3.8. BBT esaslı AAH kompozit numunelerin karışım tasarımı.	56
Çizelge 4.1. Lifle güçlendirilmiş AAH'lerin priz süreleri ve yayılma çapı değerleri.	65
Çizelge 4.2. Deneme numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları ve BHA'ları.	69
Çizelge 4.3. Topaklı grupların BHA, eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları. .	70
Çizelge 4.4. Yeşil tüf esaslı AAH numunelerin BHA, eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları.	71
Çizelge 4.5. Beyaz tüf esaslı AAH'lerde eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları.....	79
Çizelge 4.6. Sertleşmiş hamurların su emme deney sonuçları.....	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

CO_2	: Karbondioksit
%	: Yüzde
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat Derece
kg	: Kilogram
m	: Metre
cm	: Santimetre
mm	: Milimetre
μm	: Mikrometre
s	: Saniye
Ç/T	: Çözelti/Toz
M	: Molar
SiO_2	: Silis
Al_2O_3	: Alümina
NaOH	: Sodyum Hidroksit
Na_2SiO_3	: Sodyum Silikat (Cam Suyu)
CaCO_3	: Kalsiyum Karbonat
$\text{Ca}(\text{OH})_2$: Kalsiyum Hidroksit
Fe_2O_3	: Demir Oksit
Fe_3O_4	: Manyetit (Demir (II,III) Oksit)
MPa	: Megapaskal
MHz	: Megahertz
GHz	: Gigahertz
dB	: Desibel
T_c	: Curie Sıcaklığı
M_s	: Doyum Manyetizasyonu

KISALTMALAR

PÇ	: Portland Çimentosu
AAM	: Alkali Aktive Malzeme
AAH	: Alkali Aktive Hamur
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
UK	: Uçucu Kül
MK	: Metakaolin
ZT	: Zeolitik Tüf
BYT	: Bayburt Yeşil Trası
BBT	: Bayburt Beyaz Tüfü
PP	: Polipropilen
CSH	: Kalsiyum Silikat Hidrat
NASH	: Sodyum Alümina Silikat Hidrat
CASH	: Kalsiyum Alümina Silikat Hidrat
ASTM	: Amerika Standart Test Metodu
MTA	: Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü
EMA	: Elektromanyetik Alan
EMD	: Elektromanyetik Dalga
EMS	: Elektromanyetik Spektrum
SE	: Ekranlama Etkinliği
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X-Işınları Difraksiyonu
EDS	: Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Enerji ve hammadde kıtlığı ile birlikte teknolojinin hızla ilerlemesi sebebiyle yapı malzemelerinin iklim değişikliği üzerindeki etkileri ile birlikte bazı mühendislik özellikleri her geçen gün önem kazanmaktadır. Günümüzde tatmin edici mekanik ve fiziksel özelliklere sahip, çevresel etkilere karşı dirençli bir malzeme üretiminin yanı sıra kullanılan bu malzemenin insan sağlığı ve güvenliği açısından fayda sağlaması beklenmektedir. Çevre dostu bir yapı malzemesinin gelişen teknolojinin oluşturabileceği tehditlere de kalkan olması sağlanmalıdır [1].

Çimento üretilirken klinkerin silisyum, alüminyum, kalsiyum, demir oksit ve diğer bazı maddeler bulunduran hammaddelerinin yüksek sıcaklıklarda (1300-1400°C) pışırılması gerektiği için ciddi kapsamda enerji tüketimine ihtiyaç duyulur. Bu enerji çelik, alüminyum vb. malzemelere göre oldukça fazladır. Aynı zamanda, dünyada CO₂ salınımının %7'si çimento üretimiyle olmaktadır. Gittikçe artan üretimin bu değeri artıracığı düşünülmektedir [2-4]. 1 ton çimentodan yaklaşık 820 kg CO₂ açığa çıkmaktadır. Bu durum karbon ayak izini artırarak küresel ısınmanın tetiklenmesine neden olmaktadır [5,6]. İklim değişiklikleri belirir, yer yüzeyi ısınır ve buzullar eriyerek deniz seviyesini yükseltir, dolayısıyla insan sağlığı ve ekolojik denge bu tehditlerle önemli ölçüde karşı karşıya kalmaktadır.

Dünyada hava kirliliğinin artması, özellikle ülkemizde çimento üretim tesislerinin piyasadaki çimento tüketim oranından çok daha fazla üretim yapmasıyla CO₂ salınımının artan eğilimi çevre duyarlılığını da arttırmaya başlamıştır. Bu emisyonların oluşturduğu zararlı etkiler kapsamındaki farkındalığın sonucu olarak bilim insanları, geçmiş tarihte de kullanılan ve günümüzde çimentonun yerine ya da bir kısmı yerine geçebilecek daha çevreci bir bağlayıcı malzemelerin yeniden gündeme gelmesini sağlamışlardır. Ayrıca, bunu hedeflerken tatmin edici mekanik

ve durabilite özelliklerini de göz ardı etmemişlerdir [7,8]. Endüstriyel atık ürünlerin veya doğal puzolanların kullanımıyla daha düşük emisyonlu, yüksek performanslı ve düşük enerjili yeni alternatif bağlayıcılar geliştirilmeye ve kullanılmaya çalışılmaktadır. Bu alternatif bağlayıcılardan biri de alkali aktive malzemelerdir (AAM). AAM üretiminde açığa çıkan CO₂, normal Portland çimentosu (PÇ) üretimi sırasında açığa çıkandan %80 daha azdır ve atık maddelerin kullanımıyla tesislerdeki depo ve alan işgali ciddi derecede önlenmiş olunacaktır [1].

Başlangıçta ilk kapsamlı alkali-cüruf çalışmaları Purdon tarafından 1940’larda yapılmıştır. Ancak, alkali aktivite kapsamında birçok çalışma 1967’de Glukhovsky’nin alkali bağlayıcıların ana bileşenlerini keşfetmesinden sonra yapılmıştır. İlerleyen süreçlerde üretimlerde çeşitli alüminosilikat kaynaklı malzemelerin kombinasyonlarının kullanılabilirliği tespit edilmiştir [9–12]. Geopolimer terimi ise, Davidovits’in yaptığı çalışmalarla birlikte polimerizasyon safhalarını incelemesi ve belirtmesiyle 1979’dan sonra ilk defa kullanılmıştır [13]. Davidovits ve Sawyer, alkali ile aktifleştirilmiş cüruf ve jeopolimer bağlayıcıların doğasını tanımlamada büyük aşama kaydetmiştir. Bu tür bağlayıcılar, ABD’de Pyrament ticari adı altında pazarlanmış ve yıllarca kullanılmıştır [9,14].

AAM, çeşitli alümina-silikatlı hammaddelerin alkali çözeltilerle aktive edilmesiyle oluşan geopolimerizasyon reaksiyonlarının sonucu sertleşme eğilimindeki bir malzemedir. AAM’nin üretiminde Yüksek Fırın Cürufu (YFC), Metakaolin (MK), Uçucu Kül (UK), Pirinç Kabuğu Külü, Kırmızı Çamur ve Zeolitik tuf gibi birçok yaygın katı alümina-silikat kaynağı kullanılabilir [15,16]. Alkali-aktivatör teknolojisinin en dikkat çekici özelliği, hem endüstriyel yan ürünlerin (kül, cüruf veya kâğıt çamuru vb.) hem de doğal malzemelerin (kil veya feldspat vb.) ana bileşen dahilinde kullanılabilmesidir. Alümina ve silika içerikli her malzeme teoride alkalilerle aktive edilebilmekte ve bu sayede bağlayıcılık özelliği kazanabilmektedir [17]. Geopolimerizasyon reaksiyonları, doğada volkanik kayaç oluşum mekanizmasıyla benzerlik gösterir. Doğada süregelen çeşitli doğal taş oluşum aşamalarında önemli rol üstlenen alkaliler eski yapılarda ve çimentoda var olan bileşenlerdir [4,17]. Glukhovsky’e göre alkali bileşenler hidrolik bağlanma özellikleri bakımından periyodik tablonun 1A grubundaki alkali metal (Li, Na, K,

Rb, Cs) elementleriyle alkali toprak metalleri olan 2A grubu elementleridir (Mg, Ca, Sr, Ba) [18]. Alkali aktivatörler tek ya da kombinasyon halinde kullanılabilir. En yaygın kullanılanları sodyum hidroksit (NaOH), sodyum silikat (Na_2SiO_3), sodyum sülfat (Na_2SO_4), sodyum karbonat (Na_2CO_3), potasyum hidroksit (KOH) ve kalsiyum hidroksittir ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) [6–8,19]. Alümina-silikatlı hammaddelerin alkali aktivesi sonucu oluşan reaksiyon ürünleri normal PÇ hidratasyon ürünlerinden farklıdır. PÇ hidratasyon ürünü kalsiyum silikat hidratken (CSH), geopolimerizasyon sonucu sodyum alümina-silikat hidrat (NASH) ve kalsiyum alümina-silikat hidrat (CASH) oluşur. Ayrıca, tepkime safhalarında hidrotalsit, hidrosodalit ve bazı kristal fazlar oluşabilir [20–22].

AAM ve PÇ ile üretilen betonlar karşılaştırıldığında AAM'nin yapısal betondan daha iyi özelliklerde olduğu görülmüştür. Erken dayanımı ve dış etkilere dayanıklılığı (kimyasal etki, karbonatlaşma etkisi, yüksek sıcaklık etkisi, donma-çözülme döngüsü vb.) daha yüksektir [22,23]. Ancak sıcaklık-kür süresi, konsantrasyon, polimerizasyon derecesi, aktivatör kombinasyonu ve oranları gibi faktörler malzemenin performansını önemli derecede etkiler [24]. AAM'de, PÇ betonu gibi bazı nedenlerle çatlamaya meyilli ve kırılgan bir yapı görülebilir. Çekme dayanımı az olduğu için çatlamaya dirençsizdir ve bu durum malzemeyi dış etkenlere karşı zayıflatır, böylece kalıcılığını yitirmesine, bütünlüğünü kaybetmesine neden olur [8,25]. Bunu engellemenin yollarından biri lif kullanımıdır. Karışımda lif kullanımı çekme dayanımını artırır, rötre çatlaklarını önler ve çatlak oluşsa bile gelişiminin önüne geçilebilir. Böylece dış etkilere karşı dayanıklılıkta artırılmaktadır. Lif aynı zamanda oluşan gerilmeyi malzemeye eşit şekilde dağıtmakta, yapıya süneklik kazandırmakta ve kırılgan özellik etkisini yitirmektedir [26].

Günümüzde doğal ya da yapay elektromanyetik dalgalar hayatın her noktasında insanları kuşatmış, maruz kalınmayan bir ortam neredeyse kalmamıştır. Olumlu taraflarının yanı sıra giderek artan tehditleri insan sağlığını ve ekosistemi olumsuz yönde etkileyeceğini düşündürmektedir. İyonlaştırıcı etkiye sahip yüksek enerjili elektromanyetik dalgalar (EMD) sağlık açısından çok tehlikeli olup birçok maddeden geçebilir. İnsan dokusuna nüfuz edip kimyasal yapısını bozabilir. Ancak, zararsız olarak bilinen düşük frekanslı, düşük enerjili dalgaların da meydana getirdiği etki

azımsanmamalı, cep telefonları, bilgisayarlar, radyolar gibi elektronik cihazların ve Wi-Fi, Bluetooth gibi teknolojilerin fazla kullanımıyla oluşan elektromanyetik kirlilik, uzun süre maruz kalındığı takdirde insanın metabolizmasında bazı olumsuz etkiler oluşturabilmektedir [27,28].

EMD tarafından oluşan riskin bir kısmı yada tamamı yapı malzemeleriyle engellenebilir. Yüksek enerjili radyasyonları soğurucu-yansıtıcı tasarılar yapılmış ve günümüzde kullanılmaktadır. Örneğin; hastanelerin X ışını bulunan odalarının duvarları kurşun ile kaplanmakta, nükleer santrallerin bazı bölümleri iri agregalı (hematit, barit vb.) kütle betonuyla inşa edilmektedir [29,30]. Bunun yanında, çimento ile uyumlu ancak maliyetleri yüksek metal elyaf, ferritler, grafit, grafen oksit, karbon nanotüpler, karbon filament ve karbon elyaf malzemelerinin elektromanyetik emici özellikleri vardır. [31]. Düşük enerjili EMD'ların tepkileşecek enerjisi bile olmadığı için her yerden rahatlıkla geçebilir. Soğurulması-yansıtılması ile ilgili özveri ve ciddi bir çalışma gerektirir. Literatür araştırması sonucu, önceki çalışmalarda AAM'nin fiziksel, mekanik, termal niteliklerine odaklanılmış olup özellikle manyetik malzeme kullanılarak elektromanyetik özelliklerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmaya rastlanılmamıştır.

Maddelerin manyetik özellikleri manyetik momentlerinin durumu itibarıyla çeşitlilik göstermektedir. Diya ve paramanyetik malzemeler kalıcı manyetizasyon özelliği sergilemezken ferromanyetik malzemeler aksine manyetik alan yokluğunda da mıknatıs özelliğini korur. Ferromagnetlerin mıknatıslanma işleyişine benzer şekilde antiferromagnet ve ferrimagnet olmak üzere iki türü mevcuttur. Ferromagnetler, belli bir karakteristik Curie sıcaklığının üzerinde paramanyetik etkisine sahip olur [32]. Manyetik malzemelerin elektromanyetik dalgaları kalkanlama etkinliği günümüzde çalışmaya devam edilen bir konu olup bu kapsamda manyetik geçirgenlikleri, elektrik iletkenlikleri, manyetik dipol yoğunlukları, kristal yapıları gibi faktörler belirleyici olup dalgaların yansıtılması, soğurulması ve saçılması yönünden oldukça önemlidir [33]. Seçilen maddenin kalkanlama etkisini ne açıdan sağlayacağı, kompozit malzemedeki diğer ürünlerle uyumu ve mekanik-fiziksel bağlamda oluşturacağı etkiler ciddi şekilde önem arz etmektedir.

Yapılan literatür taraması doğrultusunda ferromanyetik demirin AAM’de Elektromanyetik Alan (EMA) etkileri ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Bundan dolayı bu çalışmanın araştırma sorusu “Ferromanyetik demir, AAM’lerin elektromanyetik kalkanlama etkisini iyileştirir mi?” olarak oluşturulmuştur. Bu kapsamda, çalışmanın hipotezi “AAM’lerde ferromanyetik demir, elektromanyetik kalkanlama etkisini artırır” biçiminde kurulmuştur.

BÖLÜM 2

KURAMSAL TEMELLER

2.1. ALKALİ AKTİVE EDİLMİŞ MALZEME

İlk olarak “alkali” şeklinde adlandıran ve sonrasında alkali çimentolar ismiyle çimento esaslı yeni bir malzemenin geliştirilmesi için çabalayan Glukhovsy, günümüzdeki birçok çalışmaların da öncüsüdür. Bu bağlayıcılar, kimya alanıyla birlikte çevre dostu, yüksek performanslı malzemeler olduğu için mühendislik dallarının da ilgisini çekmiştir. Sürdürülebilir bir çevre koruması, çimentoya alternatif bir yapı malzemesi üretimi için yapılan çalışmalar son otuz yıldır hız kazanmıştır. Son yıllarda yüksek performanslı seramik ve kompozit malzemelerinin üretiminde çimento esaslı bağlayıcılar yerine kullanılabilen bu malzemeler sentetik alümina-silikat sınıfına girer [13,34]. Alümina-silikatlar, ana oksitleri silisyum oksit (SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) olan, kristal yapı, kimyasal bileşim, yoğunluk ve sertlikte çeşitlilik gösterebilen minerallerdir.

Dünyada en yaygın elementler silis ve alüminyumdur. Yer kabuğun %75’inden fazlası alümina-silikatlardan oluşur. Silis +4, Alüminyum +3 yükseltgenmeye sahiptir. Normal şartlarda silis atomu neredeyse her zaman 4 oksijen atomuna bağlı tetrahedral yapıdadır (SiO_4) ve silikat minerallerini meydana getirmek için bir oksit iyonunu ortadan kaldırıp bir başkasını paylaşarak birbirlerini polimerize etme yeteneğine sahiptirler. Polimerizasyon sürecinde Si:O oranı ortosilikatlar için 1:4’ten, çerçeve yapı için 1:2’ye düşer. Çerçeve yapısındaki her O atomu her iki silis atomunca paylaşılır. Alüminyum ise oldukça elektropozitif bir element olup daima elektron verip katyon olma eğilimindedir [21].

Jeolojik oluşumlu kayaçların, içinde Al ve Si bulundurup alkali ortamda bağlayıcılık niteliği kazandıkları ve bu reaksiyonların da doğal kayaç oluşum mekanizmasına

benzer özellik gösterdiği için birçok toprak mineral esaslı ürün patenti bulunan Davidovits, bu kimyanın termoset polikondensasyon esaslı polimer kimyasına benzediğini belirtmiştir. Yüksek pH'lı alkali bir ortamda, alüminatlarla organik kimya ürünü polimerlerdeki karbon atomu yerine geçen kuartz (Si) moleküllerinin, polikondenzasyona uğraması bir başka tanımlamadır [35]. Alkali aktive edilen ve süregelen reaksiyonlar sonucu elde edilen jeopolimer malzeme sahip olduğu üstün fiziksel ve kimyasal özellikler sebebiyle taşıyıcı yada taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, prefabrik yapı endüstrisi, beton esaslı yol kaplamaları, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, zemin iyileştirme, heykeltçilik ve süsleme sanatları, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, refrakter seramik malzeme üretimi vb. birçok alanda kullanılabilmektedir. Bu malzemelerin avantajları; hammadde kaynaklarının bol olması, basit hazırlama yöntemi, enerji tasarrufu ve çevre korunumu, iyi hacim kararlılığı, kısa sürede dayanım, mükemmel dayanıklılık ve düşük ısı iletkenliğinden kaynaklanmaktadır [13,36].

2.1.1. Alkali Aktive Edilmiş Malzemenin Tarihçesi

AAM'lerle ilgili ilk yayınlanan çalışma Alman kimyager Kühl tarafından 1908'de yapıldı. Kühl, alkali bileşen ve yüksek fırın cürufunun karışımlarından elde ettiği bağlayıcının davranışını gözlemledi. Çalışma başlangıçta ilgi görse de , belli bir zamanın ardından bu ilgisini yitirmiştir [14]. 1940'ta Purdon'un yaptığı detaylı çalışmada yüksek fırın cürufunun farklı kimyasal aktivatörlerle etkileşimini incelemiş, çeşitli alkali-cüruf kombinasyonlarını ele almıştır. Ayrıca, kombinasyonlarda denediği alkali hidroksitlerin aktivatör görevi yaptığı kanısına varmıştır [2,10,14].

1959'da Victor Glukhovsky, ilk olarak alkali sonrasında bileşenleri doğal maddeler olduğu için "alkalin çimento" şeklinde adlandırdığı çimento esaslı bu yeni malzemenin geliştirilmesi doğrultusunda ilk adım olarak kabul edilen bu varsayımı sunmuştur. Bu malzemenin uygulamadaki pratikliği ve gösterdiği yararlar sonucu bu varsayım günümüze kadar herkesin kabul ettiği bir gerçek haline gelmiştir [12]. Alkali aktive edilmiş çimento esaslı malzemelerin, alümina-silikat bileşeni tipi ve

alkali miktarının bir fonksiyonu oluşu ifade edilmiştir. Glukhovsky, aynı zamanda eski tarihlerde kullanılan bağlayıcıları araştırmak için Mısır ve Roma yapılarını gözlemlemiş, kalsiyum alümina-silikat hidrat ve doğal kayaç kristal fazlarının olduğunu bunun da önceki yaptığı çalışmalardan elde ettikleriyle benzer bulmuştur ve bu bağlayıcı malzemeye “toprak çimentosu” adını vermiştir [10,17].

Davidovits, bu inorganik kimya ürününe doğal kayaç yapısına benzer şekilde içinde bolca toprak mineralleri barındırdığı ve polikondensasyon reaksiyonlu polimer kimyasıyla eşdeğer özellik gösterdiği için 1979 yılında kalsine kilin aktive edilmesiyle elde ettiği bağlayıcıya “jeopolimer” adını vermiş ve patent almıştır [3,7,37]. Bu zamandan itibaren bu isim alkali aktive sistemleri için genel bir ifade olmuş, alümina-silikat yapılı alkali bağlayıcılar için kullanılmıştır. Davidovits sahip olduğu jeopolimer bağlayıcının ticari ismini “Pyrament” koyarak satışa sunmuş, aynı kategoriye giren ve daha sonra üretilen Forss’un “F-cement” ve Krivenko’nun “geocements” ürünleri de benzer özelliklere sahiptir [8,10]. Ayrıca, Davidovits’e göre jeopolimer bağlayıcılar eski Mısır Piramitleri inşasında ve Roma yapılarında kullanılmış hatta minerolojik ve kimyasal incelemeler sonucu bağlayıcıların kalsiyum hidroksit, sodyum karbonat, kireçtaşı ve su bulundurduğunu belirtmiştir [35]. İnsanlık ve bilim tarihi için çok önemli olan bu çalışmanın ardından bu alandaki çalışmaların sayısı gittikçe artmış, birden fazla ulusal konferans organize edilerek birçok yayın sunulmuştur. Her geçen gün AAM’lerin incelenmesi ve geliştirilmesi doğrultusundaki çalışmalar artmış, bu alan araştırmacılar tarafından oldukça aktif hale gelmiştir [20]. 1979 yılı itibarıyla tarihsel süreçteki yapılan bazı önemli çalışmalar Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

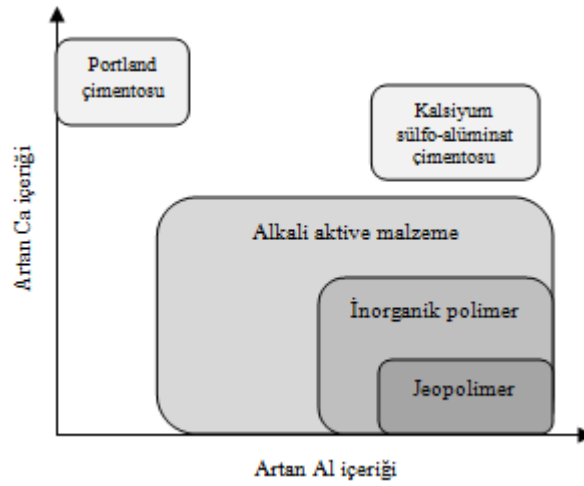
Çizelge 2.1. Alkali aktivite bağlayıcılarla ilgili önemli tarihsel gelişmeler [22,38].

Forss	1983	F çimentosu (cüruf-alkali-süper akışkanlaştırıcı)
Davidovits ve Sawyer	1985	Pyrament patenti
Krivenko	1986	$R_2O-RO-R_2O_3-SiO_2-H_2O$
Davidovits	1987	Antik ve modern çimentoların karşılaştırılması
Kausal ve diğerleri	1989	Zeolit oluşumu içerikli alkalin karışımlarından adiabatik kür edilmiş nükleer atık oluşumu
Talling ve Brandstetr	1989	Alkali aktive edilmiş cüruf
Roy ve diğerleri	1991	Hızlı priz alma özelliğine sahip alkali aktive bağlayıcılar
Glukhovsky	1994	Antik, modern ve gelecekteki betonlar
Krivenko	1994	Alkalin bağlayıcılar
Wang ve Scrivener	1995	Alkalilerle aktive edilmiş cürufun mikroyapısı
Fernandez, Jimenez ve Puertas	1995	Alkali ile aktifleştirilmiş cürufun reaksiyon kinetiği
Katz	1998	Alkali aktive edilmiş uçucu külün mikroyapısı
Davidovits	1999	Mineral polimerizasyon sürecinin incelenmesi
Puertas	2000	Uçucu kül ve cürufllu çimentonun alkali aktivasyonu
Provis ve Deventer	2005	Jeopolimerlerde nano kristallik
Lothenbach ve diğerleri	2011	Alkaliyle aktifleştirilmiş cüruf hidrasyonu üzerinde cüruf kimyasının etkisi
Provis ve Deventer	2014	Alkali aktive malzemeler: Son durum raporu
BSI	2016	Alkali ile aktifleşen çimentolu malzeme için şartname

Eski yapılarda kullanılan bağlayıcı çimentonun içinde bulunan alkali metal bileşiği yoğunluğu bu malzemeleri günümüzdekinden daha dayanıklı yapmaktadır. Alümina silikat kaynaklı doğal zeolitlerin kalsiyum silikat hidrat oluşturduğu gözlenmiş ve meydana gelen malzemenin de yapı malzemesi ve çimento endüstrisinde önemli bir yer tutacağı belirtilmiştir [17]. Jeopolimer betonun patentlenmesi sonucu devletler bu alandaki araştırmalara destek sağlayıp yatırım yaparak bu teknolojinin gelişmesine katkı sağlamaya çalışmışlardır. AAM'ler belli bir zamandan sonra Orta ve Doğu Avrupa'da bazı ülkelerce kullanılmış, kullanıldığı kaldırım, otoyol kaplaması ve bazı prekast elemanlar yıllarca hasara uğramadan hizmet vermiştir. Ayrıca binalarda taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan bölümlerde kullanılmaya başlanmış ve bunlar iyi durumda kalarak etkili olmuştur [39].

2.1.2. Alkali aktive malzeme- Jeopolimer Farkı

Bilim adamları ortak ve kanıtlanmış bir görüş dahilinde, alkali aktive malzemelerin polimer olmadığı için jeopolimer olarak adlandırılmasının hata olduğunu aynı zamanda bazı terimlerle ilgili (ör; alkali agrega reaksiyonu-alkali ile aktifleştirilen çimento) anlam karışıklığına neden olabileceğini belirtmektedir. Jeopolimer ve AAM kimyası birbirinden çok farklıdır. Jeopolimer ifadesi geniş bir terimdir ve alkali aktivasyon geopolimerizasyonun ilk safhasını oluşturur. Bundan dolayı jeopolimer malzemeler AAM'lerin bir alt kümesi olarak dikkate alınmaktadır (Bknz Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Alkali aktive sistemlerle diğer bağlayıcıların karşılaştırılması [40].

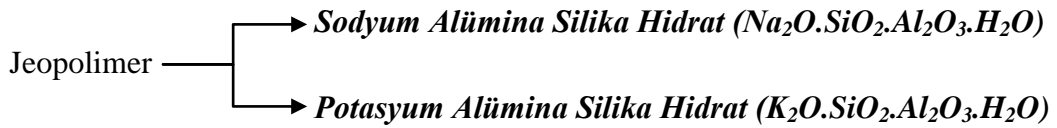
Jeopolimerizasyonun temel ilkesi kristal ya da inert alümina silikat minerallerinin çeşitli aktivatör çözelti içinde tamamıyla çözünmesi işlemidir. AAM'ler küçük moleküllü yapıya sahipken jeopolimerler makro moleküler (polimer) yapılardır [11,21]. Bunlar, oligomerlerin polikondensasyon reaksiyonu sonucu polisialat oluşturduğu, NASH (sodyum alümina silika hidrat) ve KASH (potasyum alümina silika hidrat) esaslı yapılardır. Alümina silikat esaslı jeopolimer bağlayıcılara kıyasen kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg) iyonları içeren bağlayıcıların daha karmaşık bir kimyası olup NASH'dan başka CSH ve CASH (kalsiyum alümina silika hidrat) jelleri de üretebilirler.

AAM ve jeopolimer malzeme için alümina silikatlı hammadde öncüleri farklı özelliklere sahiptirler. Alkaliler ile aktifleştirilmiş malzemeler daha kapsamlı olduğu,

jeopolimerlerin bu grubun bir alt kümesi olduğu varsayılmaktadır ve bunların Ca ve Al içerikleri farklı olabilir. Jeopolimerler Ca bakımından en düşük, ancak Al içeriği bakımından en yüksek orana sahip yapılardır [22,23,41]. PÇ kimyası AAM ve jeopolimerden farklı olarak ana bileşenlerin suyla hidrasyonu sonucu CSH (kalsiyum silikat hidrat) oluşumu ile sonlanmaktadır. Bilim adamları, alkali ile aktifleştirilmiş çimento bağlayıcılarını jeopolimer için kalsiyumun yerine potasyum ve sodyum kullanarak elde etmektedir. Jeopolimerler için de bu elde NASH ve KASH şeklindedir [42].

Portland çimentosu → ***Kalsiyum Silikat Hidrat ($CaO.SiO_2.H_2O$)***

Alkali aktive malzeme → ***Ca yerine Na ve K ile***



Bu kapsamda jeopolimerlerin oluşum şeması ve sıralaması aşağıda maddeler halinde şu şekilde verilmektedir:

1. Alkali aktivasyon (alkalinasyon)
2. Silikatların depolimerizasyonu
3. Oligosialatların jel formasyonu
4. Polikondansasyon
5. Ağ yapısı oluşumu
6. Jeopolimerlerin katılaşması

2.1.3. Alkali Aktive Edilmiş Malzemelerin Mekanizması (Kimyası)

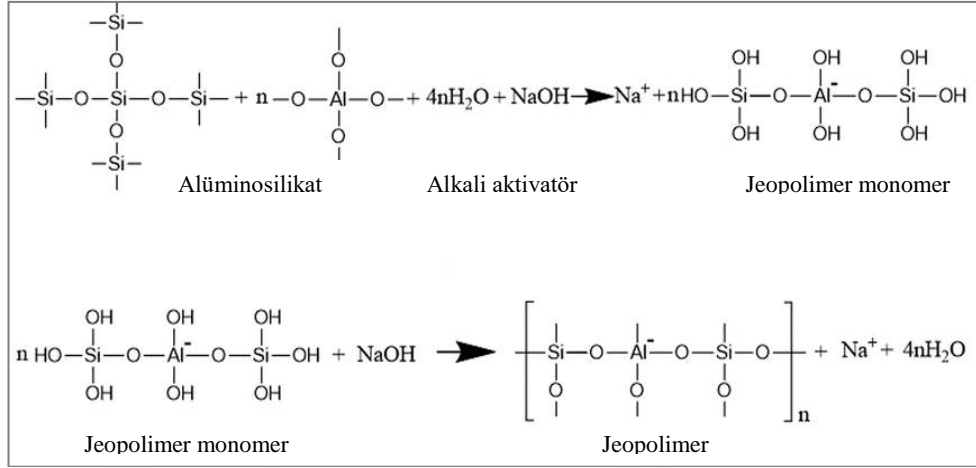
AAM'ler alümina silikatlı hammaddelerin alkalilerle aktivasyonu sonucunda zamanla sertleşerek mukavemet kazanırlar. Alkali aktivasyon teknolojisinde alümina silikat kaynağı olarak cüruf, uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünler ile metakaolin, volkanik tüf gibi doğal ürünler kullanılabilir. Malzemenin sertleşme sürecinde jeopolimerleşme reaksiyonları oluşmalıdır. bu aşamada silisyum molekülleri yüksek

pH'lı alkali ortamda alüminatlarla birlikte çözünür, taşınır, yönelmelerle birlikte bir nevi çoklu yoğunlaşma olan polikondensasyon davranışlarını kapsayan, ekzotermik bir kimyasal proses meydana gelir [24,40]. Monomerler arası bağlar, ısı ve kimyasal etkilerle değişir ve atomların sahip olduğu enerji düzeyleri farklılaşır. Oda sıcaklığında başlayan reaksiyonların ardından karışımdan sonra çeşitli müdahalelerle polimerizasyon süreci uzatılabilir. Seramik malzeme üretiminde uygulandığı üzere malzemeye uygulanan fırınlama işlemi karbonlu bileşikleri ve boşluk suyunu ayrıştırır ve bünyedeki mineral elementlerin enerji düzeyini artırarak kolay bir şekilde iyonize olmalarını sağlar [8,43].

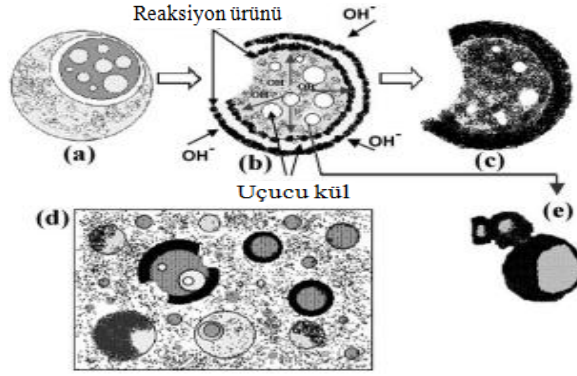
Genel olarak jeopolimer, alümina silikatlı malzemelerde bulunan silis ve alümin atomlarının oksijen atomlarıyla elektronlarını paylaşarak kovalent bağlı bileşik oluşturmasına dayanır. Üç boyutlu bağ yapısındaki silikatlar (SiO_2) normalde oldukça kararlı bileşikler olmasına rağmen alkali ortamdayken bu bağlar zayıflar ve sonuç olarak kovalent bağlı Si-O-Al ve Si-O-Si gibi jeopolimerlerin ana bileşenleri oluşarak süreç devam eder [39,41,42,44]. Daha sonra bu bağlar monomerleri meydana getirir. Monomerler oligomerlere dönüşür, oligomerler silikat polimer halini alır. Alümina silikat ve alkali arasındaki reaksiyon sonucu oluşan jeller oksijen atomlarını ortaklaşa kullanarak kovalent bağ yapan SiO_4 ve AlO_4 tetrahedral yapısını oluşturur. Matrisin yük dengesi Na^+ , K^+ ve Ca^{2+} vb. ilave katyonlarca elde edilir. Ayrıca, ek olarak hammaddeye uygulanacak ısıtma ile reaksiyonlar hızlanarak sialat miktarı arttırılabilir [3,45].

Jeopolimer sentezinin iki adımda meydana geldiği Davidovits tarafından şekildeki denklemde gösterildiği gibi ifade edilmiştir. Bu kapsamda;

- 1) Hidroksit iyonlarının etkisiyle Si ve Al atomları hammaddeden çözünür ve sonuçta öncü iyonlar oluşur.
- 2) Hammadde iyonları monomerlerine yoğunlaşır ve monomerler polimerize olur. (polimerizasyon gerçekleşir).

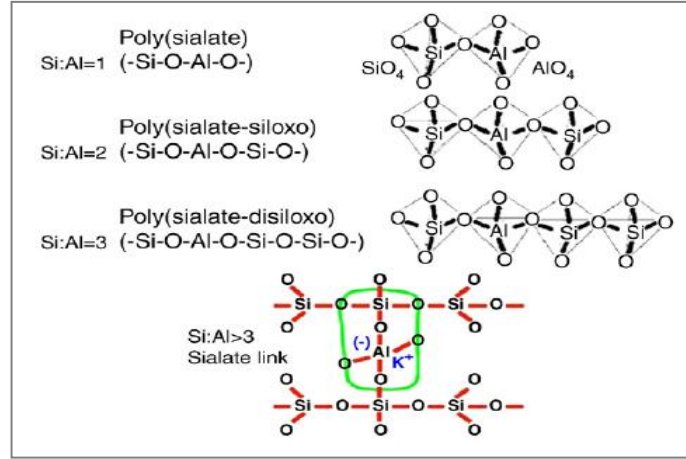


Şekil 2.2. İki aşamalı jeopolimer reaksiyon mekanizması [46].



Şekil 2.3. Uçucu kül alkali aktivitesinin bir modeli [47].

Jeopolimer oluşumunda düşük ya da gelişmiş teknolojiye molekül yapısını belirleyen ana etken, jeolojik toprak kaynağı ile aktifleştirici rolü üstlenen alkali silikatların oranıdır (Si/Al). Tepkimelerdeki ham madde ve alkali çözelti içeriğindeki sialat ve aluminat Si/Al molar oranı meydana gelecek kristal yapıya ve dolayısıyla malzeme özelliklerine etki eder. Bu oran 1 ise zeolit kristaline benzeyen seramik ve yangından koruyucu malzemeler; 2 ise seramik-amorf arası özellikte jeopolimer çimento ve beton senteziyle birlikte radyoaktif atıkları istifleme için ihtiyaç duyulan yapılar, 3 olduğunda yüksek ısılara dayanıklı kaplamalar ve 1000 °C'a karşı dirençli malzemeler, oran 3'ün üstüne çıktığında dolgu malzemesi köpükler ve son olarak 15'in üstündeyken de geopolimer pastası elde edilmekte ve bu birçok alanda kullanılmaktadır. Davidovits tarafından bu modeller Şekil 2.4'deki gibi üç farklı poli-sialat şeklinde tanımlanmıştır [13,48].



Şekil 2.4. Davidovits'in jeopolimer terminolojisi (poli-sialat yapılar) [49].

Günümüze kadar çok çeşitli alkali ile aktifleştirilmiş çimento üretilmiş ve geliştirilmiştir. AAM üretmek için herhangi bir reaktif silika ve alüminyum içerikli hammadde kaynağı kullanılabilmeyle birlikte araştırmacılar tarafından en yaygın olarak yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) kullanılmıştır. Ayrıca; AAM üretiminde metakaolin, volkanik tuf, kırmızı çamur gibi hammaddelerden de yararlanılmıştır. Kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi bağ sistemini önemli ölçüde etkilemektedir [50]. Sistemler, kalsiyum ve silikanın zenginleştirdiği Ca-Si ve alümina silikatların baskın olduğu Si-Al sistemleri şeklindedir. $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ çimento bileşenlerinin esasına bağlı olarak farklı aktivasyon modeline sahip olan bağlayıcılar “yüksek ve düşük kalsiyumlu” gruplar halinde adlandırılır.

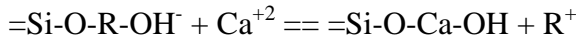
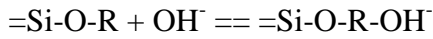
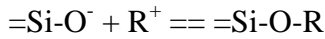
2.1.3.1. Yüksek Kalsiyumlu Alkali Aktivasyon Sistemi ($(\text{Na},\text{K})_2\text{O-CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$)

Bu modelde, belli (orta derecede) alkalın koşullar dahilinde kalsiyum (Ca) ve silisyumca (Si) zengin malzemeler ($\text{CaO}+\text{SiO}_2>\%70$) aktive edilir. Bu şartlar altında ana reaksiyon ürünü, bünyesinde Al bulundurabilen PÇ hidratasyonu sonucu oluşan jeli andıran kalsiyum alümina silikat hidrat (C-A-S-H) jelidir [39].

Kalsiyumca zengin beton ve alkali çimento hazırlamak için yararlanılan en yaygın alümina silikat kaynağı olan YFC'nin kimyasal kompozisyonu %35-40 CaO, %25-40 SiO_2 , %5-15 Al_2O_3 ve %5-10 MgO'dur [7]. Ayrıca, düşük miktarda ($<\%1$) Fe_2O_3 ,

S, K₂O ve MnO bileşikleri bulundurabilir. Dolayısıyla cüruf, hem ağ oluşturan anyonları (SiO₄)⁻⁴, (AlO₄)⁻⁵ ve (MgO₄)⁻⁶ hem ağ değiştiren katyonları Ca⁺², Mg⁺² ve Al⁺³ içerir [51].

Glukhovsky (1994) ve Krivenko (1994)'nın reaksiyonlar vasıtasıyla silika ve kireç bakımından zengin YFC gibi puzolanların alkali aktivasyonlarını ifade ettikleri ve önerdikleri model aşağıda belirtilmiştir [17,52].

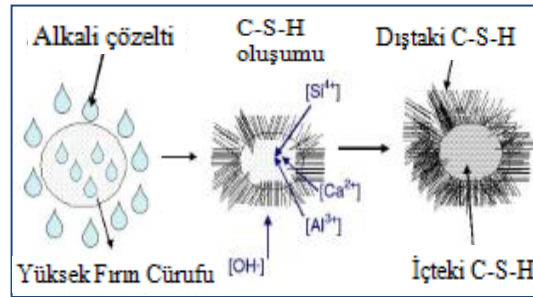


Alkali katyonu (R⁺), Ca⁺² iyonlarıyla katyonik değişim yoluyla hidratasyonun ilk evrelerinde sadece bir katalizör görevi görmektedir. Çözeltideki anyonların erken yaşlardaki reaksiyonlarda ve hamurun priz almasında önemli rol oynadığı bilinmektedir [14,39].

Camsı Ca-Si partikülleriyle zengin olan fazların çözünme mekanizması alkali ile aktifleştirilmiş cürufun reaksiyon mekanizmasına benzer şekilde dört safhada açıklanabilir. İlk olarak alkali çözelti ve cürufun parçacık yüzeyi arasında H⁺ iyonunun Ca²⁺ ve Na⁺ katyonlarıyla bir iyonik değişimi söz konusudur. Ca²⁺'nın ortamdan uzaklaştırılması, Na⁺ iyonuna ve orijinal camsı yapıya zarar teşkil eder. İki değerliğe sahip katyonun etkisi, katyon boyut farkı sebebiyle daha fazladır. İkinci evrede Si-O-Al bağları hidrolize olur. Sonraki safhada depolimerize olmuş cam ağlar bozulmaya uğrar ve cürufun esas bağlarının pek çoğu (ör; Ca-O) bu adımda kırılır. Bu süreç bütün camsı bağların kırılmasıyla devam eder. Son olarak da cüruf partikülünün yüzeyinin yakınında Si-Al tabakası birikir ve reaksiyon ürünleri oluşmaya başlar [53–55].

Çizelge 2.2. Çeşitli bağlayıcılarla oluşan birincil ve ikincil reaksiyon ürünleri [39].

Bağlayıcı türü		PÇ	Alkali çimento	
			(Na,K) ₂ O-CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O	(Na,K) ₂ O-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -H ₂ O
Reaksiyon ürünü	Birincil	C-S-H	C-A-S-H	N-A-S-H
	İkincil	Ca(OH) ₂ Af _m AF _t	Hidrotalsit [Mg ₆ Al ₂ CO ₃ (OH) ₁₆ .4H ₂ O] C ₄ AH ₁₃ CASH ₈ C ₄ AcH ₁₁ C ₈ Ac ₂ H ₂₄	Zeolitler: Hidroksisodalit, zeolit P, Na-şabazit, zeolit Y, faujasit
C=CaO, S=SiO ₂ , A=Al ₂ O ₃ , N=Na ₂ O, H=H ₂ O, c=CO ₂				



Şekil 2.5. Alkali ile aktifleştirilen bir cüruf partikülünde reaksiyon mekanizması [54].

PÇ hidratasyonu sonucuyla oluşan, malzemenin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faz CSH jelidir. Diğerleri ise, portlandit, kalsiyum monosülfoalüminat ve etrenjit ürünleridir. Bu kimyasal süreç, alkali çimentolardakine benzerdir. Burada, reaksiyonlar sonucu kimyasal yapısı daha farklı olan, PÇ hamurundaki CSH jelindeki C/S oranından daha düşük bir orana (0.9-1.2) sahip olan, ana ürünü oluşturan bir C-A-S-H jeli ve ikincil ürünler oluşmaktadır. Bu fazların tipi ve bileşimi, karışımdaki malzeme türü ve miktarına, alkali aktivatör cinsi ve konsantrasyonuna, pH'a ve kür koşullarına bağlıdır. Örneğin; cam suyu (Na₂SiO₃) ve kostik soda (NaOH) ile aktive edilen cüruf sonucunda ikincil ürün olarak hidrotalsit adıyla bilinen (Mg₆Al₂CO₃(OH)₁₆.4HO) fazı gözlemlenmiştir [51,56]. Yalnız NaOH ile aktifleştirilen cürufta C₄AH₁₃ türü fazlar tespit edilmiştir. Bunlar yaklaşık 1.5 mm çapına ve 0.2 mm kalınlığına sahip levhacıklar ve trombositler meydana getirir. Cürufun NaOH ve Ca(OH)₂ ile alkali aktivasyonu sonucu ise C₈Ac₂H₂₄, C₄AcH₁₁ gibi karbonatlı fazların oluştuğu görülmüştür [39,57]. Tüm bunların yanı sıra alkali aktivasyon işlemi sırasında açığa çıkan ürünlerin kimyası ve doğası tartışmaya açıktır ve en fazla çalışılmaya muhtaç konulardandır.

2.1.3.2. Düşük Kalsiyumlu Alkali Aktivasyon Sistemi ((N,K)₂O-Al₂O₃-SiO₂-H₂O)

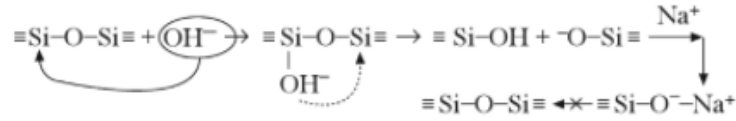
Söz konusu sistemde bulunan hammaddeler metakaolin, F tipi UK gibi düşük CaO içeriğine sahip alümina silikat esaslı malzemelerdir ve daha çok oranda Si ve Al'dan oluşur. Dolayısıyla reaksiyonların başlaması için daha agresif bir ortam gereklidir. Bu ortama 60-200 °C kür sıcaklığı veya yüksek alkalın ortamı örnek verilebilir. Sonuçta meydana gelen ana reaksiyon ürünü üç boyutlu bir ağ yapısına sahip olan bir inorganik polimer, bir amorf alkali alümina silikat hidrat (N-A-S-H) jelidir ve bu yapı da bir bakıma zeolit yapısı olarak benimsenmektedir. Bu jele jeo ya da inorganik alkalın polimer de denmektedir [20,41,44].

UK ve metakaolin alkali çimento ve beton üretiminde en geniş çapta kullanılan malzemelerdir. Metakaolin, kaolin kilinin 600-800 °C sıcaklıklarında kalsine edilmesiyle üretilen amorf, puzolanik özelliğe sahip alümina silikatlı bir malzemedir [4,58]. Alümina ve silika tabakalarının kristal yapısı dönüşüm süreciyle değişir ve sonuç olarak kaolin kimyasal olarak reaktif hale gelir. Metakaolin, genellikle silisin sahip olduğu tetrahedral yapıyla birlikte 4, 5 ve 6 alüminyum sayılarına sahip olan silikat ve alüminatlardan oluşmuş bir dizi çevresinde yapılanmıştır. Alkali aktivasyon sisteminde metakaolinin kullanılabilirliği, ilk kaolinit partikül boyutuna, kristalizasyon derecesine ve saflığına bağlıdır. Ayrıca, reaksiyonda yer alacak metakaolinin partikül boyutu 5 mm'nin ve iç kili tane boyutu da 20 nm'nin altında olması gerekmektedir [44,59].

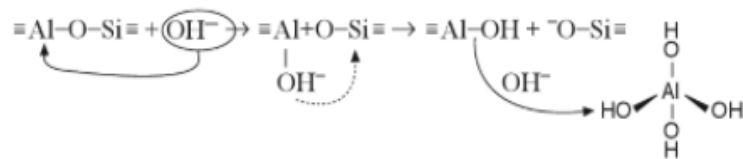
UK, termik santrallerdeki kömürün yanmasıyla elde edilir ve kimyasal bileşimi kömür cinsi ve yakma işlemine göre değişiklik gösterebilir. İçinde küçük küreler bulundurabilen ya da içi boş kürelerden oluşmuş morfolojiye sahiptir [60]. Mülit (%8-14), kuvars (%5-13), manyetit (%3-10) gibi birkaç vitroz fazdan ve düşük miktardaki kristal fazdan oluşmaktadır. Çok sayıda çeşitli UK inceleyen Fernández-Jiménez ve Palomo (2003), alkali çimento üretiminde kullanılması için bir F tipi uçucu külünün aşağıda belirtilen özelliklere sahip olması gerektiğini belirtmişlerdir [61];

- $[\text{CaO}] \leq \%10$;
- $[\text{SiO}_2]_{\text{reaktif}} > \%40$;
- $[\text{SiO}_2]_{\text{reaktif}} / [\text{Al}_2\text{O}_3]_{\text{reaktif}} > 1.5$
- $[\text{Fe}_2\text{O}_3] \leq \%10$;
- Yanmamış yüzde $< \%5$
- Vitröz faz içeriği $> \%50$
- $\% 80-90$ partiküller $< 45 \mu\text{m}$

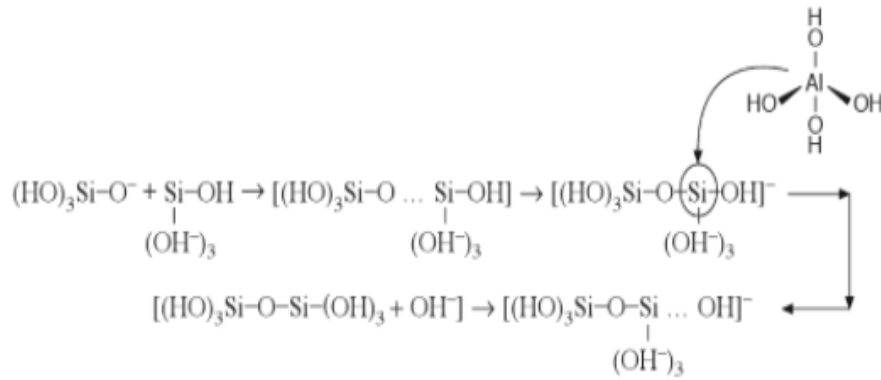
Alümina silikat esaslı malzemelerin alkali aktivasyonu alanındaki çalışmaların daha az olmasının nedeni, cüruf alkali aktivasyonu sonucu gelişen bir araştırma dalı olmasındandır. Puzolanik özelliğe sahip materyallerin alkali aktivasyonuna dair genel bir mekanizma öneren Glukhovsky (1994), bu mekanizmayı üç aşamada açıklamıştır [17]: 1) Tahribat-koagülasyon (topaklaşma), 2) Koagülasyon-yoğunlaşma ve 3) Yoğunlaşma-kristalleşme.



Başlangıçta yukarıdaki reaksiyonun oluşumu, Si-O-Si kovalent bağlarının OH^- iyonları tarafından parçalanmasıyla olur. İyonlarca, silis atomlarının çevresine elektron iyonları tekrar dağıtılır ve Si-O-Si bağlarının koparılması iyonların etkisiyle daha fazla zorlaştırılır. Bu saldırıda sialat ($-\text{Si}-\text{O}-$) ve silanol ($-\text{Si}-\text{OH}$) türleri de mevcuttur. Si-O-Si (siloksan) bağlarının geri dönüşümü, $\text{Si}-\text{O}-\text{Na}^+$ bağlarının meydana gelişiyle engellenir ve bununla birlikte ortamdaki negatif yükler alkali katyonunun varlığı sebebiyle etkisiz hale gelir. Si-O-Al bağları, OH^- gruplarınca aynı biçimde etkilenir ve kompleks türler (çözülmüş Al türleri), çoğunlukla $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ anyonlarını oluşturmaktadır.



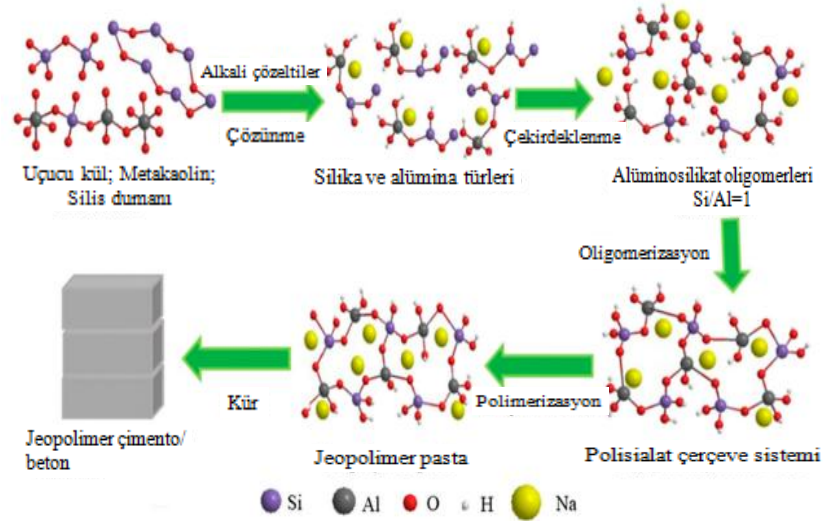
Koagülasyon-yoğunlaşma, iyonik türlerin birikimi, ayrılmış kesimler arası bağları kuvvetlendirmekte ve topaklaşan ürünlerin oluşmasını sağlayan Polikondensasyon başlar ve Polimer yapılar oluşur. Reaksiyonlar sonucu silika monomerleri dimerleri (Si-O-Si) ve devamında da dimerler diğer monomerlerle reaksiyona girerek polimerleri oluşturmaktadır. Ayrıca, bu reaksiyonlarda OH⁻ iyonlarının katalizi söz konusudur. Polimerizasyonların devamıyla oluşan kümeler büyür ve kolloidler meydana gelmektedir. İzomorf olarak değişikliğe uğrayan silisyum tetrahedral yapısı ve polimerizasyon sürecinde alüminatlar da yer almaktadır. Alkali metal ilk olarak reaksiyon katalizinde, ikincide ise yapısal bir bileşen dahilinde görev almaktadır.



Son aşamada ise yoğunlaşma-kristalleşmeyi kapsar. Reaksiyon ürünlerinin çökmesi katı fazdaki parçacıklarla hızlanır. Çökelen maddenin bileşimi; mineralojik ve kimyasal yapıyla, reaksiyonlarda yer alan alkalinin etkinleştirici özelliği ve sertleştirme koşullarıyla ilintilidir [17,40,43].

N-A-S-H jeli oluşumu özetlenecek olursa; ilk olarak alümina silikatlı hammadde kaynağı alkali saldırısı ile çözünerek alüminat ve silikatları monomerler halinde ayrılır. Sonrasında, daha küçük molekülü monomerler bir araya gelerek daha büyük monomerleri geliştirirler. Monomerler dimerleri oluşturmak için reaksiyona girer. Dimerler de diğer monomerlerle reaksiyona girerek sırayla trimer, tetramer gibi yapıları oluşturur [62]. Tepkimelerin erken evrelerinde, alkali ortamda Al³⁺ iyon içeriğinin fazla olması nedeniyle başlangıçta Si/Al oranı yaklaşık 1 olan N-A-S-H jeli (Jel 1) alüminyumca zengindir ve metastabildir. Al-O bağları, Si-O bağlarından daha zayıftır, daha kolay kırılır. Dolayısıyla alüminyum silisten daha kolay çözünür. Reaksiyonlar ilerledikçe silika monomeri daha fazla çözünmeye başlar ve ortamdaki

silika konsantrasyonu artırarak silika açısından zenginleştirilmiş, Si/Al oranı yaklaşık 2 olan bir N-A-S-H jeli (Jel 2) elde edilir. Sonrasında jel içinde polimerizasyon süreci devam eder ve büyük moleküllü tepkime ürünleri meydana gelir. Bu mekanizma, oluşan bağlayıcının fiziksel ve mekanik özelliklerini, mikro yapısını önemli ölçüde etkiler [59,63].



Şekil 2.6. Alümina silikat esaslı malzemelerin polimerizasyon süreci [62].

Zengin silis ve alümin içeriğine sahip malzemelerin alkali aktivasyonu sonucu oluşan amorf NASH jelinin yanı sıra bu sistemde ikincil olarak zeolit P, zeolit Y, hidroksitodalit, Na-kabazit ve faujasit gibi zeolitler oluşabilir [39]. Aktivasyon sonucu üretilen bu ürünlerin yapısı ve doğası, reaksiyon kinetiğini etkileyen sıcaklık, kür süresi ve aktivatör tipi gibi faktörlere bağlıdır. Genel itibarıyla yüksek kür sıcaklığı Jeopolimerizasyonun gelişimini, uzun kür süresi ise zengin silisli ürünlerin eldesini sağlar. Sonuç olarak mekanik mukavemet bu durumlardan olumlu şekilde etkilenir [24]. Ayrıca ana tepkime ürünü olan NASH jelinin silis kaynağı tek alümina silikat kaynağı değildir. Silis içeriği, sodyum silikat (cam suyu) gibi alkali aktivatörlerden de gelebilir. Aktivatördeki silis yüksek oranda çözünür ve NASH jelinin yapısına kolay bir şekilde geçer. $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ 'ye bağlı sodyum silikatın polimerizasyon derecesi, NASH jeli oluşumu safhalarında ortaya çıkan jellerin yapısını belirleyen ana etmendir [23,39].

Uçucu külün alkali aktivitesi sonucu oluşan ara ürünlerin üzerinde çeşitli aktivatör polimerizasyon derecelerinin (0.17, 0.60, 1.90) etkileri Criado, Fernandez Jimenez, De La Torre, Aranda ve Palomo (2007) tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar, polimerizasyon derecesinin jelin yapısında, bileşiminde ve kinetiğinde önemli bir rol oynadığı kanısına varmışlardır. Nihai reaksiyon ürünlerinin, çözülebilir silisin ilavesiyle etkilenmediğini, ancak ara ürünlerin bu ilaveden etkilendiğini ifade etmişlerdir. NASH için Si/Al değerinin en ideal 2 olduğu, bu oranın jelde kesin biçimde artmadığı ve başlangıç aşamalarından bağımsız bir şekilde termodinamik stabilite eğilimini dile getirilmiştir. Ayrıca, zeolit kristalleşmesi ve geciktirici kül tepkimesi, yüksek polimerizasyon dereceli jel oluşumu mekanizması etkisi sonucu oldukları belirtilmiştir [64].

2.2. ALKALİ AKTİVE MALZEME BİLEŞENLERİ

Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan ya da çok az olan, ince taneliyken ve nemli ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliği kazanan silisli veya silisli-alüminli malzemelere puzolan denir. Yapısında zengin olarak bulunan silis ve alüminin yanı sıra bir miktar kalsiyum oksit, demir oksit, karbon ve alkaliler de yer alabilmektedir [65,66]. Genel olarak iki gruba ayrılırlar;

2.2.1. Puzolanik Malzemeler

2.2.1.1. Doğal Puzolanlar

Volkanik tüf, metakaolin, volkanik cam, diatomlu toprak, tras ve bazı killeri ve şeyler doğal puzolanlardır [66,67]. Alkali aktive malzeme üretmek için günümüzde kullanılanlar genellikle tüf, tras ve metakaolindir.

Doğal puzolanların büyük çoğunluğunu oluşturan volkanik kaynaklı malzemelerin puzolanik özellik gösterebilmeleri için çok ince taneli olmaları, en az P_C inceliğinde öğütülmeleri gerekir. Öte yandan kil, şeyl, diatomlu toprak gibi hammaddeler öncelikle ısıtılma tabii tutulup devamında gerektiği şekilde öğütüldüklerinde puzolanik özellik kazanırlar [66]. Doğal puzolanların aktivitesi; mineralojik yapıları,

kimyasal bileşimleri ve özgül yüzeyleriyle doğrudan ilişkilidir. Aynı zamanda, puzolan tarafından bağlanan sönmüş kireç miktarı ve buradaki aktif fazların yapısı ve miktarı, karışımdaki kireç/puzolan oranı, SiO_2 içeriği ve kür süresi de önemlidir [68].

Volkanik Tüf: Bol rezervi, erişebilirliğinin kolaylığı açısından tarih öncesi devirlerden beri inşaatlarda kullanılan tüf, volkanik patlama neticesinde ortaya çıkan küllerden oluşan bir volkanik kaya türüdür. Alkali ve toprak alkali metallerin sulu alümina silikatları olarak bilinirler. Yüksek oranda silika ve zeolit mineralleri içerirler. Tüfün zeolitlenmesinin nedeni havanın malzemeye olan etkisidir. Dolayısıyla içerisinde kimyasal ve fiziksel özelliklerinin oluşmasında görev alan zeolit oluşumları yaygın hale gelir ve bu da tüfe endüstriyel değer kazandırır [69]. Zeolitlerin mikro gözenekli bir yapıya sahip oluşu, zeolitik tüfleri (ZT) zeolitik olmayan doğal puzolanlardan daha aktif yapar. Çok küçük gözenekli yapıdan dolayı zeolitler difüzyon-kontrollü topokimyasal (partikül yüzeyinde oluşan) reaksiyon sayesinde ortamdaki kireçle etkin bir biçimde birleşerek bağlayıcı jeller meydana getirmektedir [70]. Zeolitlerin kimyasal özellikleri ve kristal yapısı; seçici adsorpsiyon, moleküler elek ve katalitik kullanım alanları gibi uygulamalarda değerlendirilmelerine olanak sağlar [71].

Tras: Almanya'daki Ren Vadisi'nde çıkarılan ve tras ismiyle bilinen puzolan doğal puzolanların en önemlisidir. Üstün özellikleri nedeniyle ülkemizde ve diğer ülkelerde kullanılan doğal puzolanlara genel olarak bir dönem tras denilmekteydi. Puzolan katkılı çimentolar da Traslı Çimento olarak adlandırılmıştı [72].

Tras; ağırlıklı olarak silis ve alüminyum oksitten ($\%70 < \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) ve az miktarda kireç içeren bit yapıya sahiptir. Tras puzolanik bir malzeme olduğu için tek başına bağlayıcı özellik taşımaz. Silika ve kireç arasında meydana gelen puzolanik reaksiyonun gerçekleşebilmesi ve trasın hidrolik bağlayıcılığa sahip olması için nemli ortama ve kirece ihtiyaç duyulur. Katkı maddesi olarak kullanıldığı takdirde trasın ihtiyaç duyduğu bu kireç, çimento ana bileşenlerinin suyla hidratasyonu sonucu açığa çıkar. Bu tür puzolanlar, katkılı çimentolarda geçirimsizliği düşürürken, PÇ'ye göre sülfat etkisi ve ASR gibi zararlı kimyasal etkilere daha dayanıklıdır [55].

Zeolitik yapılı doğal puzolanlar: Zeolitler, tetrahedral yapıdaki silika ve alüminanın oksijen atomunu ortaklaşa kullanmasıyla oluşan, atomik düzeyde üç boyutlu ve mezo gözenekli yapıya sahip, doğal ya da yapay, alkali (Na ve K) ve toprak alkali (Ca) elementlerinin sulu alümina silikat kristal yapıları bileşikleridir [73,74]. Mikro gözenekleri su ve katyonlarla dolu olan bir peteği andırır. 1756 yılında keşfedilen zeolit “kaynayan taş” denmesinin sebebi, ısıtıldığında hızlı bir şekilde su kaybına bağlı olarak mineral buharının açığa çıkmasıyla bu görünümü almasıdır. Günümüz endüstrisinde değerli hammaddelerden biri olan zeolit, günümüzde mineral yapı olarak bilinmesine rağmen 1930’lu yıllarda kristal yapı olduğu tespit edilmişti. Bünyesindeki katyon cinsi ve miktarının içeriği, yapısındaki Si/Al oranı değişmekle birlikte genel formülü $(M^+, M^{+2})_x O \cdot Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot nH_2O$ şeklindedir [75].

Günümüzde yapay zeolitler iyon değiştirici, adsorblayıcı ve katalizör olarak kullanılırken; doğal olanları ise inşaat sektöründe hafif agrega olarak, boşluk doldurucu özelliğinden dolayı özgül yüzeyinin çimentodan fazla olması ve daha düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle betonlarda kullanılmaktadır [76]. Zeolitlerin kullanımıyla üretilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliğinden dolayı önemli derecede enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek oranda reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 bulundurması sebebiyle, sönmüş kireç ($Ca(OH)_2$) ve su ile tepkimeye girerek bağlayıcılık özelliği kazanabilen bu zeolitlerin betonda doğal puzolan olarak kullanılmaktadır [20].

Zeolitlerin endüstriyel alanlarda kullanımı 1940’larda başlamıştır; ancak volkanik kayalarda bulunan boşluk ve çatlaklarda yalnızca mineral olarak mevcut olması sebebiyle kullanım alanı genişlememiştir. Zeolitin deniz ve göllerdeki tüflerde de bulunması 1950’lerden itibaren kullanım alanının hızlı bir şekilde genişlemesine neden olmuştur [75].

2.2.1.2. Yapay Puzolanlar

Uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, pirinç kabuğu külü yapay puzolanlara örnek verilebilir.

2.2.2. Alkali Aktivatörler

Alümina silikatlı malzemelerin alkali aktivasyonu sonucu bağlayıcı bir ürün elde etmek için alkalilere ihtiyaç duyulur. Bu işlem için ise çoğunlukla kostik alkaliler veya alkali tuzlar kullanılır. Kimyasal bileşenlerine göre; kostik alkaliler (MOH), silikat içermeyen zayıf asit tuzları (M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF), silikatlar ($M_2O+nSiO_3$), alüminatlar ($M_2O+nAl_2O_3$), alümina silikatlar ($M_2O+Al_2O_3+(2-6)SiO_2$) ve silikatsız güçlü asit tuzları (M_2SO_4) şeklinde altı gruba ayrılırlar [15,20,51].

Sodyum türevi aktivatörler (NaOH, Na_2CO_3 , $Na_2O.nSiO_2$ ve Na_2SO_4) en ekonomik olan ve yaygın olarak kullanılanlardır. Potasyum bileşenlerinin bazılarında (KOH, K_2SiO_3) laboratuvar ortamında yararlanılır, ancak düşük ulaşılabilirlikleri ve yüksek maliyetleri sebebiyle uygulamaları kısıtlıdır. Öte yandan sodyum ve potasyum bileşenlerinin özellikleri oldukça benzerlik taşımaktadır [20]. Mineraller, NaOH'un artan konsantrasyonlarında KOH içeren çözeltiye nazaran daha fazla çözünme kabiliyetindedir. Bu şekilde aktive olan malzemelerin basınç dayanımı, asit, sülfat gibi kimyasal etkilere karşı direnci daha yüksek olmaktadır. Aynı zamanda bu malzemelerin mukavemeti PÇ'li bağlayıcılara göre fazla, büzölmeleri ise nispeten düşüktür [3,37].

Alkali aktivatör olarak en çok kullanılan NaOH veya KOH ile Na_2SiO_3 veya K_2SiO_3 birlikte karıştırılması sonucu oluşan bileşiklerdir [23,38]. Bazı çalışmalarda tek aktivatör kullanımı da görölmektedir. Alkali kombinasyonu yalnızca tek alkali kullanımına kıyasla Na_2SiO_3 , silikat veya potasyum bulundurduğu zaman reaksiyonların zamanla arttığı belirlenmiştir. Fakat dayanımdaki ana etken kullanılan alümina silikat kaynağıyla ilişkilidir [3].

Alkali aktivatörlerin çözeltideki derişimleri molarite kavramıyla açıklanır, dozajları ve oksit molar oranları yüksek oranda önem taşır. Kullanılan alümina silikat kaynağının tipi, kimyasal özellikleri ve çözeltinin durumuna göre bu özellikler farklılık gösterebilir [68,77]. Yapılan çalışmalarda tatmin edici sonuçları elde etmek NaOH'in ideal konsantrasyon değerinin 1-10 M, KOH için 5-10 M arasında

olmasıyla gözlenmiştir. Çözeltinin molaritesinin artırılması belirli bir değerden sonra kötü etki oluşturmaktadır. Malzemenin daha hızlı sertleşmesini sağlar fakat işlenebilirliği önemli ölçüde azaltır. İlerleyen aşamalarda da bağlayıcı mukavemetinin azalmasına sebep olmaktadır [43,68].

Sodyum Hidroksit (NaOH): Kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir hammadde olan NaOH “kostik soda” olarak da bilinir ve 13.5 pH’a sahip kuvvetli bir bazdır. Beyaz renklidir, nemi çeken bir özelliğe sahiptir ve suda kolayca çözünebilen bir malzemedir. Çözündüğünde sabun hissi veren yumuşak, kaygan bir çözelti oluşturur. Tepkime sonucu kısa süre içinde ısınarak sıcaklığını uzun süre korur. Cildi tahriş etme etkisi vardır. Karakteristiği saflığına göre çeşitlilik gösterir. CO₂ salınımı hususunda NaOH, Na₂SiO₃'ten daha çevre dostu bir maddedir [13,38].

Sodyum Silikat (Na₂SiO₃): Na₂(SiO₂)nO kimyasal formülüyle gösterilen bileşiklerin ortak adıdır. En çok bilineni ve kullanılanı ise cam suyu-sıvı cam olarak da bilinen sodyum metasilikattır (Na₂SiO₃). Bir katı içinde veya bir sulu çözeltide kullanılır. Saf bileşimleri beyaz renkli ya da renksiz olabilir. Daha düşük modüllü (SiO₂/Na₂O) sodyum silikat çözeltisi elde etmek için çözeltiye NaOH ilave edilir. Belirli bir modüle ve konsantrasyona sahip olması istenen çözelti, NaOH ile kıyaslandığında farklı türlere sahip olabilir. Modülü 1’in üstünde olan alkali silikat üretmek için bir yöntem belirlenmiştir. Bu yöntem dahilinde, sulu silikatın bir çözücünde çözülmesinden sonra hidrate silikat elde etmek için su ile karıştırılmış organik çözücüler kullanılır. Bu yöntem, optimum modül ve konsantrasyonla direkt olarak cam suyu üretilmesine olanak sağlar [56].

Kalsiyum Hidroksit (Ca(OH)₂): Kalsiyum karbonat içerikli kalkerlerin yaklaşık 900-1000 °C sıcaklıkta kalsinasyonu ile sönmemiş kireç (CaO) elde edilir. Kalsiyum hidroksit, sönmemiş kirecin su ile tepkimesi sonucu oluşur. Kireç, tarih öncesi devirlerden beri bilinen ve kullanılan çok yönlü bir maddedir. Günümüzde de sanayi, çevre ve tarım sektörlerinde oldukça fazla bir biçimde kullanılmaktadır. Bu da üretim teknolojisinin daha da gelişmesiyle birlikte kireç üretim tesislerinin yaygınlığını ve maliyetinin diğer bağlayıcılara kıyasla daha düşük olmasını sağlamaktadır [20].

2.3. ALKALİ AKTİVE MALZEMELERDE LİF KULLANIMI

Lifler, çok eski zamanlardan beri yapı malzemelerinde katkı olarak yararlanılan ve güçlendirici etkisiyle ön plana çıkan ürünlerdir. Günümüzde inşaat sektöründe önemli bir yeri olan ve birçok çeşidi bulunan lifler, geçmişte de saman, at kılı vb. olarak kullanılmışlardı [78]. Çekme dayanımının düşük olmasıyla gevrek (kırılgan) bir özellik gösteren yapısal betona sürekli veya kısa liflerin takviyesi, betonda çatlak oluşumunu, gelişimini ve birleşimini önlemektedir [79–81]. Bunun nedeni, rastgele dağılan liflerin gerilme enerjisi transferi kabiliyetidir. Çatlaklar üzerinde köprü görevi gören lifler, matriste oluşan gerilmenin bir kısmını kendileri taşır ve diğer kısmını da çimento matrisi alanlarına aktarırlar. Yük deplasman eğrisine bakıldığında, ilk çatlak oluşumundan sonra lifli betonun yük almaya devam ettiği hatta eğilme dayanımının arttığı görülürken, normal beton direkt kırılacaktır [82,83]. Matrise dahil olan bu lifler, çekme-eğilme mukavemeti, tokluk, aşınma-darbe dayanımı gibi mühendislik özelliklerini iyileştirir. Büzülme davranışında da olumlu yönde etkilidirler. Sağladığı yararlar neticesinde malzemenin dayanıklılığını artırarak çevresel etkilere karşı daha dirençli hale getirirler. Bu amaçla kullanılan lif çeşitleri genel olarak çelik, sentetik, karbon, ahşap, cam ve doğal liflerdir [83].

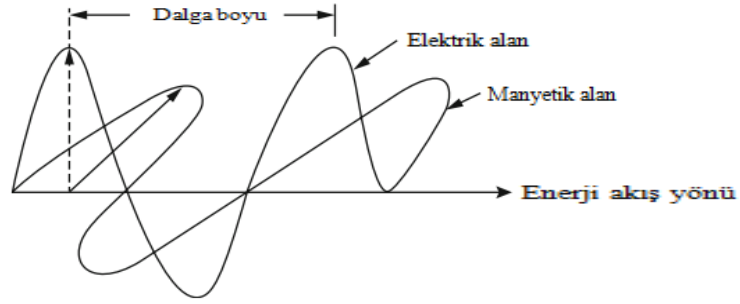
Lifli bağlayıcıların yapısal özelliklerini etkileyen faktörler arasında narinlik oranı (lif boyu/lif çapı) ile lif miktarı yer alır. Lif içeriği veya narinliğin artması mekanik performansı artırsa da yerleştirmede ve karıştırmada problemler yaşanabilmektedir. Bu yüzden, bu değerlerin optimum düzeyde tutulması gerekir. Öte yandan, karışımda lif dağılımı homojen olmalıdır [82,84]. Çizelge 2.3’de çeşitli liflerin sahip olduğu teknik özellikler verilmiştir.

Çizelge 2.3. Çeşitli liflerin sahip olduğu özellikler [82,85].

Lif Tipi	Çekme Dayanımı (ksi*)	Young Modülü (10^3 ksi*)	Uzama (%)	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)
Akrilik	30-60	0.3	25-45	1.1
Rayon (Suni ipek)	60-90	1.0	10-25	1.5
Pamuk	60-100	0.7	3-10	1.5
Polietilen	~100	0.02-0.06	~10	0.95
Taş Yünü	70-110	10-17	~0.6	2.7
Polipropilen	80-110	0.5	~25	0.9
Naylon	110-120	0.6	16-20	1.1
Polyester	105-125	1.2	11-13	1.4
Asbest	80-140	12-20	~0.6	3.2
PVA	125-230	3.5-6	6-10	1.3
Çelik	40-400	29	0.5-35	7.8
Cam	150-550	10	1.5-3.5	2.5
1 ksi=6.9 MPa				

2.4. ELEKTROMANYETİZMA VE ELEKTROMANYETİK SPEKTRUM

Atomları, maddeyi ve Dünya'yı bir arada tutan, doğanın dört temel kuvvetlerinden biri olan elektromanyetizma, elektrik yüklü parçacıkların etkileşimi inceler. Elektriksel ve manyetik alan fizikte bir bütün olarak ele alınır. Atomlar elektron (e^-) transferi sayesinde pozitif (+) veya negatif (-) yüklenirler. Bunun sonucunda bir elektriksel alan (E) oluşur. Elektrik yüke sahip bu parçacıklar hareket etmeye başlarsa alan elektrik akımına dönüşür ve parçacıkların etrafında bir manyetik alan (B) meydana gelir [86]. Kısaca, elektrik alan elektrik yüklerinin birbiri üzerindeki çekme-itme etkisi sonucu, manyetik alan ise elektrik yüklerinin hareketiyle oluşan elektrik akımı sonucu oluşur [87]. Elektromanyetik alan ise elektrik ve manyetik alanın bir araya gelmesiyle ortaya çıkar.



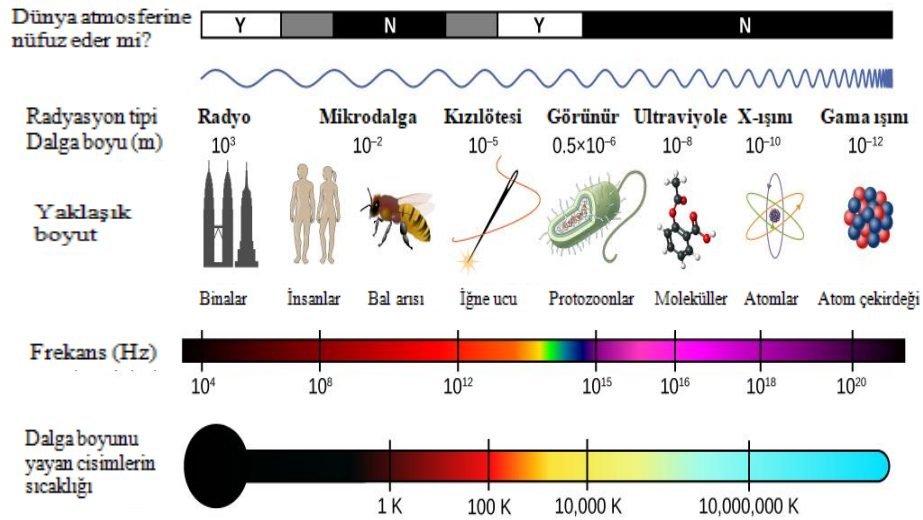
Şekil 2.7. Elektrik ve manyetik alan etkileşimi [88].

Doğru koşullar altında etkileşen elektrik ve manyetik alanlar birbirini sürekli olarak üretirler ve sürdürülebilirler. Bu, yer yüzünde her yere ve uzaya elektromanyetik enerji dalgaları veya radyasyon (enerjinin dalga ya da parçacık şeklinde aktarımı) yayan bir elektromanyetik alan oluşturur. Örneğin, dünyanın çekirdeğinde yer alan ve hareket halinde olan likit metallerin ürettiği elektriksel akımlar sonucunda oluşan manyetik alan dünyayı kapsar ve bu da dünyayı iki kutuplu bir mıknatıs haline getirir. Ayrıca oluşan bu katman bizi güneşten gelen UV (mor ötesi) ışınlarından koruyan koruyucu bir tabaka meydana getirir [89].

Bilim adamları bir yük veya akım kullanmadan E ve B oluşturmanın yollarını araştırmışlardır. Bir bölgede zamanla değişen E varsa akıma ihtiyaç olmadan B'nin, zamanla değişen B varsa da yüke ihtiyaç olmadan E'nin oluştuğunu bulmuşlardır. Bundan dolayı Maxwell dalga üretebilen zincirleme bir reaksiyon oluşturmuş, akım ve yükten bağımsız olarak elektromanyetik dalgaların var olduğunu belirtmiştir. Gauss Yasasının matematiksel bir ifadesi olan Maxwell denklemleri olarak bilinen dört temel denklemle de elektrik alanının manyetik alana dönüşebileceğini anlatır. Belli bir süre sonra da Heinrich Rudolf Hertz, bu dalgaların varlığını doğrulamış, radyo dalgalarının da mucidi olmuştur [90].

Elektromanyetik dalgalar (EMD), yüklü taneciklerin ivmeli hareketiyle elde edilir. Elektrik ve manyetik alanları Şekil 2.7'de görüldüğü gibi birbirine diktir. Doğal veya yapay kaynaklı olabilirler. Yayılma için ortam ihtiyacı olmayan EMD, enine dalgalar olup yüksüzdürler. Polarize edilebilen ve iyonlaştırıcı özellik gösterebilen bu dalgaların boşluktaki hızı $c=3.10^8$ m/s'dir. Belli bir $\lambda(m)$ dalga boyuna, $f(Hz)$ frekansa ve $h=6,63.10^{-34}$ J.s Planck sabitine sahip olan fotonların maddedeki hızları

$c=\lambda \times f$, enerjileri $E= h \times f$ formülüyle bulunur. Belirtilen denklemler daha yüksek frekansa sahip dalgaların enerjilerinin daha yüksek olduğunu, daha uzun dalga boyuna sahip olanların ise enerjilerinin daha düşük olduğunu gösterir. Enerjileri bakımından Şekil 2.8’de görüldüğü gibi küçükten büyüğe doğru radyo dalgaları, mikrodalgalar, kızılötesi (infrared), görünür ışık, ultraviyole (mor ötesi), X ışınları ve gama ışınları olmak üzere sıralanırlar. Enerjisi en fazla olan EMD, en kısa dalga boyuna sahip olmasına rağmen en yüksek frekanslı gama ışınlarıdır.



Şekil 2.8. Elektromanyetik Spektrum [91].

2.4.1. Elektromanyetik Dalgaların Oluşturduğu Etkiler

Hayatımızın neredeyse her alanında EMD’lerden faydalanmaktayız. Teknoloji geliştikçe de bu dalgaların yeri daha da kalıcı ve vazgeçilmez olmaktadır. Radyo, TV, uydu gibi aletlerde radyo dalgaları; radarlarda, fırınlarda, telefon sinyallerini taşımada mikro dalgalar; termal kameralarda sıcak cisimlerden yayılan kızılötesi dalgalar; dezenfeksiyon için mor ötesi dalgalar tıpta teşhis ve tedavi için X ışınları ve kanser tedavisi ve astronomide de gama ışınları kullanılır. Yüksek frekanslı X ve gama ışınları insan bedeninden kolayca geçebildikleri için genellikle tıbbi uygulamalarda kullanılırlar [28,91]. Devamlı iç içe olduğumuz EMD’lerin yaşamımızı kolaylaştıran etkilerinin yanı sıra birçok zararlı etkileri bulunmaktadır. Gün geçtikçe elektromanyetik kirlilik artmakta ve insanoğlunu olumsuz etkilemektedir.

EMD'lerin oluşturduğu etkiler, türlerine, enerjileri, maruz kalındıkları mesafeye ve zamana göre çeşitlilik gösterir. Karşılaştığı atomun yörüngesinden elektron kopararak iyonlaşmaya neden olan, madde içinde çok derine inebilen, atom ve moleküllerin yapısında değişikliğe neden olan yüksek enerjili, kütsüz ve yüksüz X ve gama ışınlarına kısa süreli; iyonlaştırıcı olmayan fakat atomu bir üst seviyeye çıkarabilen düşük enerji seviyeli radyo dalgalarına, mikro dalgalarına, görünür bölge ve mor ötesi (düşük dalga boyluları hariç) dalgalarına uzun süreli maruz kalınması tehlikeli sonuçlar doğurabilir [86].

Düşük frekansla çalışan cep telefonu, Wi-Fi, bilgisayar, televizyon gibi telekomünikasyon cihazlarının oluşturduğu EMA etkisinde kalan insanlar meydana gelen enerjiyi emme özelliğine sahiptir. Bu dalgalar madde ile etkileşime girerek ısıya dönüşebilir veya ısı olmayan etki oluştururlar. Oluşan düşük ısı etkisi insan vücudu tarafından kolayca etkisizleştirilir [92]. Isıl olmayan etkilerde ise uyku ve dikkat bozuklukları, baş ağrısı hatta yüksek doz sonucunda kanser, nörolojik semptomlar, zihinsel bozukluklar, kardiyovasküler rahatsızlıklar, fetal anormallikler, göz rahatsızlıkları, depresyon gibi hastalıklar söz konusu olabilir [27,93]. Genellikle sağlık açısından zararsız etki oluşturduğuna inanılan düşük frekanslı EMD'lerin insan, hayvan ve bitkilerde oluşturduğu zararlar yapılan araştırmalarda kanıtlanmıştır. Örneğin, Miller vd. (2019), yaptıkları araştırmada düşük frekanslı dalgalara uzun süre maruz kalan çocukların beyinlerinin yetişkinlerinkinden daha fazla etkilendiği, bunun da çocukların beyin gelişimini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir [94]. Yine hayvanların bu radyasyondan nasıl etkilendiğini incelemek için Torres-Duran vd. (2007) tarafından yapılan deneyde sıçanların düşük frekanslı dalgalara maruz kalmasının sonucunda iç organlarının zarar gördüğü gözlemlenmiştir [95].

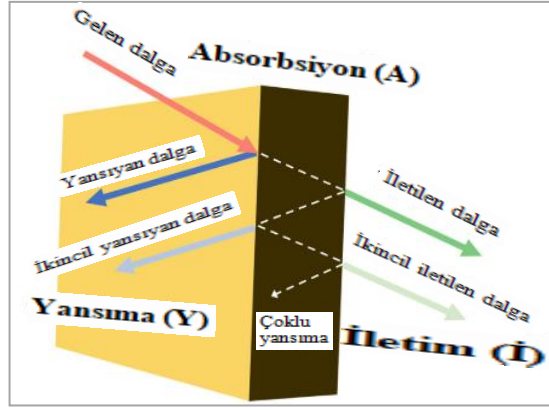
2.4.2. Elektromanyetik Dalgaların Maddeyle Etkileşimi

Elektromanyetik spektrumdaki farklı tip dalgalar, madde ile etkileşim konusunda çok farklı etkilere sahiptir. Bu etkileşim, malzemenin kimyasal özelliklerine, yoğunluğuna ve kalınlığına, ortam koşullarına, EMD'lerin karakteristik özelliklerine bağlıdır [96]. Düşük frekanslı radyo dalgaları evimizdeki duvarlardan hatta

yanımızdaki kişilerden rahatça geçebilir. Mikrodalga, kızılötesi ve görünür ışığa doğru ilerledikçe, dalgalar malzemelerce daha fazla emilir. Alt ultraviyole aralığında, güneşten gelen tüm UV ışınları cildimiz tarafından emilebilir. X ve gama ışınları ise etkileşime girdikleri malzemelerin özelliklerine göre belli derecede emilirler, ancak X-Işını ve Gama ışınları maddenin en küçük parçacığı olan atomlar ve elektronlarla etkileşirler. Her EMD, uyarılmaları için belli bir kuantum enerjilerine sahiptir. Eğer gelen radyasyonun kuantum enerjisinin eşleştiği boşlukların kuantize edilmiş enerji seviyeleri yoksa, malzeme radyasyona karşı şeffaf olacaktır. Ancak dalga enerjisi emilir ve malzemeyi iyonlaştırmazsa malzemeyi ısıtma davranışı gösterir [97]. Sonuç olarak genel itibarıyla, malzeme-EMD arasındaki etkileşim; yansıma, absorpsiyon ve iletim olarak üç şekilde gerçekleşir [98].

2.4.3. Elektromanyetik Kalkanlama

Tüm çevremizi saran EMD üreten cihaz ve sistemler hayatımızı kolaylaştırdığı için bunların zararlı etkilerini en aza indirecek önlemler alınmalıdır. Radyasyondan korunmanın üç temel kuralı zaman, mesafe ve zırhlamadır. Bu kurallardan en etkili ve kalıcı olanı, radyasyonun kaynağını ve malzemelerle etkileşimini inceleyen zırhlamadır. Radyasyonun kaynağı ile meydana gelen dozdan etkilenme olasılığı olan kişiler arasına adeta kalkan görevi görecektir duvar, tuğla, beton, kurşun gibi malzeme konulması uygulamasına zırhlama denir [99,100]. Kalkanlama terimi, elektrik-elektronik mühendisliğinde de ekranlama şeklinde yaygın olarak kullanılır. Ekranlama, bir cihazdan içeri (veya dışarı) doğru giren (veya çıkan) kaçak alanların düşürülmesi doğrultusunda kullanılır. Shielding efficiency (SE) veya ekranlama etkinliği (EE), ekranlamanın ne derece etkili olduğunu gösteren, birimi desibel (dB) olan bir parametredir [101].



Şekil 2.9. Malzeme-EMD etkileşimine dayalı ekranlama etkinliği mekanizması [102].

Bir malzemenin zırhlama etkisi, malzemenin kalınlığı, fiziksel özellikleri, yoğunluğu, atomik yapısı, bileşenleri, iletkenliği, geçirgenliği ve gelen dalganın frekansı gibi faktörlere bağlıdır. Kalınlığı t olan kayıplı bir duvarda EMD'lerin etkisi Şekil 2.9'da gösterildiği gibi üç şekilde zayıflatılır. Sırasıyla ilki duvardan yansır, ikincisi emilir, üçüncüsü de duvar içindeki çoklu yansıma kayıplarıdır [101,103]. Teorik olarak, zırhlama (koruma) etkinliği (SE_T), denklem (1)'de gösterildiği gibi yansıma (SE_Y), absorpsiyon (SE_A) ve çoklu yansıma ($SE_Ç$) olarak bilinen üç mekanizmanın toplamıyla elde edilir [104].

$$SE_T = SE_Y + SE_A + SE_Ç \quad (2.1)$$

Burada SE_T , 15 dB'den fazla çıkarsa $SE_Ç$ 'in katkısı göz ardı edilebilir [102]. Ayrıca, EMD'lerin gelen ve iletilen P gücü, E elektrik alanı ve H manyetik alanı logaritmik oranları doğrultusunda hesaplanan SE eşdeğer sonucuna ulaşılabilir [105,106].

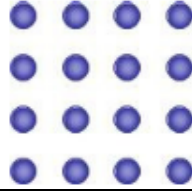
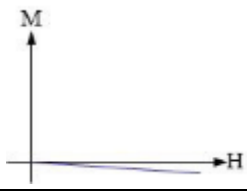
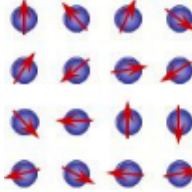
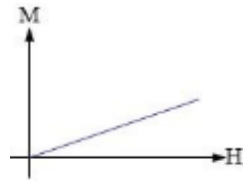
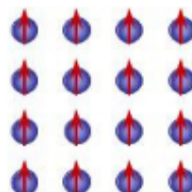
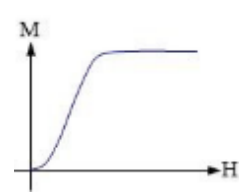
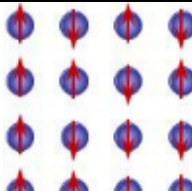
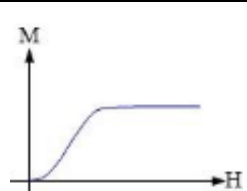
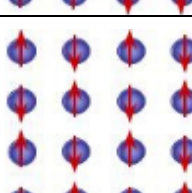
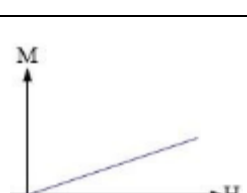
$$SE_T = 10 \log \frac{P_I}{P_T} = 20 \log \frac{E_I}{E_T} = 20 \log \frac{H_I}{H_T} \quad (2.2)$$

30 dB SE, ortalama değer olarak kabul görmektedir. Genel itibarıyla birçok sorun 40 dB'lik bir SE değeriyle çözülebilir. Askeri sistemlerde bu değer 100-120 dB arası olması istenebilmektedir. Şartnamelerde telefon kabloları için arzu edilen değerler yaklaşık 80-90 dB'dir. Telefon ve Wi-Fi sistemlerin kalkanlamasında 70 – 90 dB'lik bir değer gerekmektedir [107];

2.4.4. Manyetik Malzemelerin Sınıflandırılması

Elektronların yörüngesel hareketleri, spin hareketleri ve birbirleri ile nasıl etkileştikleri manyetizmanın kökenini oluşturur. Burada yüklü olan elektronların yörünge devresinde taşınması söz konusudur. Dolayısıyla ortaya yörünge ve spin hareketi kaynaklı, belli doğrultu ve büyüklükleri olan manyetik momentler çıkar. Malzemelerin atomlarının manyetik alan (H) etkisinde ve kaldırıldığında sahip olduğu net manyetik momentler ve yönelimleri mıknatıslanma davranışlarını belirler [108]. Bu manyetizasyon davranışı (M) Çizelge 2.4’ de gösterildiği gibi beş grupta sınıflandırılır.

Çizelge 2.4. Maddelerin manyetik özellikleri bakımından sınıflandırılması [109,110].

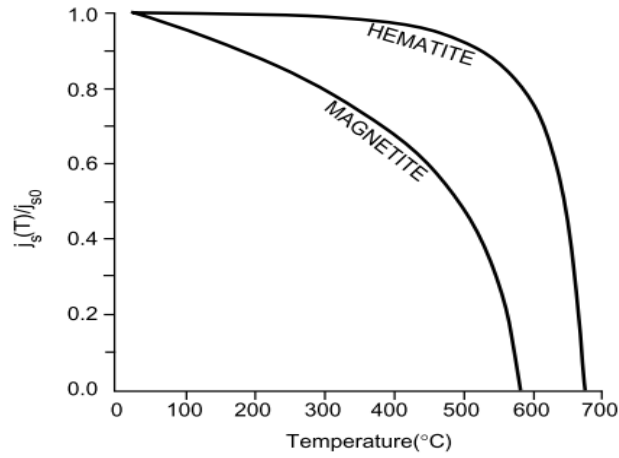
Manyetizma Tipi	Örnek Maddeler	Atomik Davranış	Manyetik Davranış
Diamanyetizma	Soygazlar, birçok metal (ör: Au, Cu, Hg), birçok iyon (Na^+ , Cl^-), su, kuvars, kalsit, çoğu organik bileşik		
Paramanyetizma	Bazı metaller (ör: Al, Na), çoğu geçiş metali, bazı toprak metali iyonları ve toprak oksitleri		
Ferromanyetizma	Demir (Fe), nikel (Ni), kobalt (Co) ve alaşımları, bazı mangan alaşımları (ör: MnBi)		
Ferrimanyetizma	Fe_3O_4 (manyetit), $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (maghemit), karışık demir oksitler ve bazı ferritler		
Antiferromanyetizma	Mangan (Mn), Krom (Cr) ve bileşiklerinin çoğu (ör: MnO , MnS , Cr_2O_3), $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (hematit)		

Manyetik alan uygulandığında; dia, para ve ferromanyetik maddelerin atomlarının manyetik momentleri alana sırasıyla; zıt, kısmi paralel ve paralel olmak üzere yönelirler. Yine sırasıyla manyetik alanı zayıflatır, çizgileri zayıf bir şekilde üzerine çeker ve çizgileri sıklaştırır [111]. Bu durum malzeme içindeki manyetik alanın kendisine uygulanan manyetik alana oranı ($\mu=B/H$) olan manyetik geçirgenlik değerine bağlıdır. Bir maddenin manyetik alandan ne kadar etkilendiğini gösteren kavramlardan biri olan manyetik geçirgenlik diamagnetlerde 1'den biraz küçük, paramagnetlerde 1'den biraz büyük ve ferromagnetlerde 1'den çok büyüktür [112].

Dia ve paramanyetik maddelerin mıknatıslanmaları ferromanyetik maddelere göre çok düşük olup sadece manyetik alan varlığında ortaya çıkar ve kalıcı değildir. Ferrimanyetizma ve antiferromanyetizma ise ferromanyetizmanın alt türleridir. Ferrimagnetler saf elementlerde gözlemlenmez. Ferrit olarak bilinen karışık oksitlerdir [109]. Ferrimanyetizmada malzemenin net manyetik momenti $MO.Fe_2O_3$ bileşiğindeki M^{+2} iyonundan gelir. Buradaki atomların manyetik momentlerinin çiftlenmesi ve alanla aynı yönde yönelmesi, bu malzemeleri ferromanyetik işleyişe benzer yapar. Antiferromanyetik malzemede ise yine momentlerin çiftlenmesi söz konusudur fakat bu ters yöne etkiyen momentler ortaya çıkarır. Ferromanyetik özellikteki atomlar bulunmasına rağmen metal iyonlarındaki spin kaynaklı manyetik momentler birbirini sadeleştirir [108,113]. Ferromagnetler kendiliğinden doyum değerine yakın ya da bu değere tümüyle ulaşmış “domen” denilen manyetik bölgelerden oluşur. Bu bölgelerdeki manyetik momentler farklı yönlerde yönelmiş ve eşit büyüklükte olmakla birlikte çiftlenmiş halde belli bir uyum içindedir. Manyetik alan söz konusu olduğunda domen duvarları kaybolarak çoklu domenden tekli domene geçilir ve spinler alan yönünde yönelirler [111,114].

Periyodik tablonun ve bileşiklerin çoğunu oluşturan dia ve paramagnetler manyetik özellik taşımazken ferromagnetler manyetik alan yokluğunda Curie sıcaklığının (T_c) altında kalıcı manyetik momente sahiptir. Antiferromagnetler için bu sıcaklık Neel sıcaklığı olarak bilinir. Minerallerin kimliğini saptamak için yararlanılabilen Curie sıcaklığı belirleyici bir parametre ve yapısal bir özelliktir [111,115]. Manyetik alan varlığında erişilebilecek maksimum manyetik moment doyum manyetizasyonudur (M_s veya J_s). Bu değer in ötesinde manyetizasyonda bir artış gözlemlenemez. Curie

sıcaklığında doyum manyetizasyonu 0 olur ve sıcaklık arttıkça düzensizlik artar. Moment çiftleşmeleri ortadan kalkar. Atomlar çok yüksek bir frekansla salınarak momentler rastgele yönleri gösterir [108]. Bu sıcaklıktan sonra malzeme ferromanyetik özelliğini kaybederek paramanyetik özelliğe sahip olur. Yani; sadece manyetik alan varlığında mıknatıslanabilir. Bu sıcaklık karakteristik bir özelliktir ve her malzemede aynı değildir [115]. Şekil 2.10'da manyetit (ferroferrik oksit) ve hematitin karakteristik Curie sıcaklıkları gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Manyetit ve hematit demir oksitlerinin manyetizasyon-sıcaklık eğrisi [113].

2.4.4.1. Manyetik Malzemelerin Elektromanyetik Kalkanlamaya Etkisi

Ticari cihazlar, biyolojik sistemler, yüksek kaliteli bilgi teknolojisi, savunma güvenlik teknolojileri ve insan sağlığı açısından belli düzeyde tehlike arz eden elektromanyetik girişim kirliliğine karşı koruyucu bir bariyer görevi gören malzemeler kullanılarak meydana gelen radyasyon yansıtılır ve/veya emilir [116,117]. Genel olarak, metaller gibi iletken malzemeler, yüksek yansıtıcılıkları nedeniyle, maddeleri ya da alanları kendilerini çevreleyen EMD'lerden izole eder. Bu yansıma koruması, kafesin içindeki alanın harici elektrik alanlarına tamamen geçirimsiz olduğu Faraday kafesi ilkesine dayanmaktadır. Öte yandan, absorpsiyon koruması manyetik malzemeler ile ilgilidir. Ferromanyetik veya ferrimanyetik malzemeler, genellikle MHz-GHz aralığının altında ve geniş bir GHz aralığında elektromanyetik koruma sağlayan içsel bir kesme frekansına sahiptir [117].

Koruyucu malzemenin yüzeyi ile elektromanyetik dalgalar arasındaki nispi empedans uyumsuzluğuna dayanan yansıma kaybı (SE_R), manyetik maddenin elektrik iletkenliğinin manyetik geçirgenliğine oranının bir fonksiyonudur. Bu oran sabitken frekansın yüksek olması durumunda kayıp azalır. Ayrıca, ikincil koruma mekanizması olan absorpsiyon kaybı (SE_A), malzemenin elektrik iletkenliği, manyetik geçirgenliği ve kalınlığıyla doğru orantılıdır. Dalganın frekansı ve malzemenin kristal yapısı da önemli parametrelerdir [104,118]. Ferro ve ferrimagnetlerin manyetik dipol yoğunlukları fazladır ve manyetik alan çizgilerini sıklaştırırlar. Dalgaların genliği malzeme içinden geçerken katlanarak azalır. Dolayısıyla absorpsiyon kaybı, ortamda indüklenen akımlar sebebiyle omik kayıplardan ve malzemenin ısınmasından kaynaklanmaktadır [103]. Malzemedan geçen dalganın yoğunluğunun azalma derecesi ise zayıflama sabiti olarak tanımlanmaktadır [117]. Öte yandan çoklu yansıma kaybı (SE_M), kalınlığa, gözenekli yapıya ve penetrasyon derinliğine bağlıdır. Kalınlık, penetrasyon derinliğinden fazla olduğunda veya kayıp 10 dB'den fazlaysa ihmal edilebilir [119].

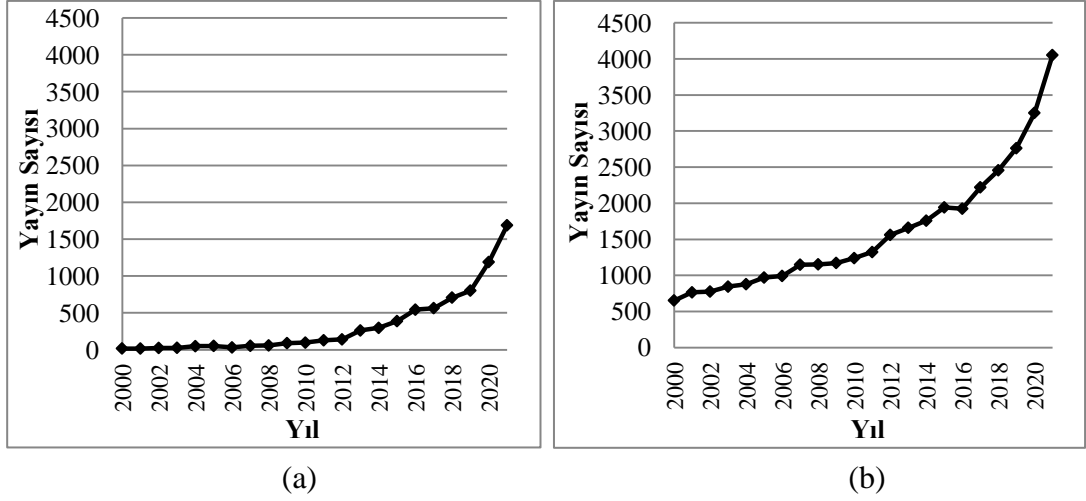
Maddenin düşük frekans, düşük empedans ve yüksek yoğunluklu elektromanyetik dalgalarından korunması karmaşık bir problemdir. Yansıma kayıpları, düşük empedanslı dalgalar için önemli ölçüde azalır, yani dalga empedans değeri kompozitin içsel empedansına yakın olduğu zaman ve düşük frekans söz konusuysen absorpsiyon kayıpları azalır [116]. Manyetik momenti kaybolmayan bir manyetik yapı özelliği sergileyen malzemelerin, yani ferromanyetik cisimlerin kullanılması, genellikle manyetik alanların korunmasını arttırmaktadır. Bu cisimler yüksek manyetik akıyı azaltır ve manyetik akı çizgilerinin sapmasına neden olur [120]. Esasen bu kalkanlamanın nedeni, eşzamanlı olarak ortaya çıkan iki fiziksel mekanizmanın bir sonucudur: malzemelerin yüksek manyetik geçirgenliği boyunca geçiş yapan manyetik akı ve değişen manyetik alan sonucu indüklenen girdap akımı nedeniyle akının tekrar yönlendirilmesi [116].

Manyetik metallerin (ferromagnetler) kalkanlama etkinliği için ana avantajı, yüksek iletkenliği olup absorpsiyon yoluyla koruma için mükemmeldirler. Bununla birlikte, bazı manyetik metaller yüksek geçirgenliğe sahiptir. Genel olarak, bu maddeler yüksek ve düşük frekanslı elektromanyetik ve elektrostatik alanlara karşı çok iyi bir

koruma sağlar; ancak metal ve alaşımlarının yoğunluğu fazladır ve korozyon tehdidine karşı daha açıktırlar [119]. Manyetik seramikler (ferrimagnetler) ise kalkanlama amaçlı kullanım açısından metal ve karbonlardan daha az yaygındırlar. Bu esas olarak düşük iletkenliklerinden dolayıdır ama bazıları bir dereceye kadar iletkenlik göstermeleri nedeniyle nispeten daha çekicidir. Manyetit (Fe_3O_4), nikel ferrit (NiFe_2O_4) vb. manyetik seramikler manyetik metallere benzer şekilde, absorpsiyon koruması için oldukça etkilidirler [103]. Yüksek manyetik geçirgenliğe sahip bu malzemeler, hassas cihazları manyetik alanların neden olduğu elektrik gürültüsünden korur. Aynı şekilde, düşük frekanslı manyetik alanlar yayan cihazların izolasyonunu da sağlayabilirler [121]. Bu malzemeler manyetik metallere nazaran korozyona karşı ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı olmaları sebebiyle yüksek sıcaklıkta kalkanlama sağlamak için daha avantajlıdırlar. İletkenliklerinin düşük olmasından dolayı iletken bir bileşenle (ör; karbon esaslı moleküller, iletken polimerler vb.) sinerjik kullanımları koruma sağlamak için daha etkili olmaktadır. Bu nedenle, araştırmalar çoğunlukla seramik-karbon veya seramik-metal kompozitlerini içerir [103].

2.5. LİTERATÜR TARAMASI

Gerçekleştirilen literatür taramasında jeopolimer çalışmalarının 2000 yılından bugüne yayın sayısına ilişkin istatistik Şekil 2.11-a'da, elektromanyetik kalkanlama anahtar terimi ile gerçekleştirilen taramada 2000 yılından bugüne yayın sayısına ilişkin istatistik Şekil 2.11-b'de verilmiştir. Jeopolimer çalışmalarının %0,72'si doğal puzolanlarla gerçekleştirilirken, elektromanyetik kalkanlama konusunda beton üzerinde %1,22, jeopolimer malzemeler üzerinde % 007 kadar çalışma bulunmaktadır. Aşağıda detayları verilen çalışmalar konuya en yakın çalışmalar arasından seçilmiş olup, bu çalışmalardan elde edilen bilgiler doğrultusunda çalışma planlamaları ve değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.11. Yayın istatistiği (2000-2021) a) jeopolimer çalışmalarının istatistiği [122], b) elektromanyetik kalkanlama çalışmalarının istatistiği [123].

Öksüzer (2016), çalışmasında farklı oranlarda Bayburt taşı ve mermer atıkları kullanarak bunları 10M NaOH ile aktive edip jeopolimer hamurlar üretmiştir. Bayburt taşı ve mermer atıklarının farklı inceliklerde kullanılmasıyla birlikte karışıma belli oranlarda polipropilen mikro lifi ilave edilmiş, ayrıca lifsiz de üretim gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, kapiler su emme, birim hacim ağırlık, aşınma direnci, ısı iletkenlik ve yüksek sıcaklığın dayanıma etkisi belirlenmiştir. Ayrıca numuneler üzerine mikro yapı analizleri de yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda, 90 günde lifsiz kompozitte %60 Bayburt taşı kullanımıyla yaklaşık 34 MPa basınç dayanıma, lifli kompozitlerde ise 39 MPa basınç dayanımına erişilmiştir. Yaklaşık %25-45 oranlarında görünür porozite değerine sahip jeopolimer kompozit hamurların su dirençlerinin genel olarak zayıf olduğu belirlenmiştir [43].

Girgin'in (2016) yaptığı çalışmada UK ve metakaolin NaOH ve Sodyum silikatla aktifleştirilmiş, farklı sıcaklık ve sürelerde kür uygulanmış, ardından pasta örneklerinin basınç dayanımları belirlenmiş ve numuneler 24 saat su tankında tutulmuştur. Su emme, birim hacim ağırlık, görünür yoğunluk ve görünen porozite değerleri belirlenen örneklerde kür süresinin artmasıyla porozite ve su emme oranlarının azaldığı görülmüş, yoğunluk değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bulgulara göre, genel olarak en yüksek dayanım değerlerinin %40 MK katkılı numunelerde olduğu, öte yandan basınç değerlerinin 8,4 MPa – 28,9 MPa arasında

değişkenlik gösterdiği görülmüştür. Jeopolimer pastaların görünen porozite oranları % 26,9 - % 45,5, su emme oranları ise % 16,7 - % 38,7 arasındadır [58].

Tekin (2016), alkali aktivatör olarak 1 M, 5 M ve 10 M NaOH ile doğal puzolan atıkları, traverten ve mermer kullanarak jeopolimer kompozit hamurları üretmiştir. Numunelere kür işlemi fırında 20, 45 ve 75 °C sıcaklıklarda 24 saat uygulanmıştır. Sonrasında hamurlar ayrı ayrı ıslak ve kuru ortama maruz bırakılmıştır. Mukavemet testleri 2, 3, 7, 28 ve 90. kür sürelerinde yapılmıştır. Numunelerin basınç dayanımlarının ıslak ortam kürü neticesinde zamana bağlı olarak azaldığı, kuru koşullarda ise kür süresiyle arttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin yaş koşullarda basınç dayanımları zamana bağlı olarak azalmış, kuru koşullarda ise kür süresi ile artmıştır. En yüksek basınç dayanımı 90. günde, 10 M derişime sahip, kuru durumda herhangi bir ısıtma olmadan (20°C) kürlenlen hamurda 46 MPa olarak ölçülmüştür [68].

Sikora vd. (2016), nano-Fe₃O₄'ü ağırlıkça %1-5 oranında çimento yerine kullanarak manyetitinin mekanik ve mikro yapı üzerinde oluşturduğu etkiyi incelemişlerdir. Bu nanopartikülün toplam gözenekliliği azaltan, mikro yapısal özellikleri iyileştiren ve böylece kompozitin yoğunluğunu artıran bir dolgu görevi gördüğü saptanmıştır. Fe₃O₄'ün optimum ilavesi %3 olarak belirlenmiş, bu doğrultuda üretilen numunelerin basınç dayanımlarında %20'ye kadar bir artış söz konusu olmuştur. Nanomagnetin varlığının, çimento hidratasyon oranını ve ana hidratasyon ürünlerini etkilemediği görülmüştür. Optimum sınırın (%3) aşılması durumunda olumlu etkilerin nötralize olduğu, yüksek yüzey enerjisinden dolayı çatlak oluşumu, aglomerasyon eğilimi ve bunlara bağlı şekilde mukavemet bozulması gözlemlenmiştir [124].

Ekinci (2017), çalışmasında iki farklı grup halinde ürettiği jeopolimer betonlarda Nevşehir yöresinden temin edilen volkanik tüfü kullanmış, grupları ilk grup silis modülü 0.8 ve 0.6, ikinci grup 10, 12, 14 ve 16 M NaOH bazında belirlemiştir. Karışımda farklı alkali ç/b ve karışım sonucu farklı kür sıcaklıkları uygulanmıştır. İki grupta da en yüksek basınç dayanımına sahip betonlara belli ikamelerde nano silika, mikro silika ve stiren-bütadien lateks katkılarının etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara göre; jeopolimer hamur, harç ve beton üretiminde volkanik tüfün kullanılabileceği

belirlenmiştir. Öte yandan, NaOH ile aktifleştirilen jeopolimer betonların basınç dayanımlarının, silis kullanılarak aktifleştirilenlerinkine kıyasla daha yüksek olduğu tespit edilmiş, SEM analizi ve su emme deneyleri sonuçlarına göre ise kompakt bir yapı elde etmede mikro silisin etkili olduğu görülmüştür [45].

Guan vd. (2017), elektromanyetik dalga koruyucu ve düşük maliyetli bir malzeme elde etmek için doğal manyetit (Fe_3O_4) çimentoda kullanmıştır. Kompozitlerin dielektrik, manyetik ve EMD soğurma özellikleri, 2,6-3,95 GHz aralığında karakterize edilmiştir. Bulgulara göre, kompozitlerin dielektrik ve manyetik kayıplarında artma olduğu, doğal manyetit tozlarının ilavesiyle elektromanyetik soğurma performansının iyileştiği gözlemlenmiştir. En iyi emici özelliğine %15 manyetit içerikli kompozitlerin sahip olduğu görülmüş, 3,7 GHz'de -28 dB'lik yansıma kaybıyla en yüksek soğurma değerine ve soğurma bant genişliği (<-10 dB) 0.8 GHz'e ulaşılmıştır [125].

Lesbayev vd. (2017), çimentolu kompozit karışımlarında kullandıkları Fe_3O_4 nanopartiküllerinin mekanik ve elektromanyetik koruyucu özelliklerine etkilerini incelemişlerdir. Küresel ve 12-30 nm boyut aralığındaki manyetitlerin çimentoya %0,5 kütle konsantrasyonundaki ilavesinin eğilme mukavemetine olumsuz etkisinin olmadığı görülmüştür. Nano-parçacık katkılı numunelerin, 0,7 GHz ile 13 GHz frekans aralığı dahilinde mikrodalgalara karşı daha iyi koruma sağladığı, elektromanyetik kalkanlamada 10 mm kalınlıkta 1,5 GHz frekans doğrultusunda 19,9 dB ile maksimum verimliliği gösterdiği belirtilmiştir [126].

Bragança vd. (2017), manyetit nano oksidin beton özellikleri üzerindeki etkisini incelenmiştir. 500 gün boyunca klorür ve sülfat iyonları içeren ortamlara maruz kalınması sonucu, %1 ferroferrik oksit (Fe_3O_4) parçacıkları içeren betonun, Fe_3O_4 içermeyenlere göre agresif iyonlara karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmış, daha düşük su emme ve boşluk oranına, ayrıca daha üstün elektrokimyasal stabiliteye sahip olduğu görülmüştür. Referans numunelere kıyasla manyetitin mikro yapıyı iyileştirdiği, korozyon direncini de artırdığı gözlenmiştir [127].

Farhan vd. (2018), farklı tipteki çelik liflerin (düz mikro çelik lif, deforme makro çelik lif ve hibrit çelik lif), ortam koşullarıyla kürlenene, alkali ile aktive edilmiş cüruf-uçucu kül jeopolimer örneklerinin mühendislik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Örneklerde işlenebilirliğin liflerin ikame oranının artmasıyla azaldığı; basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarının ise arttığı tespit edilmiş, lif ilavesiyle yapı daha sünek hale getirilmiştir. Her üç lif tipinin de hacimce %2 eklenmesi, mekanik özellikleri iyileştirmiş, en iyi gelişmenin ise hibrit çelik lifli (%1 düz mikro çelik lif + %1 deforme makro çelik lif) jeopolimer örnekte olduğu görülmüştür [128].

Najm (2018) farklı konsantrasyonlardaki sodyum hidroksit (NaOH) ve değişken lif türleri (çelik ve polipropilen lifler) içeren uçucu kül/cüruf esaslı jeopolimer betonların performansını incelemeyi amaçlamıştır. Çözeltide NaOH ve Na_2SiO_3 aktivatörleri bulunmakla birlikte $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2.5'a sabitlenmiştir. Çalışma sonucunda, çelik ve polipropilen lif takviyesinin betonda kırılma enerjisi önlediği belirtilerek lif katkılarının betonda yarmada çekme mukavemeti, eğilme mukavemeti, yük sapma eğrisi altındaki alan ve kırılma enerji derecesinde üstün artışa neden olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, elyaf takviyeli betonlarda çeşitli derişimlerdeki NaOH'un davranışa etkisinin daha az önemli olduğu vurgulanmıştır [129].

Şinik'in (2019) hammadde olarak kullandığı UK'yı NaOH ve Na_2SiO_3 ile aktive ettiği çalışmasında jeopolimer beton örnekleri termal kür prosesi için üç farklı sürede (5,8 ve 24 saat) ve üç farklı sıcaklıklarda (50 °C, 60 °C ve 70 °C) kür işlemi gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık arttıkça jeopolimerizasyon mekanizmasının arttığı, buna bağlı olarak boşluklu yapının azaldığı ve porozite-su emme değerlerinde de azalma olduğu gözlenmiştir [6].

Arslan (2019), bazalt ve polivinil alkol lif katkılı, metakaolin ve kolemanit bağlayıcılarını alkalilerle aktifleştirmiştir. Numunelere ıslanma-kuruma ve ısı kürü olmak üzere iki farklı kür uygulamıştır. Yüksek sıcaklık etkisi (200 °C, 400 °C ve 600 °C) sonucu dayanımların öngörülenden yüksek olduğu görülmüştür. Numunelerin stabil yapısını koruduğu ve Si-O-Al bağlarının ıslanma-kuruma kürü

uygulanmış numunelerde daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, lif oranındaki artışın dayanıma olumlu katkısının olduğu belirtilmiştir [15].

Dirikolu (2019), Bayburt bölgesinde yer alan çeşitli özelliğe sahip öğütülmüş tüfleri $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ve $\text{Ca}(\text{OH})_2 +\text{Na}_2\text{SiO}_3$ aktivatörleri ile belli oranlarda karıştırarak alkali aktive edilmiş hamurlar elde etmiştir. Ayrıca, karışıma belirli ikame oranlarında öğütülmüş mermer de eklenmiştir. Sertleşmiş hamurlar üzerine 2, 28 ve 90 gün yaşları esas alınarak basınç dayanımı ve su emme deneyleri uygulanmıştır. Bazı hamur karışımlarında basınç dayanımlarının 28 günden sonra azaldığı görülmüş, çoğu hamurda değerlerin 10 MPa – 38 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. 90 gün sonunda $\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{SiO}_3$ aktivatörlü hamurlarda en yüksek dayanım 37,8 MPa olarak %100 BYT ile üretilmiş hamurda, $\text{Ca}(\text{OH})_2+ \text{Na}_2\text{SiO}_3$ aktivatörü ile üretilen hamurlarda ise bu değer 19,7 MPa olarak %100 BBT ile üretilmiş hamurda görülmüştür. Bulgulara göre; $\text{NaOH}/\text{Na}_2\text{SiO}_3$ oranı, çözelti/toz oranı, çözeltinin sıcaklığı ve NaOH molaritesinin deney sonuçlarındaki etkilerinin önemli olduğu vurgulanmıştır [20].

Mansouri vd. (2019), betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek amacıyla çalışmalarında nano-manyetik ferroferrik oksidi (Fe_3O_4) kullanmış, bu bileşenin betondaki su emme yüzdesi, basınç dayanımı ve klorür iyonu geçirgenliği üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çimento yerine ağırlıkça beş farklı miktarda manyetik nanoparçacık (0.5, 0.75, 1, 2 ve %3) ikame edilmiştir. Sonuçlara göre, %2 oranında manyetik nanoparçacık ikamesinin, su emme yüzdesi, basınç dayanımı ve klorür iyonu geçirgenliği bakımından en iyi performansı gösterdiği belirtilmiştir [130].

Şahin ve Tekin (2020), Bayburt ilinde yer alan ve özellikle yapı kaplamasında dekoratif taş amacıyla kullanılan zeolitik tüflerin çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu kapsamda, Beyaz Bayburt Taşı olarak bilinen zeolit tüfler öğütülmüş ve devamında çimento yerine %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında kullanılmıştır. Elde edilen farklı tip çimentolar kullanılarak üretilen taze çimento hamurları üzerinde priz başlangıcı-bitişi, kıvam ve hacim sabitliği deneyleri yapılmış, sertleşmiş çimento harçları üzerinde ise eğilme ve basınç

dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlara göre, Beyaz Bayburt zeolitik tütünün çimento yerine %30'a kadar kullanılabileceği belirlenmiştir. Erken dayanımlarda gözle görünür azalışlar olmamış, uzun süreli (270 günlük) dayanımların ise puzolanik aktivite sayesinde arttığı görülmüştür. Çimento harçlarında taze haldeki %30'a kadar çıkan işlenebilirlik kayıplarının uzun sürede mekanik mukavemetlere olumsuz etkisi gözlenmemiştir [131].

Vlasceanu vd. (2020), radar antenlerindeki uygulamalar için tasarlanmış dielektrik özelliklere sahip jeopolimer esaslı kompozitler geliştirmişlerdir. Bunun için bu çalışma doğrultusunda üç metakaolin ve iki alkali çözeltiye dayalı çeşitli karışımlar formülize edilmiştir. Karışımlarda manyetit ağırlıkça %1, 5 veya %10 oranında kullanılmış, ayrıca dielektrik incelemeler 2 ile 3.3 GHz arasında yapılmıştır. Sonuçlar, metakaolin tiplerinin alkali aktivasyonun doğasında önemli bir etkiye sahip olduğunu fakat dielektrik özellikler üzerinde hiçbir etki göstermediklerini belirtmiştir. Aslında, geçirgenlikteki 3.5'ten 5.9'a olan artış, alkali çözeltideki değişikliklerle kanıtlanır. Polikondenzasyon reaksiyonu üzerinde ağırlıkça %10'a kadar olan manyetit ilavesinin çok az bir etkiye sahip olduğu, manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabiti değerlerinde hafif bir artışa neden olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, manyetik geçirgenliğin yüksek bağıl nemde belli oranda arttığı gözlenmiştir [132].

Wanasinghe vd. (2020), çimento esaslı kompozitlere elektromanyetik kalkanlama özelliği kazandırmak için 3,6 ve 12 mm uzunluğunda boyutlandırılmamış karbon lif eklemiş, ikame oranlarını %0,1, %0,3, %0,5 ve %0,7 şeklinde belirlemiştir. Uygulanan deney sonuçlarına göre, karışımlara karbon fiberlerin eklenmesi sonucu eğilme, elektriksel iletkenlik ve elektromanyetik parazit koruma değerlerinde önemli bir gelişmenin olduğu saptanmıştır. Ağırlık oranı %0,7 ve boyutu 12 mm olan karbon fiberli kompozitin en yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olduğu, yine aynı numunenin 300 MHz ile 1,5 GHz frekans aralığında yaklaşık 40-60 dB ile en iyi elektromanyetik kalkanlamayı gösterdiği tespit edilmiştir [104].

Özen (2021), volkanik tuf (Bayburt Tufu) esaslı geopolimerlerin Portland çimentosuna alternatif kullanım potansiyellerini araştırmıştır. Çalışmada alkali

aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Kür sıcaklığı ve süresinin etkisini gözlemlemek için $40\text{ }^\circ\text{C}$ - $90\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklar; 7, 28, 56 ve 90 günlük süreler tayin edilmiştir. $40\text{ }^\circ\text{C}$ 'de kür edilen geopolimerin (90 günlük) 30 MPa ile en yüksek basınç dayanımı değerini verdiği görülmüştür. Yüksek erken basınç dayanımı için yüksek sıcaklıklarda termal kür işlemi, yüksek geç basınç dayanımı için ise düşük sıcaklıklarda termal kür işlemi önerilmektedir. Ayrıca, feldispatın üretilen geopolimerlerin dayanımı üzerinde esas etkili mineral olduğu, bunun yanı sıra hammaddenin fiziksel özelliklerine kuvars minerallerinin etkisi dolayısıyla geopolimerleşme mekanizmasında pozitif etki olduğu tespit edilmiştir [69].

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. MATERYAL

Bayburt ili ve civarında mevcut olan ve Bayburt Taşı olarak anılan zeolitik tuf ve tüfitleri özellikle yapı malzemesi olarak kullanılmasıyla şehir ekonomisinde öneme sahiptir. Geçmişte yapı bloğu, günümüzde de yapı teknolojisindeki gelişmeler sebebiyle döşeme ve cephe kaplaması olarak kullanılan bu taşlar yumuşak, hafif yapılıdır ve kolay işlenebilmektedir. Bu sayede dekoratif amaçlı ve mihrap, mezar, barbekü vb. yapımında da kullanılırlar [43,133]. Tüfler genellikle sarımsı-krem ve krem renklidir. Ancak oldukça çatlaklı olup ayrışan bazı taşların yüzeyleri alterasyon sebebiyle sarımsı kahve renklerindedir. Taş ocaklarının bazı bölgelerinde tuf içlerinde yeşil renginde (zeolit ve klorit) beneklerin varlığı ve kayacın yoğunlaştığı yerlerde zeolitlenme ve kloritlenme sebebiyle tümüyle yeşil tonlarına sahip olduğu gözlenmiştir. İnce taneli tüflerde klorit mineralinin yağışlar nedeniyle yıkanması ve bozulmasından ötürü ikincil küçük gözenekli görünüm belirlenmiştir [20].

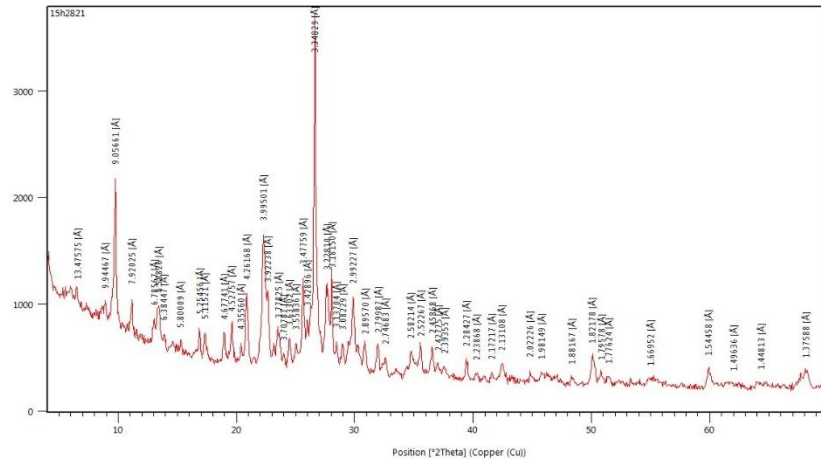
Yapılan çalışmalar sonucunda, Bayburt ve çevresinde (Top Tepe, Gevenli, Sırataşlar, Gümüşdamla ve Konakdağ sahalarında) Bayburt Taşı'nın tahmini blok verimine göre görünür rezervi yaklaşık 2.5 milyon ton; muhtemel rezervi 650 bin ton ve mümkün rezervi ise 600 bin ton olarak hesaplanmıştır [134]. Bayburt bölgesinde yer alan tüfler renklerine göre beyaz, yeşil ve sarı olmak üzere üç türde sınıflandırılmaktadır. Bu çalışmada beyaz ve yeşil tuf kullanılmıştır.

3.1.1. Doğal Puzolan (Tras)

Bayburt ilinde bulunan yeşil renkli traslar riyolitik yapılu bir tuf olup, volkanik malzemeden oluşan bir matris ve matris içerisinde kuvars, plajiolaz ve kloritleşmiş biyotit mineralleri bulunmaktadır. Matris ise; kuvars ve feldspat mikrolitleri ile klorit, serisit, karbonat ve volkanik malzemeleri içermektedir. Yoğunluğu düşük ve ağırlıkça su emme oranı yüksek olmasına rağmen basınç, eğilme ve aşınma dirençleri oldukça yüksektir [135,136]. Bayburt ilinde bulunan ve deneysel çalışmalarda temel bileşen olan Bayburt Yeşil Trasın (BYT) fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.1, BYT’nin öğütme sonrası halini, Şekil 3.2 ise minerolojik özelliklerini göstermektedir.



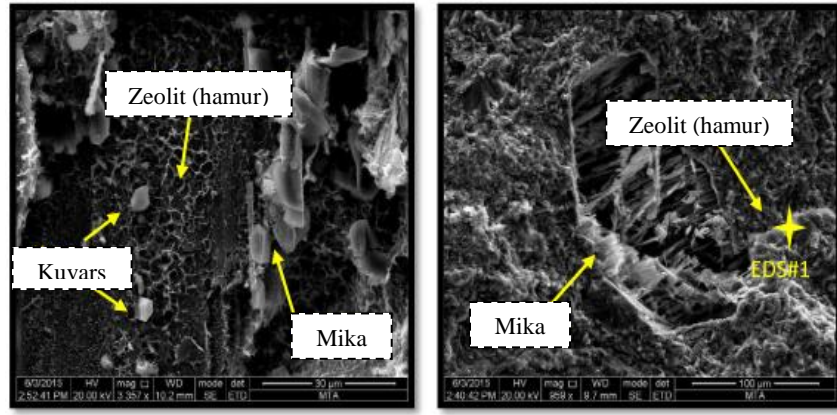
Şekil 3.1. Bayburt ili Yeşil Trasının öğütüldükten sonraki görüntüsü



Şekil 3.2. BYT’nin minerolojik (XRD) analizi [20].

MTA mineraloji ve petrografi laboratuvarında BYT üzerinde yapılan analizlere göre: BYT, makroskobik olarak masif yapılu, ince taneli bir yapıya sahip olup grimsi yeşil

renktedir. Mikroskopik olarak ise dokusu porfiriktir ve içinde kuvars, zeolit, alkali feldspat, biyotit, plajiyoklas ve opak mineraller barındırmaktadır. Tipik tuf dokusu gözlenen kayada dağınık halde fenokristaller içeren hamurun neredeyse tümü zeolit grubu minerallerden oluşmuş ve biyotit mineralleri de akma dokuları boyunca yer almaktadır. Biyotit minerallerinde olası klorit dönüşümleri de söz konudur. Şekil 3.2’de verilen XRD analizi sonucu, yoğun biçimde zeolit, kuvars, feldspat ve mika grubu mineralleri görülmüştür. Bu bilgiler, Şekil 3.3’te verilen SEM görüntüleri ile desteklenir niteliktedir.

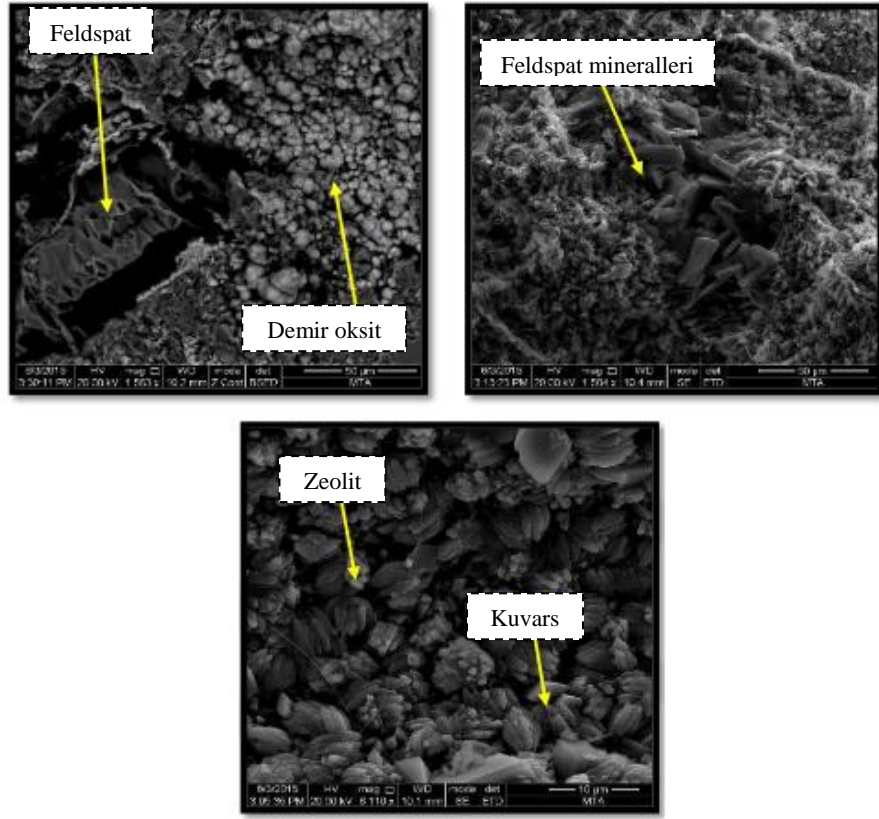


Şekil 3.3. BYT’nin mikroskopik görüntüsü (SEM analizi) [20].

3.1.2. Bayburt İli Beyaz Renkli Zeolitik Tuf

Bayburt ilinde bulunan Beyaz renkli zeolitik tüfler Bayburt Beyaz Taşı (BBT) olarak tanınmıştır, bunlar riyo-dasitik bileşimli vitrik tuf olup, bünyesinde volkanik malzemelerden meydana gelen bir matrisi ve matris içerisinde kuvars, biyotit plajiyoklas ve kaya parçalarını bulundurmaktadır. Matriste, pekişmiş volkanik malzemelerle birlikte kuvars ve feldspat mikrolitleriyle alterasyon ürünü mineral oluşumları ve demiroksit yer almaktadır [135]. BBT’nin fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 3.1’de, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.4, BBT’nin öğütme sonrası halini, Şekil 3.5 ise minerolojik özelliklerini göstermektedir.





Şekil 3.6. BBT'nin mikroskobik görüntüsü (SEM analizi) [20].

Çizelge 3.1. BBT ve BYT'nin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	BYT	BBT
Özgül ağırlık (Taş blok halde)	2,74	2,37
Sertlik (Mohs)	3-4	4-5
Görünür porozite (%)	13,3	20,6
Basınç dayanımı (MPa)	60,8	44,1
Darbe dayanımı (MPa)	3,7	0,8
Eğilme dayanımı (MPa)	22,9	12,3
Ortalama Aşınma dayanımı ($\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$)	26,4	25

Çizelge 3.2. BBT, BYT ve kalsitin kimyasal özellikleri.

Oksitler	BYT	BBT	Kalsit
SiO ₂	49,92	68,92	<0,1
Al ₂ O ₃	10,25	11,96	-
Fe ₂ O ₃	6,00	0,34	<0,005
CaO	13,10	3,85	95-99
MgO	2,57	1,29	<0,2
SO ₃	0,26	0,21	-
Na ₂ O	1,45	0,23	-
K ₂ O	1,82	2,38	-
Toplam Alkali	2,65	1,8	-
Toplam	99,41	99,31	99,21
K.K.	14,04	10,13	-

Çalışmada, BBT ve BYT'yi kırmak ve partikül çapını yaklaşık D_{max} : 20 mm'ye düşürmek için öncelikle laboratuvar tipi kırıcı (konkasör) kullanılmıştır. Kırılan taşların içerisindeki nemin giderilmesi için taşlar 80-100 °C'de 1-3 saat boyunca etüvde bekletilmiştir. Daha sonra D_{90} :100 μ m olacak şekilde yatay eksenli bilyalı değirmende öğütülen malzemelerin tane dağılımı ve spesifik yüzey analizleri Mastersizer 3000 (Malvern) partikül boyutu analiz cihazı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin özgül ağırlığı, özgül yüzey alanı ve inceliği Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. BBT, BYT ve kalsitin özgül ağırlık, özgül yüzey alan ve incelik (elek analizi) değerleri.

Malzemeler	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	İncelik (μ m)		
			D ₉₀	D ₅₀	D ₁₀
BYT	2,61	8420	83,0	26,4	9,82
BBT	2,43	11237	61,3	16,6	3,94
CaCO ₃	2,71	2645	100	35	3,5
Al ₂ O ₃	3,95	2950	70	44,5	28

3.1.3. Mikronize Kalsit (CaCO_3)

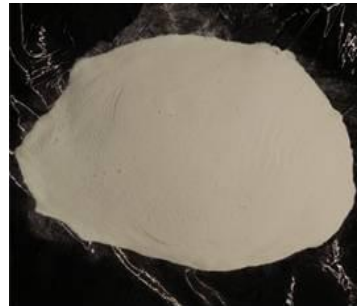
Karbonatlı kayaçların ana minerali olan kalsit, yapısında %95-97 oranında (kalsiyum karbonat) bulundurur. Farklı kristalizasyona sahip olabilirler. Saydam yapıda ve toz formu beyaz renkte olan bu malzemelerin sertliği 3, özgül ağırlığı 2,71'dir. Kimyasal özellikleri Çizelge 3.2'de, görüntüsü Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Kalsit (CaCO_3).

3.1.4. Alüminyum Oksit (Al_2O_3)

Al_2O_3 beyaz renkli, elektro korundum grubuna aittir. Elektrik ark ocaklarında kilin eritilmesi ile üretilir. Al_2O_3 beyaz demir içermez, çok yüksek saflıkta, yüksek derece sertlikte ve 3 mikron alanına kadar olduğu kesin garanti edilen tane iriliğindedir. Kompozit hamurların üretiminde kullanılan, polimerleşmeye ve su direncine katkı sağlayan alüminyum oksit %99,7 saflığındadır. Sanayi Deposu firmasından toz halde F240 kod ile temin edilmiştir. Al_2O_3 'ün fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de, görüntüsü ise Şekil 3.8'de verilmiştir. Oksidal analize göre Al_2O_3 , %99,69 Al_2O_3 , %0,20 Na_2O , %0,02 Fe_2O_3 , %0,03 SiO_2 , %0,05 CaO ve %0,01 TiO içermektedir.



Şekil 3.8. Alüminyum Oksit (Al_2O_3).

3.1.5. Manyetit

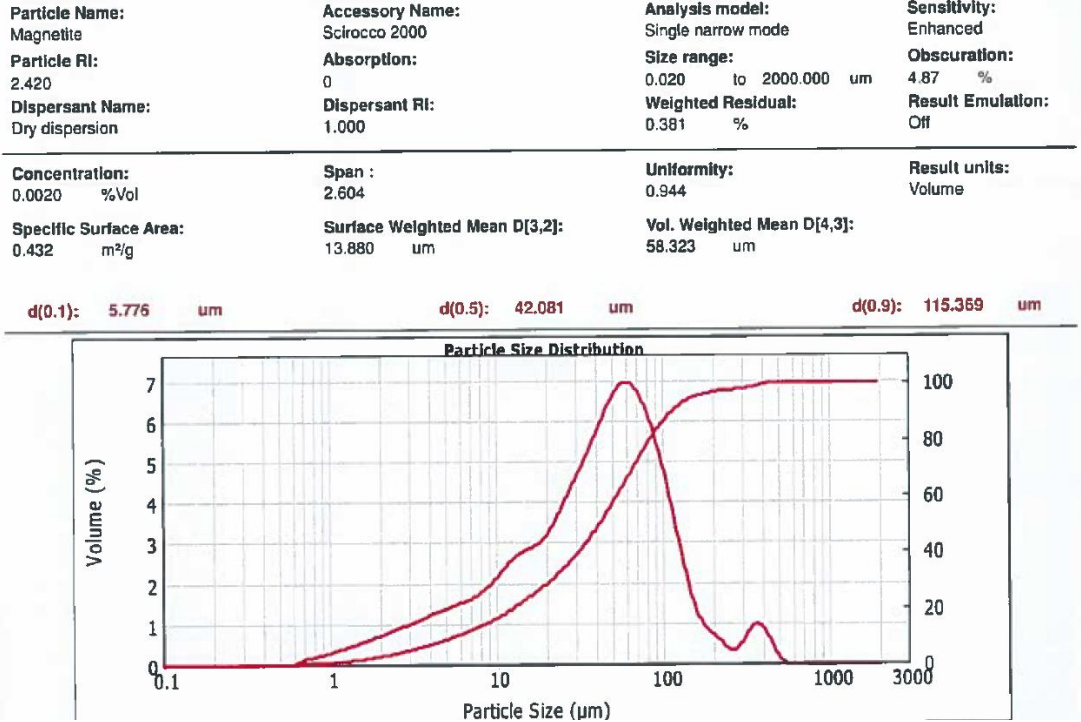
Dünya üzerinde doğal olarak bulunan tüm minerallerin en manyetiği ve demir oksit formunun en önemlisi olan manyetit, $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ kimyasal formülüne sahip, manyetik geçirgenliği (2-16 H/m) yüksek ve yarı iletken bir ferrimanyetik bir maddedir. Rengi siyah ya da kahverengimsi siyahtır ve metalik bir parlaklığı söz konusudur. Kübik, ters spinel kristal sisteme sahip olan bu demir (II, III) oksit, 5-6 Mohs sertliğindedir ve hidrofobiktir. Güçlü mıknatıslık özelliğindeki bu madde kullanıldığı malzemede dipol yoğunluğunu artırmakta, oda sıcaklığında ve 580 – 585 °C Curie sıcaklığına kadar manyetik özelliğini korumaktadır. Bu çalışmada kullanılan manyetit, Erdemir Divriği Madencilik A.Ş.'den temin edilmiştir ve Şekil 3.9'da resmi, Çizelge 3.4'de kimyasal özelliği, Şekil 3.10'da ise tanecik dağılım grafiği verilmiştir.



Şekil 3.9. Manyetit.

Çizelge 3.4. Manyitin (ferroferrik oksit) kimyasal özelliği.

Fe	Fe_3O_4	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	S
67.12	83.85	2.39	0.78	0.18	0.33	~1	~0.01



Şekil 3.10. Manyetite ait tane boyutu dağılım analiz sonucu.

3.1.6. Su ve Alkali Aktivatörler

Çalışmada şehir şebekesinden musluk suyu kullanılmıştır. En az %99,9 saflıkta granül haldeki NaOH ve 39-42 bome hacimde $\text{Na}_2\text{SiO}_3(\text{aq})$ kullanılmıştır. Na_2SiO_3 'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Na_2SiO_3 'ün fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Değer
Yoğunluk (g/cm^3)	1.374
Na_2O (%)	8.62
SiO_2 (%)	27.53
Modül (Ms: $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$)	3.3

3.1.7. Deneylerde Kullanılan Lifler

Çalışmada kullanılan polipropilen (PP) lif Dost Kimya firmasından ve kırpılmış karbon lifler Dost Kimya ve Beşoğlu Endüstri firmalarından, çelik lifler ise Bekaert

firmasından temin edilmiştir. Lifler sırasıyla Şekil 3.11’de gösterilmektedir. Kullanılan liflerin teknik özellikleri ise Çizelge 3.6’da verilmiştir.



Şekil 3.11. a) Polipropilen lif, b) Karbon lif ve c) Çelik lif.

Çizelge 3.6. Polipropilen, karbon ve çelik lifin teknik özellikleri.

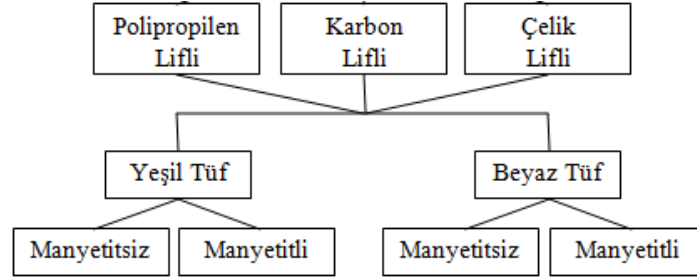
Özellik	Polipropilen	Karbon	Çelik
Çekme Dayanımı (MPa)	450-600	3800	3000
Elastisite Modülü (MPa)	3500	228000	200000
Yumuşama Sıcaklığı (°C)	140	-	1083
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	0.91	1.81	7.87
Lif çapı (µm)	300	7.2	150
Lif Uzunluğu (mm)	12	6	6
Narinlik Oranı (uzunluk/çap)	40	835	40
Elektrik İletkenliği (Ohm ⁻¹ /cm)	-	0.00155	100%

3.2. YÖNTEM

3.2.1. Alkali-Aktive Edilmiş Hamurların Üretimi ve Karışım Tasarımı

Çalışmada NaOH ve Na₂SiO_{3(aq)} aktivatörleri kullanılarak üretilmiş AAH’ler hacimce %2 oranında polipropilen, kırılmış karbon ve pirinç kaplı mikro çelik liflerle güçlendirilmiştir. Yeşil ve beyaz tüflerin ayrı ayrı kullanıldığı AAH’lerde ayrıca hacimce %0 (Referans), %2, %4 ve %8 oranlarında mikronize Fe₃O₄ (manyetit) eklenmiştir. AAH kompozitlerin üretimlerinde tüflerin Al₂O₃ oranının düşük olması sebebiyle tüm karışımlarda toz halde hacimce sabit %5 mikronize

Al_2O_3 ve hacimce 0,45:0,55 oranlarında CaCO_3 :BBT ve CaCO_3 :BYT kullanılmıştır. Çözelti ((%70 Na_2SiO_3 + %30 Su) + (NaOH)) olacak şekilde planlanmıştır. Karışım kompozisyonu (Algoritması) Şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Üretim kombinasyonlarının şematik görünümü.

Temel AAH kompozitlerin üretilmesine başlamadan önce işlenebilirliği optimize edilmiş uygun çözelti oranını tespit edebilmek amacıyla BBT ve BYT esaslı AAH’lar farklı çözelti/toz oranlarında üretilmiştir. Deneme üretimlerinde temel beklenti işlenebilir AAH’lerin en yüksek erken dayanıma ulaşabilmesidir. Deneme üretimlerine ilişkin sonuçlar “Bulgular ve Değerlendirme” bölümünde ele alınmıştır. Esas AAH numunelerinin üretimi için gerekli olan karışım tasarımı, deneme dökümlerinin sonuçları esas alınarak Çizelge 3.7 ve Çizelge 3.8’de verildiği gibi oluşturulmuştur. Her bir üretim grubuna ait AAH numune üretiminde toplam 6’şar adet 40x40x160 mm ve 6’şar adet 50x50x50 mm boyutlu hamur numune üretilmiştir. Her bir grupta belirli günlerde yapılan eğilme-basınç, büzülme deneyleri için toplam 8’er adet 40x40x160 mm boyutlu dikdörtgen prizma ve su emme deneyleri için 8’er adet 50x50x50 mm boyutlu küp numuneler ile elektromanyetik özellik ölçümleri için 1’er adet 300x300x10 mm boyutlarında karo numuneler üretilmiştir. Her bir lif tipi AAH kompozisyonunda hacimce %2 olarak kullanılmıştır. Tasarımlarda polipropilen ve karbon lifli üretimlerde Ç/T (çözelti/toz): 0,7 oranı, çelik lifli üretimlerde ise çelik lifin özgül ağırlığının diğerlerinden daha fazla olması sebebiyle liflerin döküm ve sıkıştırma sırasında homojen dağılmasını sağlamak için Ç/T: 0,54 oranı ile daha düşük kıvamlı AAH kompozit üretilmiştir. Kodlamada **Y**: BYT, **B**: BBT; **P**: polipropilen lif, **K**: karbon lif, **C**: çelik lif; **D**: demir (manyetit), 0, 2, 4 ve 8: karışımda kullanılan hacimce % oranları ifade etmektedir.

Çizelge 3.7. BYT esaslı AAH kompozit numunelerin karışım tasarımı.

No	Kod	NaOH (M)	Ç/T	Bileşen Miktarları (ağırlıkça) (%)						Lif hacmi (%)
				BYT	BBT	Kalsit	Al ₂ O ₃	Manyetit	Çözültü	
1	YPD0	8	0,70	29,1	-	25,0	4,35	0	40,80	2
2	YPD2	8	0,70	26,9	-	22,6	4,21	4,64	40,97	2
3	YPD4	8	0,70	24,5	-	20,6	4,08	9,21	40,88	2
4	YPD8	8	0,70	20,0	-	16,8	3,97	17,51	40,97	2
5	YKD0	8	0,70	28,9	-	24,8	4,31	0	40,47	2
6	YKD2	8	0,70	26,6	-	22,4	4,26	4,75	40,54	2
7	YKD4	8	0,70	24,3	-	20,4	4,15	9,30	40,43	2
8	YKD8	8	0,70	19,8	-	16,6	3,93	17,78	40,47	2
9	YÇD0	8	0,54	29,9	-	25,7	4,67	0	32,56	2
10	YÇD2	8	0,54	27,5	-	23,1	4,58	5,13	32,63	2
11	YÇD4	8	0,54	25,0	-	21,0	4,46	9,99	32,67	2
12	YÇD8	8	0,54	20,3	-	17,1	4,25	19,12	32,79	2

Çizelge 3.8. BBT esaslı AAH kompozit numunelerin karışım tasarımı.

No	Kod	NaOH (M)	Ç/T	Bileşen Miktarları (ağırlıkça) (%)						Lif hacmi (%)
				BYT	BBT	Kalsit	Al ₂ O ₃	Manyetit	Çözültü	
1	BPD0	6	0,70	-	28.2	26.0	4.34	0	40.75	2
2	BPD2	6	0,70	-	25.7	23.7	4.11	4.75	41.05	2
3	BPD4	6	0,70	-	23.6	21.8	3.96	8.88	41.01	2
4	BPD8	6	0,70	-	19.8	18.3	3.77	16.48	41.07	2
5	BKD0	6	0,70	-	27.9	25.7	4.45	0	40.38	2
6	BKD2	6	0,70	-	25.4	23.5	4.26	4.75	40.58	2
7	BKD4	6	0,70	-	23.4	21.6	4.05	9.10	40.44	2
8	BKD8	6	0,70	-	19.6	18.1	3.76	16.64	40.59	2
9	BÇD0	6	0,54	-	28.9	26.7	4.67	0	32.57	2
10	BÇD2	6	0,54	-	26.6	24.6	4.42	4.87	32.71	2
11	BÇD4	6	0,54	-	24.4	22.6	4.26	9.49	32.79	2
12	BÇD8	6	0,54	-	20.6	19.0	3.93	17.56	33.01	2

Molarite ve manyetit miktarları deneme dökümleri sonuçları gözden geçirilerek kararlaştırıldı. Deneme dökümlerinde başlangıçta yeşil ve beyaz tüflü numuneler maksimum mekanik mukavemet değerlerine ulaşabilmek amacıyla 8 mol NaOH

çözeltisi kullanılarak üretilmiştir. Ancak beyaz tüflü numunelerden kıvam alınamaması nedeniyle BBT'li gruplar 6 mol ile üretildi. Maksimum manyetit kullanım yüzdesi ise denemelerde %2 ve %4 olarak test edilmesinin ardından %8'e çıkarılmış, oranın artışı maliyet ve topaklanma riski açısından düşünülmemiştir.

Deneysel AAH numunelerin hazırlanmasında, başlangıçta çözeltiyi hazırlamak için molaritesi ayrı ayrı 6 mol ve 8 mol olarak belirlenen, behere konulan NaOH üzerine bir önceki Dirikolu (2019) tarafından yapılan çalışmada belirlenen maliyet-fiziksel ve mekanik özellik optimizasyonu esasında ağırlıkça %70 Na_2SiO_3 + %30 su karışımı 1000 ml çizgisine kadar ilave edildi. Çözeltinin döküme uygun hale gelmesi amacıyla uygun molarite hesabına göre hesaplanan NaOH'un tamamen çözünmesi ve solüsyonun 55 ± 2 °C'ye düşmesi manyetik karıştırıcı çözeltiyi karıştırırken beklendi. Çözeltinin sıcaklık koşulları uygun olduğunda ve NaOH'ın tamamen çözülmesi tamamlandıktan sonra öncelikle çözelti mikserin haznesine konulmuştur. Ardından toz malzemeler zamanlama ve sırasıyla; BYT ya da BBT (60 s) + Al_2O_3 (30 s) + manyetit (30 s) + kalsit (30 s) + lif (30 s) + hızlı karışım (60 s) olacak şekilde eklenmiştir. Toplamda 240 s karışım sağlanmış ve ardından hızlı katılaşma sebebiyle işlenebilirlik kaybını engellemek amacıyla hızlıca taze hal deneyi ile kalıplamaya geçilmiştir. Ancak bu karışım metodunda bu karışım metodu sonucu priz sonrası manyetitin ince ve manyetik bir malzeme olmasından dolayı topaklaştığı erken dayanım deneyleri sırasında gözlemlenmiş ve bu seri “topaklı üretim” olarak adlandırılarak ikinci ve topaksız üretim için yeniden başka bir proses döküm yöntemi belirlenmiştir. İkinci aşamada aynı tasarım doğrultusunda metodun değiştirilmesiyle, çözeltiye ilk önce manyetit eklenip çözeltide tamamen çözülmesi sağlanarak karışıma devam edilmiş ve bu seri ise “topaksız üretim” olarak isimlendirilmiştir.

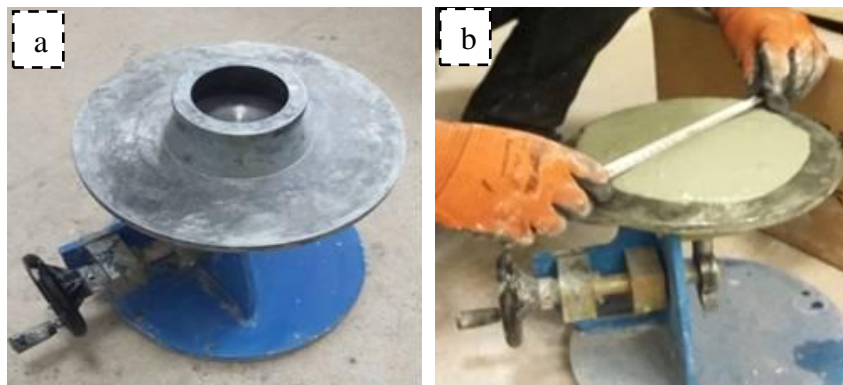
Karışım sonunda taze haldeki hamurlar, yayılma tablası deneyinin ardından 40×40×160 mm, 50×50×50 mm ve 300×300×10 mm hacimli paslanmaz çelik kalıplara döküldü ve 60 s boyunca vibrasyon işlemi yapıldı (bu süre çelik lifli üretimlerde liflerin dibe çökmesini önleyerek uniformluğu sağlamak için çok kısa tutulmuştur).

Kür işlemi, deneme dökümlerinde 50×50×50 mm hacimli numuneler üzerinde oda sıcaklığında ve etüvde (80°C, 24±2 saat) yapılarak iki farklı teknikle denenmiş, alınan sonuçlar itibarıyla asıl dökümlerde numunelerin tümü priz sonrası kalıplardan çıkarılarak etüvde kürlenmiştir. Yüksek erken basınç dayanımı için yüksek sıcaklıklarda termal kür işlemi Özen (2021) tarafından önerilmektedir [69]. Etüvden çıkarılan numuneler, şok etkisine uğramayıp kontrollü soğumaları için strafor/karton kutularda muhafaza edilmiştir. Ayrıca, kompozitler, jeopolimerizasyon mekanizmasının işlevi için döküm esnasından priz alana kadarki süreçte 24±2 °C’de oda sıcaklığında ve %35±%10 bağıl nemde tutulmuş, söz konusu olan karışım ve kürlenme metodu Tekin (2016)’in yapmış olduğu çalışma baz alınarak uygulanmıştır [68].

3.2.2. Taze Haldeki Alkali Aktifleştirilmiş Hamur Deneyleri

3.2.2.1. Yayılma Tablası Deneyi

Karışım tamamlandıktan sonra mikserden alınan hamurların işlenebilirliklerinin test edilmesi için Şekil 3.13-a’da gösterilen pirinçten yapılmış, çapı 252 mm olan yuvarlak tabla ve üst iç çapı 61 mm, alt iç çapı 95 mm ve yüksekliği 50 mm olan kesik koni şeklindeki hazneden yararlanılmıştır.



Şekil 3.13. Yayılma tablası ve yayılma çapı ölçümü.

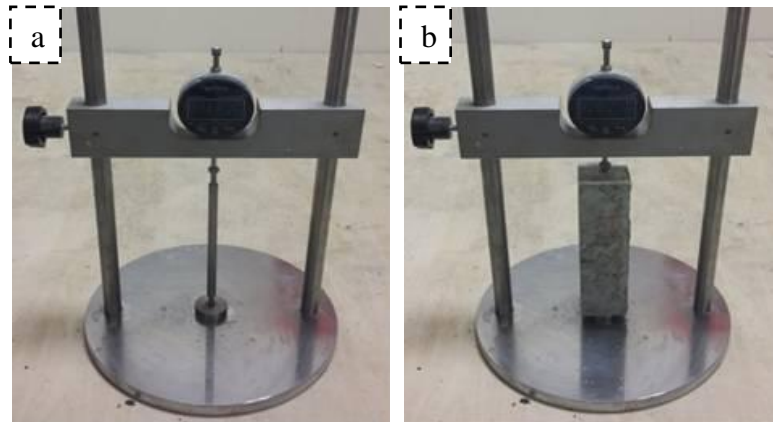
ASTM C1437 standartlarına [137] göre yapılan deneyde hamur, tablanın merkezinde konumlanmış kalıba tamamen doldurulduktan sonra kalıp yavaşça çıkarılarak tablaya

saniyede 1 vuruş olacak şekilde elle 25 darbe uygulanmaktadır. Şekil 3.13-b'de gösterildiği gibi, yayılma çapları birbirine dik olacak şekilde iki taraftan ölçülür ve uzunlukların ortalamaları yayılma değeri olarak kaydedilmiştir.

3.2.3. Sertleşmiş Haldeki Alkali Aktifleştirilmiş Hamur Deneyleri

3.2.3.1. Büzülme Deneyi

40×40×160 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde uygulanan büzülme deneyleri, ASTM C596 – 18'e [138] göre, dijital komparatörlü boy uzama çerçevesi ekipmanlarınca gerçekleştirilmiştir. Ölçümler, aynı zamanda boy uzama çerçevesi ve dijital kumpas kullanılarak iki ayrı ölçüm tekniğiyle gerçekleştirilmiştir. bu kapsamda uçlarına vida yerleştirilmiş büzülme kalıplarına dökülen numuneler prizlerini aldıktan sonra kalıptan çıkarılarak ilk uzunlukları ve ısı kürü sonunda da ikinci kez uzunlukları ölçüldü. Süregelen ölçümler iki sistemle de üretimlerin 2, 7, 14, 28, 56 ve 90. günlerinde yapıldı. Nem ve sıcaklığın da dikkate alındığı ölçümlerde, ölçüm çerçevesinde yapılan testte, ilk olarak paslanmaz çelik referans Şekil 3.14-a'daki gibi cihaza yerleştirildi ve tam olarak yerleşmesi için dikkatlice döndürüldü. Dijital çerçeveden okunan referans değer (L_r) kaydedildi. Aynı işlem Şekil 3.14-b'de gösterildiği üzere numuneler üzerinde de gerçekleştirilerek numunelerin boyu (L_c) kaydedildi. İkinci adımda ise numunelerin boyu Şekil 3.14-c'de gösterilen dijital kumpas cihazıyla ölçüldü (L_k).





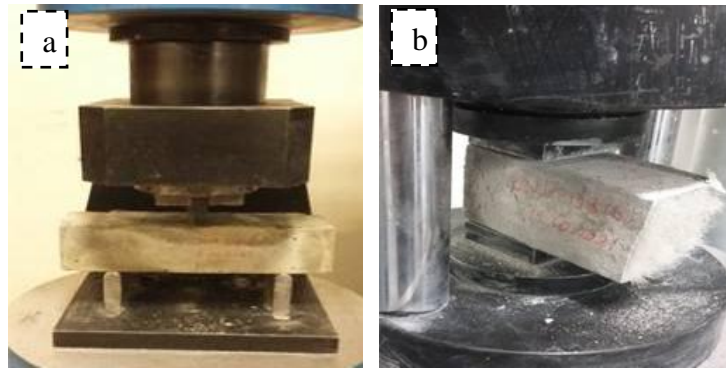
Şekil 3.14. Büzülme ölçüm aşamaları.

Büzülme, Denklem (3.1)'de gösterildiği gibi numunenin dijital çerçevede veya dijital kumpasta ilk ve test günü uzunluk farkının, ilk (kalıptan çıkarıldıktan sonraki) dijital kumpas uzunluğuna bölünmesiyle bulundu ve devamında iki okuma arasındaki fark belirlenerek bir kalibrasyon (ölçümleme) yapıldı.

$$\text{Büzülme (\%)} = \frac{(\text{ilk boy} - \text{son boy}) * 100}{\text{ilk boy}} \quad (3.1)$$

3.2.3.2. Eğilme ve Basınç Dayanımı Deneyleri

40×40×160 mm boyutundaki numuneler üzerinde üç nokta eğilme dayanımı deneyi ASTM C348-18'e [139] göre, basınç dayanımı deneyi ise ASTM C109/C109M-16'e [140] göre 2, 28 ve 90'ıncı günlerde yapılmıştır. Deneylerin öncesinde numuneler tartılarak Birim hacim ağırlıkları (BHA) hesaplanmıştır. Sonra numuneler ilk olarak Şekil 3.15'de gösterildiği gibi üç nokta eğilme deneyi ve ardından kalan iki parçalı 40×40 mm yüzey alanı üzerinde aksenal basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır.



Şekil 3.15. a) Eğilme Dayanımı Testi. b) Basınç Dayanımı Testi.

Numunelerin eğilme ve basınç dayanımlarının hesaplandığı Denklem (3.2) ve Denklem (3.3) aşağıdaki gibidir.

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.2)$$

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

Burada;

σ_e : Eğilme mukavemeti b : Kesit kısa kenar uzunluğu
P : Max. yük miktarı d : Kesit uzun kenar uzunluğu
L : İki nokta arasındaki mesafe σ_b : Basınç mukavemeti
A : Eksenel yüke maruz kalan numune kesit alanı

3.2.3.3. Su Emme Deneyi

50×50×50 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde ASTM C20-00'ye göre 2, 28 ve 90 günlerde su emme deneyi Arşimet metodu esasında gerçekleştirilmiştir. bu kapsamda, ağırlık terazisi ve fırın ekipmanlarının kullanıldığı deneyde, numuneler ilk olarak 24 saat boyunca suda bırakıldı (Şekil 3.16-a). Süre tamamlandıktan sonra sudan çıkarılan, geometrisi bozulmamış (herhangi bir çatlak, şişme veya parçalanma görülmeyen), deneyi gerçekleştirmeye elverişli numunelerin havlu ile kurulanmasının ardından doygun kuru yüzeyleri (A_d) ve sudaki ağırlıkları (A_s) belirlendi (Şekil 3.16-b ve Şekil 3.16-c). Daha sonra ise numuneler Şekil 3.16-d'de gösterildiği gibi 100 ± 5 °C'de fırında 24 saat boyunca tutularak kuruması sağlandı ve çıkarıldıktan sonra kuru ağırlıkları (A_k) ölçüldü. Elde edilen verilerden ve aşağıda belirtilen Denklem (3.4), Denklem (3.5) ve Denklem (3.6)'ten yararlanılarak su emme oranı, özgül ağırlık ve görünen porozite hesaplandı.

$$S(\%) = \frac{(A_d - A_k) * 100}{A_k} \quad (3.4)$$

$$\gamma = \frac{A_k}{A_k - A_s} \quad (3.5)$$

$$P_g = \frac{S * A_k}{A_d - A_s} \quad (3.6)$$

Burada;

S : Su emme oranı

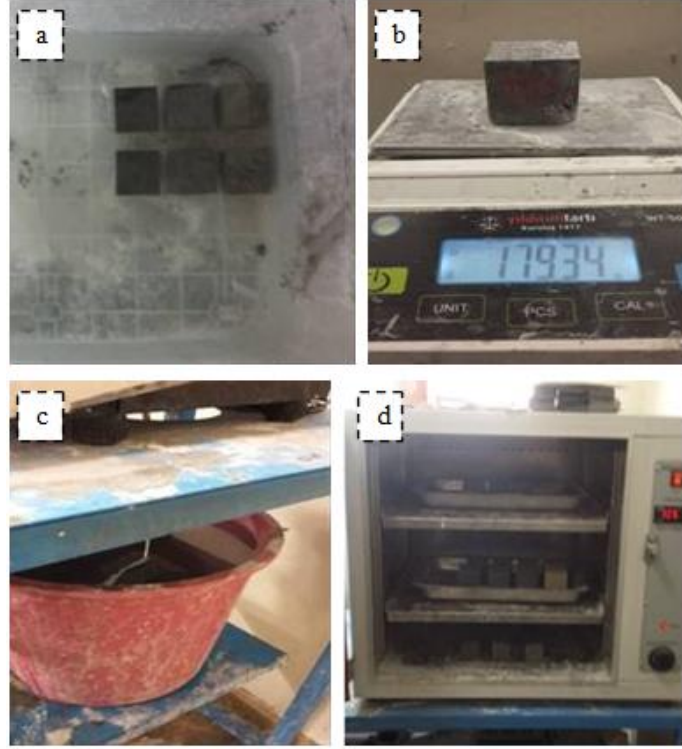
A_d : Doygun kuru yüzey ağırlığı

γ : Özgül ağırlık

A_s : Suda ağırlık

P_g : Görünen porozite

A_k : Etüv kurusu ağırlık



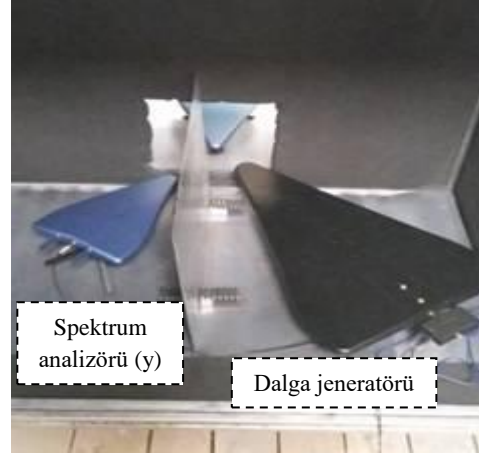
Şekil 3.16. Su emme deneyi.

3.2.3.4. Elektromanyetik Özellik Ölçümleri

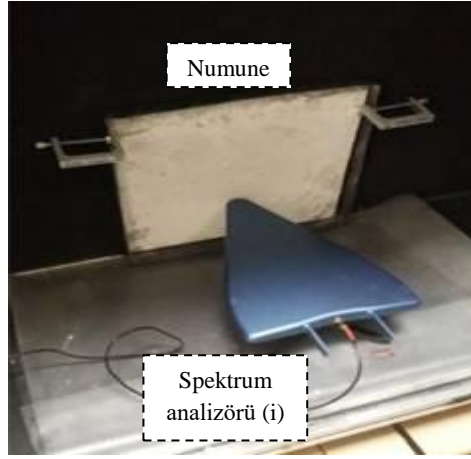
Deney, her bir gruptan üretilen 300×300×10 mm boyutlarında olan kaplama malzemeleri Faraday kafesi içine yerleştirilerek 90 güne kadar elektromanyetik özellikleri yansıma, iletim ve absorpsiyon değerleri olarak dB cinsinden belirlenmiştir. Bunun için gerekli olan Faraday Kafesi DFG 4060 RF Dalga Jeneratörü (EMD Üretci), İki Adet HF 60105 Spektrum Analizörü, Dizüstü Bilgisayar, MCS Spectrum Analyzer Yazılımı ve ekipmanların kurulumu Şekil 3.17’de gösterildiği gibi yapılmıştır.



(a)



(b)

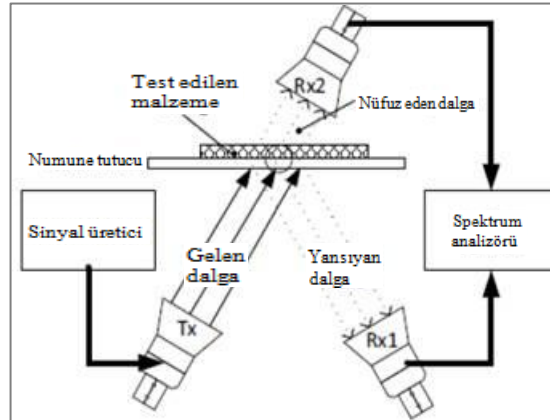


(c)



(d)

Şekil 3.17. Elektromanyetik test için kullanılan ekipmanlar: a) Faraday kafesi, b) dalga jeneratörü ve spektrum analizörü (yansıma), c) spektrum analizörü (iletim) ve numune, d) spektrum analizörü.



Şekil 3.18. Ekipmanların kurulumu ve kaplamanın elektromanyetik özelliklerinin incelenmesi [141].

Başlangıçta kurulum yaparken dalga jeneratörü ve yansıyan dalgaları nüfuz eden spektrum analizörü ile plak haznesinin karşı tarafındaki emilen dalgayı nüfuz eden spektrum analizörü arasında ayna yardımıyla açı koordinasyonu, lazer yardımıyla da aynı seviye sağlanacak şekilde kot koordinasyonu herhangi bir sapmaya sebebiyet vermeyecek şekilde yapılarak ekipmanların konumları, Faraday kafesi içinde kesinleştirildi. Bilgisayara USB kablosuyla bağlı olan jeneratörün analizörlerle olan örgüsü tamamlandıktan sonra plak yerleştirilerek kafes kapatılır ve deney başlatıldı. Numuneler için ölçüm frekans aralığı 900-6000 MHz seçilmiş ve iletim ile yansıma verileri, 900 MHz – 6000 MHz arasında MCS Spektrum Analyzer yazılımınca dB biriminde alınmıştır. Ekipmanların görüntüsü Şekil 3.18'deki gibidir.

3.2.3.5. Mikroyapısal Analizler

Çalışmada alkali-aktive lifli hamurlardan 90 gün yaşında taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X-Işını spektroskopisi (EDS) ve X-Ray difraktogramları (XRD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğüne bağlı Mineraloji ve Petrografi (MTA) Laboratuvarında bulunan FEI marka SEM cihazı ve XRD cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda numuneler 90 gün basınç dayanım deneylerinden sonra hava geçirmeyen poşetler içine konarak MTA'ya ulaştırılmıştır. MTA laboratuvarlarında SEM görüntüleme öncesinde Altın-Paladyum kaplama yapıldıktan sonra SEM ve EDS analizleri art arda gerçekleştirilmiştir. Diğer bir laboratuvarında XRD analizleri yapılmıştır. Analizleri gerçekleştirilecek hamurlarda görüntü alınımları için yüzeylerin temiz, düz ve gözenekli olması önemsenmiştir.

BÖLÜM 4

BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Deney sonuçları, taze ve sertleşmiş hamurlar üzerinde yapılan test sonuçları halinde iki aşamada değerlendirilmiştir. Ancak deney sonuçlarındaki karışıklığı engellemek amacıyla önce yeşil tuf (doğal puzolan:Tras) esaslı polipropilen (PP), karbon ve çelik lifli-manyetitli/manyetitsiz alkali aktive hamurlar, sonrasında beyaz tuf esaslı PP, karbon ve çelik lifli-manyetitli/manyetitsiz alkali aktive hamurların sonuçlarına ait değerlendirmeler yapılmıştır.

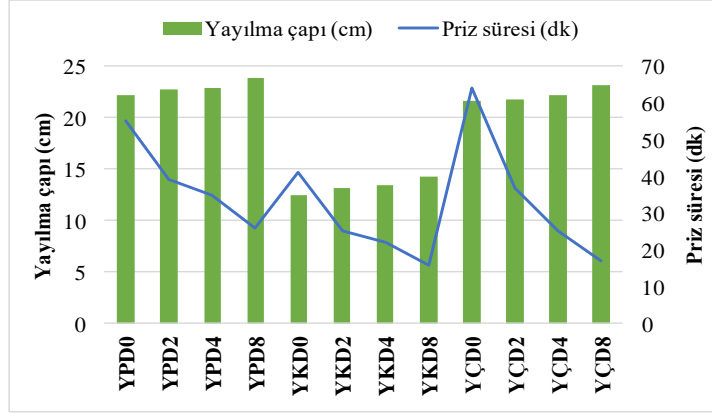
4.1. PRİZ SÜRESİ VE YAYILMA TABLASI DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Yeşil ve beyaz tuf esaslı AAH numunelerin sertleşme süreleri ve yayılma tablası sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Lifle güçlendirilmiş AAH’lerin priz süreleri ve yayılma çapı değerleri.

Kod	Priz süresi (dk)	Yayılma çapı (cm)	Kod	Priz süresi (dk)	Yayılma çapı (cm)
YPD0	55	22,15	BPD0	48	21,75
YPD2	39	22,70	BPD2	34	22,40
YPD4	35	22,95	BPD4	30	22,85
YPD8	26	23,85	BPD8	23	23,60
YKD0	41	12,40	BKD0	35	13,15
YKD2	25	13,15	BKD2	23	14,15
YKD4	22	13,40	BKD4	20	14,45
YKD8	16	14,25	BKD8	14	15,25
YÇD0	64	21,65	BÇD0	48	18,25
YÇD2	37	21,85	BÇD2	31	20,60
YÇD4	25	22,20	BÇD4	22	21,00
YÇD8	17	23,15	BÇD8	15	22,85

Yeşil tüt esaslı AAH numunelerin yayılma deney sonuçları Şekil 4.1’de, Şekil 4.2 ise beyaz tüt esaslı AAH numunelerin deney sonuçlarını göstermektedir. Yeşil ve beyaz tütle üretilen hamurların molaritesi farklı olduğundan priz süreleri ve yayılma verileri mukayese edilmemiştir.

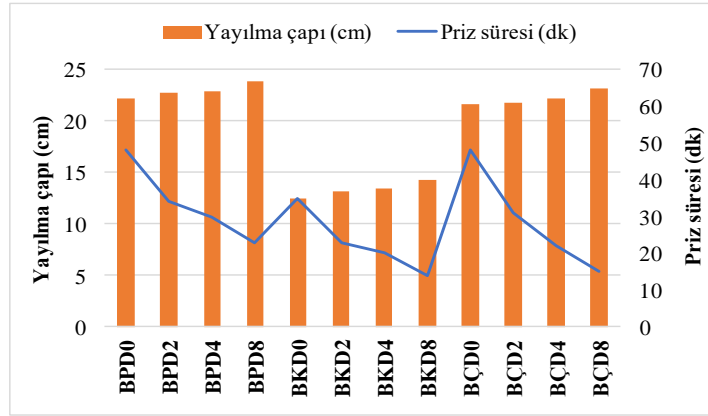


Şekil 4.1. Yeşil tüt esaslı AAH’lerde yayılma ve priz deneyi sonuçları.

Şekil 4.1’deki sonuçlara göre; YPD0, YPD2, YPD3 ve YPD4’ün yayılma oranları tabla çapına göre sırasıyla %87,90, %90,08, %91,07 ve %94,64’tür. YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8’ün yayılma oranları tabla çapına göre sırasıyla %49,21, %52,18, %53,17 ve %56,55’tir. Böylece yeşil tüt esaslı AAH’lerde manyetit oranındaki artış işlenebilirliğin artmasına sebep olmuştur. Artış oranları %2, %4 ve %8 manyetit oranlarına göre sırasıyla yaklaşık olarak her iki lif için %3, %4 ve %7 olarak hesaplanmıştır. Özgül yüzeyi daha fazla olan tütün hamur içindeki oranının manyetit eklenmesi ile birlikte azalmasından dolayı işlenebilirlik artmıştır. Karbon liflerin aşırı su emme özelliğinden dolayı yayılma tablası değerleri PP lifle üretilenlere göre belirgin oranda azalmıştır. Yeşil tüt esaslı AAH’lerde karbon lifler işlenebilirliği PP life göre yaklaşık %40 azaltmıştır.

Çelik lifli yeşil tüt esaslı AAH’ler diğer lifli AAH’lerden daha düşük oranda (ç/t: %54) çözelti kullanılarak üretilmiştir. Buna rağmen YÇD0, YÇD2, YÇD4 ve YÇD8’ün yayılma oranları tabla çapına göre sırasıyla %85,91, %86,71, %88,09 ve %91,86’dır. AAH’larda manyetit oranı arttıkça işlenebilirlik artmıştır. Çelik lif diğer liflere göre işlenebilirliği olumlu etkilemiştir.

Yeşil tuf esaslı AAH'lerin lif tipine bakılmaksızın manyetit ilave oranı arttıkça priz süreleri kısalmıştır. Yeşil tuf esaslı AAH'lerin priz süreleri %2, %4 ve %8 manyetit eklenmesi ile sırasıyla PP lifli AAH'lerde %29, %36 ve %53, karbon lifli AAH'lerde %39, %46 ve %61 ve çelik lifli AAH'lerde %42, %61 ve %74 azalmıştır. Priz süreleri manyetitsiz çelik lifli AAH'ler hariç 1 saati geçmemiş; en hızlı katılma süresi karbon lifli gruplarda meydana gelmiş ve %8 manyetitli karbon ve çelik lifli AAH'lerin katılması 20 dk'dan daha kısa sürede gerçekleşmiştir. Böylece manyetitin katılma reaksiyonlarını hızlandırdığı (atomlar arası mesafeyi kısaltması sebebiyle olabilir) söylenebilir. Geopolimer malzemelerde Fe^{+2} veya Fe^{+3} etkisinin dayanımı artırdığı ve priz sürelerini kısalttığı Davidovits tarafından belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Beyaz tuf esaslı AAH'lerde yayılma ve priz deneyi sonuçları.

Şekil 4.2'deki sonuçlara göre; BPD0, BPD2, BPD4 ve BPD8'ün yayılma oranları tabla çapına göre sırasıyla %86,31, %88,89, %90,67 ve %93,65'tir. BKD0, BKD2, BKD4 ve BKD8'ün yayılma oranları tabla çapına göre sırasıyla %52,18, %56,15, %57,34 ve %60,52'dir. Böylece beyaz tuf esaslı AAH'lerde manyetit oranındaki artış işlenebilirliğin artmasına sebep olmuştur. Artış oranları %2, %4 ve %8 manyetit oranlarına göre sırasıyla yaklaşık olarak her iki lif için %3, %4 ve %7 olarak hesaplanmıştır. Özgül yüzeyi daha fazla olan tufün hamur içindeki oranının manyetit eklenmesi ile birlikte azalmasından dolayı işlenebilirlik artmıştır. Karbon liflerin aşırı su emme özelliğinden dolayı yayılma tablası değerleri PP lifle üretilenlere göre belirgin oranda azalmıştır. Beyaz tuf esaslı AAH'lerde karbon lifler işlenebilirliği PP life göre yaklaşık %33 azaltmıştır.

Çelik lifli beyaz tûf esaslı AAH'ler diğer lifli AAH'lerden daha düşük oranda (%8-9 daha az) çözelti kullanılarak üretilmiştir. Buna rağmen BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8' ün yayılma oranları tabla çapına göre sırasıyla %72,42, %81,75, %83,33 ve %90,67'dir. Çelik lif diğer liflere göre işlenebilirliği olumlu etkilemiştir.

Beyaz tûf esaslı AAH'lerin lif tipine bakılmaksızın manyetit ilave oranı arttıkça priz süreleri kısalmıştır. Priz süreleri %2, %4 ve %8 manyetit eklenmesi ile sırasıyla PP lifli AAH'lerde %29, %38 ve %52, karbon lifli AAH'lerde %34, %43 ve %60, çelik lifli AAH'lerde %35, %54 ve %69 azalmıştır. Priz süreleri en fazla 50 dk olmuştur; en hızlı katılaşma süresi karbon lifli gruplarda görülmüş, %8 manyetit içerikli karbon ve çelik lifli AAH'lerin katılaşması 16 dk'dan daha kısa sürede gerçekleşmiştir.

4.2. EĞİLME VE BASINÇ DAYANIMI DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçlarına ve birim hacim ağırlık hesaplamalarına bu kısımda yer verilmiştir. Elde edilen sonuçlar yeşil ve beyaz tûf esaslı AAH'ler için üç lif tipi dikkate alınarak grafikler oluşturulmuştur. Bu kısım üç alt başlığa ayrılarak, öncelikle deneme üretimlerinden elde edilen basınç dayanımı deney sonuçları ve BHA hesaplamaları, ardından mikro manyetit partiküllerinin topaklanması sonucunda üretilen AAH numunelerin eğilme ve basınç dayanımları ve BHA hesaplamaları, son aşamada ise mikro manyetit partiküllerin homojen dağıtıldığı topaksız sertleşmiş AAH numunelerin eğilme ve basınç dayanımları ve BHA hesaplamaları sunulduktan sonra değerlendirmeler yapılmıştır.

4.2.1. AAH Numunelerinde Ön Deneme Deney Sonuçları ve Değerlendirmeleri

Deneme çalışmalarının amacı, esas (nihai) üretimlere geçmeden önce nihai AAH numune üretimlerinde kullanılabilecek mikronize manyetit oranları, çözelti derişimleri (mol) ve uygulanacak kür tipini belirlemek olmuştur. İlk olarak %2 manyetit oranında yeşil ve beyaz tûf içerikli AAH numuneler daha önceki çalışmalar dikkate alınarak 8 mol derişimli $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ çözeltide üretilmek istenmiştir. 8 mol derişimli $\text{Na}_2\text{SiO}_3 + \text{NaOH}$ çözelti ile hazırlanmış beyaz tûf esaslı AAH

karışımlarından yeterince kıvam alınamayınca (akış masası: 1 cm çökme-14 cm yayılma) iki grupta da 6 mol denenmiştir. 6 mol derişimli $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ çözelti ile hazırlanmış beyaz tüf esaslı AAH'lerden yeterince kıvam alınmış (akış masası: 22 cm yayılma ve 4,5 cm çökme) ve bu üretimlerde 6 mol kabul edilmiştir. 6 mol derişimli $\text{Na}_2\text{SiO}_3+\text{NaOH}$ çözelti ile hazırlanmış yeşil tüf esaslı AAH'lerin kıvamının aşırı akıcı olması nedeniyle tüm yeşil tüflü üretimlerin 8 mol derişimle gerçekleştirilmesi kararlaştırılmıştır. Denemelerin ikinci aşamasında, manyetitli hamurların manyetit içeriği %4'e çıkarılarak dökümler, manyetitsiz/manyetitli-yeşil tüflü/beyaz tüflü kombinasyonlar dahilinde gerçekleştirilmiş, kür tipini belirlemek (oda sıcaklığı/etüv) ve 1. ve 2. gün basınç dayanımı sonuçlarını almak için her gruptan 4 küp (50×50×50 mm) numune üretilmiştir. Kür sıcaklığının 80 °C olarak seçilmesinde literatür baz alınmış olup daha düşük sıcaklıklarda reaksiyon mekanizmasının yavaşladığı, yüksek sıcaklıklarda ise geç dayanımların zayıfladığı, rötrenin arttığı bilinmektedir. Sonuç olarak numunelerden alınan basınç dayanımı deney sonuçları ve BHA değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Deneme numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları ve BHA'ları.

Kod	Manyetit Oranı (%)	Mol	Kür	1 gün		2 gün	
				BHA (g/cm ³)	Basınç Dayanım (MPa)	BHA (g/cm ³)	Basınç Dayanım (MPa)
YD0	0	8	Ortam	1,89	9,9	1,90	10,9
YD0	0	8	24 h 80 °C	1,86	16,1	1,86	16,7
YD4	4	8	Ortam	1,95	7,2	1,99	7,0
YD4	4	8	24 h 80 °C	1,94	13,2	1,94	16,2
BD0	0	6	Ortam	1,76	6,1	1,81	6,6
BD0	0	6	24 h 80 °C	1,75	13,3	1,66	12,1
BD4	4	6	Ortam	1,86	5,0	1,93	8,2
BD4	4	6	24 h 80 °C	1,84	10,2	1,85	16,6

BBT ve BYT ile üretilen AAH'ler için, manyetit ilaveli AAH'lerin BHA'larının manyetitsiz olanlardan fazla olması, manyetitin yoğunluğu yüksek bir madde olmasından dolayıdır. Her iki günde de ısı kürlü AAH numunelerin basınç dayanımları laboratuvar ortamında kürlenmiş AAH numunelerine göre önemli oranda yüksek olup, %4 manyetitli AAH numunelerin basınç dayanımları manyetitsiz AAH numunelerin basınç dayanımlarından düşük çıkmıştır. Ancak, manyetitli ve ısı kürlü

AAH'lerin dayanım kazanma hızı manyetitsiz-ısı kürlü AAH'lerden fazladır. BYT ve BBT esaslı sertleşmiş AAH'lerin ısıl kür işlemi geopolimerizasyon reaksiyonlarını hızlandırmıştır. Manyetitli ve ısı kürlü AAH'lerde 1 ve 2. günler arası dayanım kazanma hızı daha yüksektir. Sonuçlara göre üretilecek grupların tümüne ısıl kür uygulanması ve manyetit ikame oranının max. %8 olması belirlenmiştir.

Çizelge 4.3. Topaklı grupların BHA, eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

Kod	Gün	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)	Kod	Gün	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)
YPD2	2	1,83	8,3	17,4	BPD2	2	1,66	4,7	12,0
	28	1,77	5,4	17,6		28	1,60	7,0	11,4
	90	1,74	6,4	19,7		90	1,59	6,2	11,4
YPD3	2	1,85	5,7	11,5	BPD3	2	1,68	6,4	12,0
	28	1,84	5,4	11,2		28	1,66	5,4	12,4
	90	1,75	7,4	14,1		90	1,63	5,6	11,8
YPD4	2	1,84	4,8	10,2	BPD4	2	1,91	5,6	9,6
	28	1,84	5,7	11,5		28	1,86	4,6	14,5
	90	1,80	6,2	12,8		90	1,74	5,8	13,3
YKD2	2	1,83	14,8	18,9	BKD2	2	1,71	12,3	12,4
	28	1,83	14,7	18,7		28	1,62	10,1	9,1
	90	1,78	14,1	16,4		90	1,58	13,9	10,7
YKD3	2	1,79	14,5	15,5	BKD3	2	1,69	12,1	12,5
	28	1,78	11,4	14,2		28	1,68	12,3	11,4
	90	1,71	11,5	13,5		90	1,59	11,8	11,3
YKD4	2	1,75	7,6	8,7	BKD4	2	1,76	11,1	13,1
	28	1,79	7,6	11,7		28	1,80	13,4	13,3
	90	1,72	11,2	14,5		90	1,70	16,8	13,9
YÇD2	2	1,95	6,9	25,5	BÇD2	2	2,04	11,0	25,6
	28	2,01	7,2	24,1		28	1,94	9,9	26,1
	90	1,99	7,7	23,7		90	1,95	9,2	27,2
YÇD3	2	2,20	5,6	22,7	BÇD3	2	1,92	7,6	14,4
	28	2,04	5,9	18,4		28	2,0	8,3	23,3
	90	1,98	5,8	18,2		90	2,07	9,6	28,5
YÇD4	2	2,12	7,0	19,9	BÇD4	2	2,06	7,1	14,3
	28	2,19	5,4	16,7		28	2,04	9,6	19,0
	90	2,05	4,4	15,8		90	1,90	7,7	18,3

* BD: Basınç Dayanımı, ED: Eğilme Dayanımı, BHA: Birim Hacim Ağırlık

Çizelge 4.3'te BHA verilerine göre manyetit ilave oranı arttıkça genel itibarıyla BHA'larda artış olması beklenirken numunelerin çoğunda azalma görülmektedir. Bu durum, manyetitin matriste yeteri kadar homojen bir şekilde dağılmadığını göstermektedir. Manyetit oranı artan aynı tip lif içeren hamurlarda BHA

sonuçlarında ilişki gözlenmemiştir. Aynı lifle güçlendirilmiş AAH'lerin manyetit oranı arttıkça basınç ve eğilme dayanımları azalmıştır. Azalma oranları yeşil tuf esaslı AAH'lerde daha belirgin, beyaz tuf esaslı AAH'lerde birbirine daha yakındır. Ayrıca yeşil ve beyaz tuf içerikli hamurlarda zamanla eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. AAH'lerin büyük bir kısmında dayanım kayıplarının %10'un altında olması istatistiki olarak anlamlı olmadığını ifade etmektedir.

4.2.2. Nihai (manyetit homojen dağıtıldığı) AAH Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanımı Deney Sonuçları ve Değerlendirmeleri

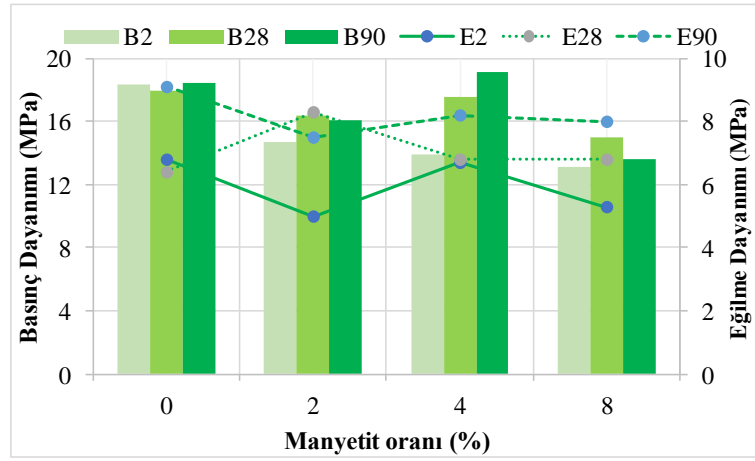
Yeşil tuf esaslı tüm gruplarda 2, 28 ve 90 gün yaşlarında eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.4'de verilmiştir. Lifle güçlendirilmiş AAH numunelerinin eğilme ve basınç dayanımı sonuçları karşılaştırma için grafiklerle gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Yeşil tuf esaslı AAH numunelerin BHA, eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

Kod	2 gün			28 gün			90 gün		
	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)
YPD0	1,78	6,8	18,3	1,80	6,4	17,9	1,78	9,1	18,4
YPD2	1,74	5,0	14,7	1,80	8,3	16,4	1,61	7,5	16,1
YPD4	1,82	6,7	13,9	1,75	6,8	17,5	1,69	8,2	19,1
YPD8	1,84	5,3	13,1	1,84	6,8	15,0	1,71	8,0	13,6
YKD0	1,84	12,1	17,1	1,82	20,7	19,5	1,77	17,0	17,9
YKD2	1,79	11	18,6	1,80	10,3	22,4	1,74	20,2	26,1
YKD4	1,82	12	16,8	1,78	12,5	19,4	1,72	13,7	23,0
YKD8	1,95	8	10,9	1,84	9,3	16,1	1,78	16,4	16,7
YÇD0	2,02	8,1	22,9	2,06	7,9	18,6	1,95	6,9	17,3
YÇD2	2,04	7,6	21,1	2,05	8,8	31,1	2,00	10,8	30,6
YÇD4	2,17	7,9	24,9	2,12	7,0	26,5	2,06	9,6	37,4
YÇD8	2,27	9,1	23,8	2,22	7,6	26,1	2,20	8,8	28,3

Manyetit homojen dağıtıldığı lifle güçlendirilmiş AAH'lerde manyetit oranı arttıkça BHA'lar artmıştır. PP lifle güçlendirilmiş AAH'lerde manyetit oranındaki

artış BHA'yı önemli oranda etkilememiştir. Manyetitsiz ve %2 manyetitli sertleşmiş AAH'lerin BHA'ların azalmasının sebebi üretim sırasında kıvamın daha düşük olmasından dolayı yeterince sıkıştırılamamasından kaynaklanmaktadır. Tüm AAH'lerin 90 günlük BHA'ları 2 günlük BHA'lara göre hamurların nem kaybından dolayı daha düşüktür. Liflerin yapıda homojen olarak dağılmasını sağlamak için toz malzemelerin karışımındaki oranı değişmeksizin çözelti miktarının %8-9 oranında düşürülmesine rağmen çelik lifin yoğunluğunun kullanılan diğer lif tiplerinden ve bulunduğu matris içindeki toz malzemelerden fazla olması, çelik lifin kullanıldığı hamurların BHA'larını diğer hamurlardan daha yüksek yapmıştır.



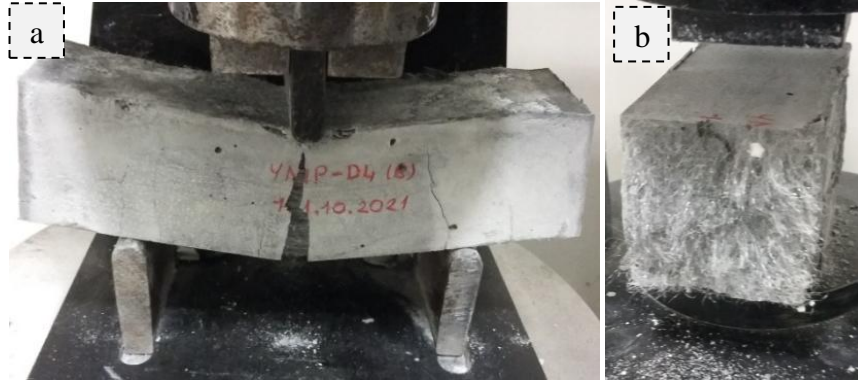
Şekil 4.3. Yeşil tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH'lerin eğilme ve basınç dayanımları.

Şekil 4.3'e göre, yeşil tüf esaslı AAH'lerde manyetit oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmıştır. Ancak eğilme dayanımlarındaki bu azalmanın %10'dan daha düşük oranlı olması sebebiyle bu ilişkinin önemli olmadığı düşünülmektedir. AAH'lerde eğilme dayanımları zamanla artmaktadır. Bu artış manyetit oranına göre değişkenlik göstermektedir. Manyetit oranı arttıkça basınç dayanımlarının düştüğü görülmektedir. Değerlerde (YKD4 hariç) zamanla önemli ölçüde değişiklikler olmamıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen bir diğer önemli bulgu PP lifin eğilme dayanımının basınç dayanımı oranına etkisinin 1/2 (0,5) olduğunu göstermiştir. Bilindiği gibi lifsiz geleneksel betonlarda bu oran 1/10 olarak tanımlanmıştır. 2 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı manyetitsiz numunede görülmektedir. 28 gün yaşında ise YPD2, YPD4 ve YPD8 gruplarının eğilme

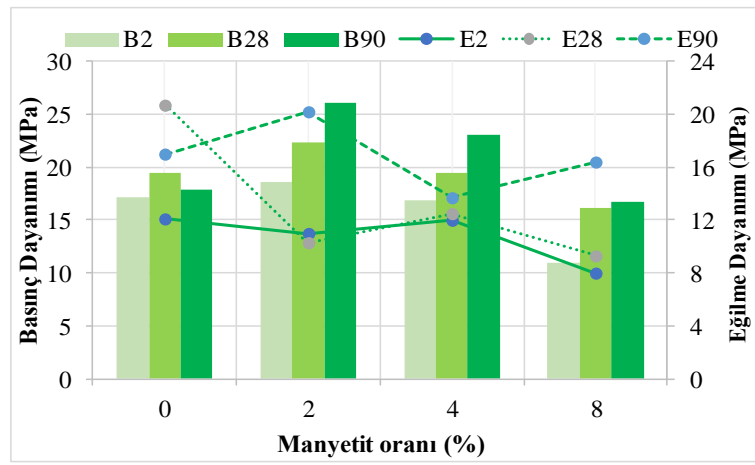
dayanımları sırasıyla %66, %1,49 ve %28,30 oranında artarken, YPD0 kompozit hamurunun dayanımı %5,88 azalmıştır. YPD2 hamuru 2 günlük sonuçlar arasında en düşük sonucu verirken 28 günlük değeri en yüksek olandır. PP elyaf, eğilme sonuçlarında önemli bir etken olup düşük yoğunluğu itibarıyla matriste Şekil 4.4-b'de görüldüğü gibi homojen dağılmış ve malzemeyi sünek hale getirmiştir. 90 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı YPD0, en düşük eğilme dayanımı YPD2'ye aittir. 28 günlük verilere kıyasla YPD0, YPD4 ve YPD8 gruplarının eğilme dayanımları sırasıyla %42,19, %20,59 ve %17,65 oranında artarken, YPD2 hamurunun eğilme dayanımı %9,64 azalmıştır.

2 gün yaşında AAH'lerin manyetit oranı arttıkça basınç dayanımlarının azaldığı belirlenmiştir. YPD0'a kıyasla; YPD2, YPD4 ve YPD8 hamurlarında sırasıyla %19,67, %24,04 ve %28,41 oranında basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. 28 gün yaşında YPD0 %2,19 azalırken, YPD2, YPD4 ve YPD8'ün basınç dayanımları sırasıyla %11,56, %25,90 ve %14,50 artmıştır. 90 gün yaşında en yüksek basınç dayanımı YPD4'te, en düşük basınç dayanımı ise YPD8'e ait olduğu görülmüştür. 28 gün yaşındaki YPD0 ve YPD4'ün basınç dayanımları sırasıyla %2,79 ve %9,14 artarken, YPD2 ve YPD8 basınç dayanımları sırasıyla %1,83 ve %9,33 azalmıştır.

Numunelerin üretimleri sırasında nemin %25-30 civarında olup sonradan %10-15 seviyesine düşmesi hidratasyon mekanizmasını zayıflatmış ve hatta dehidratasyona sebep olmuş ve bu sebeple dayanım gelişimi azalmıştır. Bu etki, YPD0'ın 2, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının yaklaşık olarak aynı olmasıyla görülebilmektedir. Sistemin 80 °C etüvde kendi içindeki nemin büyük bir çoğunluğunu kaybetmesi ve ilerleyen süreçte ortam neminin düşük olması nedeniyle hidratlaşma yeterli düzeyde gerçekleşmemiştir. Ayrıca, eğilme ve basınç dayanımını düşüren durabilite etkilerinden biri olan karbonatlaşma etkisine, yeşil tuf esaslı ve PP lifli hamurlarda rastlanılmıştır. YPD4'deki dayanım artışı ise manyetit mekanizmaya belli oranda dahil olduğunu göstermiş, bundan dolayı manyetit AAH'lerde optimum oranının %4 olabileceği belirlenmiştir.



Şekil 4.4. a) Eğilme dayanımı deneyinde YPD4, b) PP lifin dağılımı.



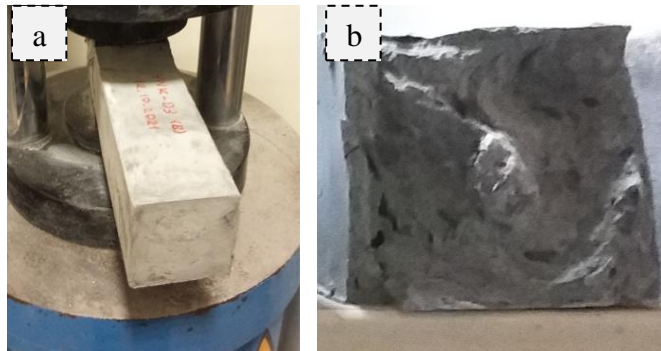
Şekil 4.5. Yeşil tüf esaslı kırılmış karbon lifle güçlendirilmiş AAH'lerin eğilme ve basınç dayanımları.

Şekil 4.5'e göre, yeşil tüf esaslı AAH'lerde manyetit oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmıştır. Ancak tüm AAH'lerde eğilme dayanımları zamanla artmıştır. Bu artış manyetit oranına göre değişkenlik göstermektedir. %4 manyetit oranına kadar basınç dayanımlarının arttığı, manyetitsiz hamur dışında tüm AAH'lerde zamanla basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Ayrıca karbon lifin eğilme dayanımının basınç dayanımı oranına etkisinin yaklaşık 4/5 (0,8) olduğunu hesaplanmıştır. 2 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı YKD0 elde edilirken, 28 gün yaşında YKD0, YKD4 ve YKD8'in eğilme dayanımları 2 gün yaşına göre sırasıyla %71,07, %4,17 ve %16,25 oranında artarken YKD2'nin eğilme dayanımı %6,36 azalmıştır. Erken süreçte (2 ve 28 gün) en düşük eğilme dayanımı YKD8'de elde edilmiştir. Karbon elyaf, eğilme dayanımı deneylerinde oldukça etkili olmuştur. düşük yoğunluğu sebebiyle matriste Şekil 4.6-b'de de görüldüğü gibi homojen

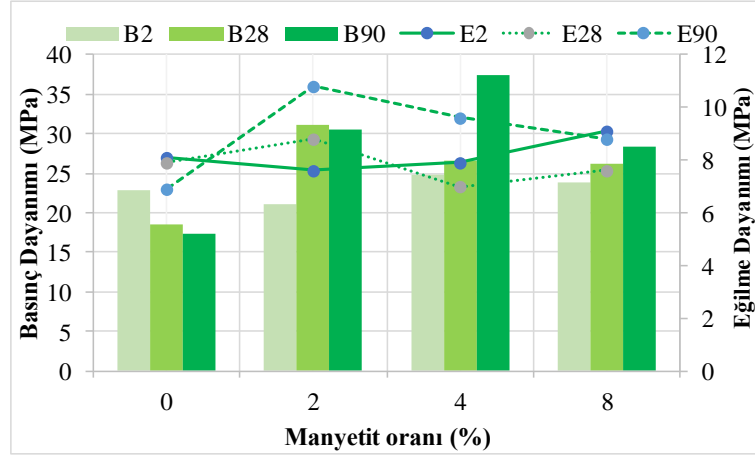
dağılmış ve malzemeyi daha sünek hale getirmiştir. Bu sebeple 90 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı YKD2’de, en düşük eğilme dayanımı YKD4’te olmuştur. 28 günlük verilere kıyasla YKD2, YKD4 ve YKD8’in eğilme dayanımları sırasıyla %96,12, %9,6 ve %76,34 oranında artarken, YKD0’ın eğilme dayanımı %17,87 azalmıştır.

2 gün yaşındaki basınç dayanımı deneylerine göre, YKD0’a kıyasla; YKD2’nin basınç dayanımı %8,77 artmış, YKD4 ve YKD8’in basınç dayanımları sırasıyla %1,75 ve %36,26 azalmıştır. 28 gün yaşındaki basınç dayanımları, 2 gün yaşındaki YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8 için sırasıyla %14,03, %20,43, %15,48 ve %47,71 oranında göre artmıştır. En yüksek 90 günlük basınç dayanımı YKD2, en düşük basınç dayanımı YKD8’de gözlenmiştir. YKD2, YKD4 ve YKD8’in 28 günlük basınç dayanımları sırasıyla %16,52, %18,56 ve %3,73 artarken, YKD0’ın basınç dayanımı %8,20 azalmıştır. Sonuç olarak; YKD2 ve YKD4’te basınç dayanımlarının düzenli biçimde arttığı, manyetit dayanımları olumlu yönde etkilediği görülmüştür. Optimum manyetit oranı %2 olarak belirlenmiştir.

Üretim esnasındaki ve sonrasındaki ortam şartları özellikle PP lifli hamurlarda görüldüğü gibi dayanım gelişimini olumsuz yönde etkilemiştir. Bu etki, YKD0’ın 2, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarının yaklaşık olarak aynı olmasıyla görülebilmektedir. Bir üstteki açıklamayla benzer şekilde 80 °C sıcaklıkla 24 saat kürlenmiş AAH’ler kendi içindeki nemin büyük bir çoğunluğunu kaybetmiş ve ilerleyen süreçte ortam neminin de düşük olması nedeniyle hidratlaşmanın yeterli seviyede olmadığı düşünülmektedir. YKD2 ve YKD’deki dayanım artışı ise manyetit mekanizmaya belli oranda dahil olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.6. a) Basınç dayanımı deneyi sırasında YKD8, b) Karbon lifin dağılımı.



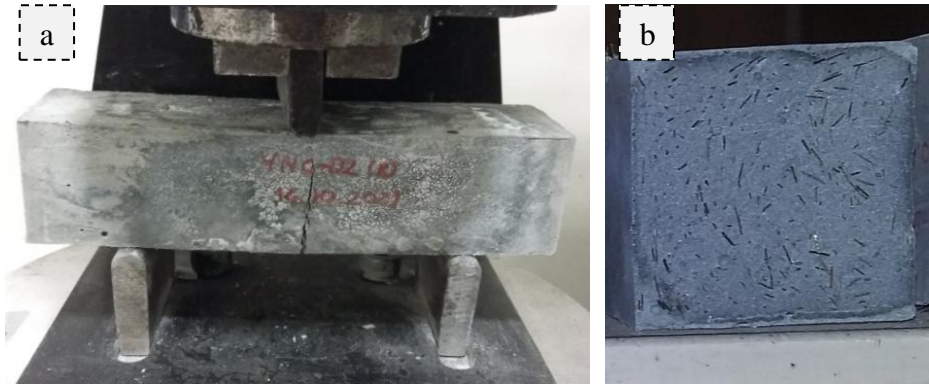
Şekil 4.7. Yeşil tuf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH'lerin eğilme ve basınç dayanımları.

Şekil 4.7'ye göre, yeşil tuf esaslı AAH'lerde manyetit oranı arttıkça eğilme dayanımlarında 2 günlük değerlerin artıp, 28 günlük değerlerin azaldığı fakat değişim oranı %10'un altında kaldığı için ilişkinin önemli olmadığı, 90 günlük değerlerin ise arttığı gözlemlenmiştir. AAH'lerde YÇD0 dışında eğilme dayanımları zamanla artmaktadır. Bu artış manyetit oranına göre değişkenlik göstermektedir. Manyetit oranı arttıkça, basınç dayanımları da artmıştır. Ayrıca manyetitsiz hamur dışında zamanla AAH'lerin basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir. Ayrıca çelik lifin eğilme dayanımının basınç dayanımına oranı 3/10 (0,3) olarak hesaplanmıştır. 2 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı YÇD8'de, 28 gün yaşında YÇD2'nin eğilme dayanımı %15,79 oranında artarken, YÇD0, YÇD4 ve YÇD8'in basınç dayanımları sırasıyla %2,47, %11,39 ve %16,48 azalmıştır. 2 gün yaşında en düşük basınç dayanımı YÇD2'de görülürken, 28 gün yaşında en yüksek olandır. Çelik lif matriste Şekil 4.8-b'de de görüldüğü üzere homojen dağılmış ve AAH'leri daha sünek bir hale getirmiştir. 90 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı YÇD2'de, en düşük eğilme dayanımı YÇD0'da elde edilmiştir. 28 günlük verilere kıyasla YÇD2, YÇD4 ve YÇD8'in eğilme dayanımları sırasıyla %22,73, %37,14 ve %15,79 artarken, YÇD0'nin eğilme dayanımı ise %12,66 azalmıştır.

2 gün yaşındaki basınç dayanımları YÇD0'e göre YÇD2 için %7,86 azalırken, YÇD4 ve YÇD8 için %8,73 ve %3,93 artmıştır. 2 gün yaşına göre 28 gün yaşındaki en yüksek basınç dayanımı kazanımı YÇD2'de görülmüştür ve 2-28 günlük basınç

dayanımı kazanımı YÇD0 için %18,78 azalırken, YÇD2, YÇD4 ve YND8 için sırasıyla %47,39, %6,43 ve %9,66 artmıştır. en yüksek 90 gün yaşındaki basınç dayanımı YÇD4, en düşük basınç dayanımı YÇD0'da elde edilmiştir. 28 gün yaşındaki basınç dayanımlarına göre YÇD4 ve YÇD8'in 90 gün yaşındaki basınç dayanımları sırasıyla %41,13 ve %8,43 artarken, YÇD0 ve YÇD2 sırasıyla %6,99 ve %1,61 azalmıştır.

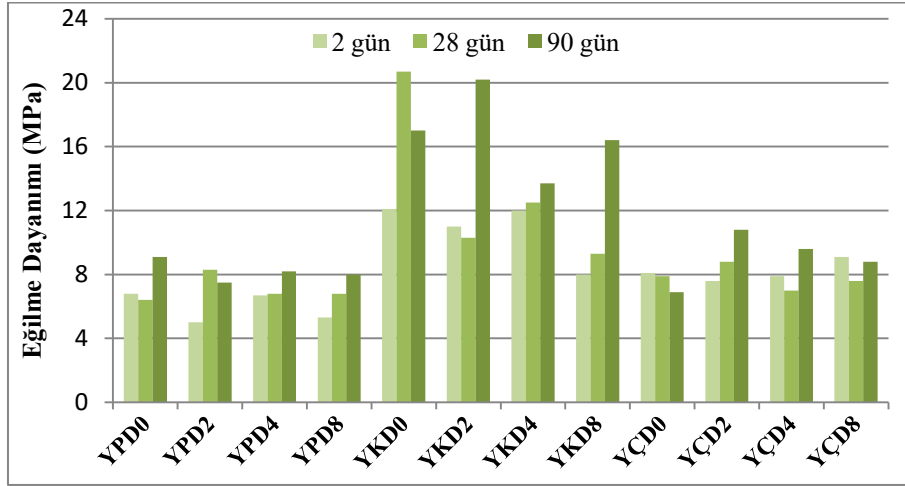
YÇD0'ın dayanım kaybının temel sebebinin fiziksel etmenlerden biri olan karbonatlaşma ve yeterince hidrat yapının oluşamamasından dolayı olduğu düşünülmüştür. Yeşil tuf içerikli, çelik lifle takviye edilen sistemde manyetit bulundurmayan bu grubun etüv sonrası büzülmesi (yaklaşık 0,005) diğer gruplardan çok daha fazladır. Sonuç olarak; YÇD4 ve YÇD8'te basınç dayanımlarının zamanla arttığı ve manyetit ilavesinin dayanımları olumlu yönde etkilediği görülmektedir. Bundan dolayı çelik lifli sistemlerde optimum manyetit ilave oranı %4 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8. a) Eğilme dayanımı testi uygulanan YÇD2 numunesi, b) Çelik lifin numune içindeki dağılımı.

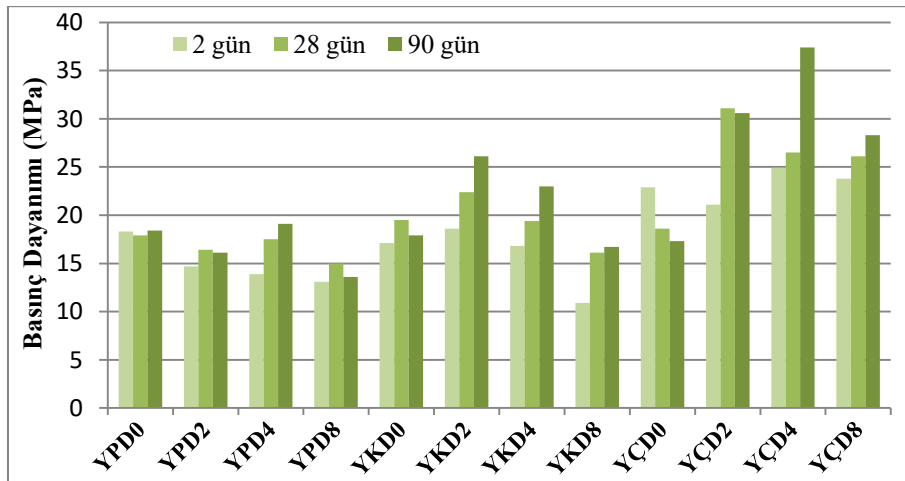
Şekil 4.9'da tüm yeşil tuf içerikli grupların 2, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları, Şekil 4.10'da basınç dayanımları verilmiştir. Aynı manyetit oranlı PP ve karbon lifli AAH'lere göre, karbon lifli hamurların eğilme dayanımlarının tüm süreçlerde (2, 28 ve 90) daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, karbon lifin çekme mukavemetinin PP lifin yaklaşık olarak 10 katı ve narinlik oranının daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Karbon lifin numune içindeki gerilme enerjisi

transferi kabiliyeti daha fazladır. Çelik lifli karışımların ç/t oranlarının farklı olması sebebiyle diğer liflerle karşılaştırma yapılmamıştır.



Şekil 4.9. Yeşil tüf esaslı tüm AAH'lerin eğilme dayanımı deney sonuçları.

Aynı manyetit oranlı AAH'lere göre; tüm süreçte karbon lifli AAH'lerin (YKD2 ve YKD4) basınç dayanımları PP lifli AAH'lerden daha yüksektir. Bu, karbon lifin gerilme altında şekil değiştirme davranışının daha az oluşundan ve çözelti emici özelliği sonucu moleküllerin birbirine yaklaşmasıyla boşluk yapısının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



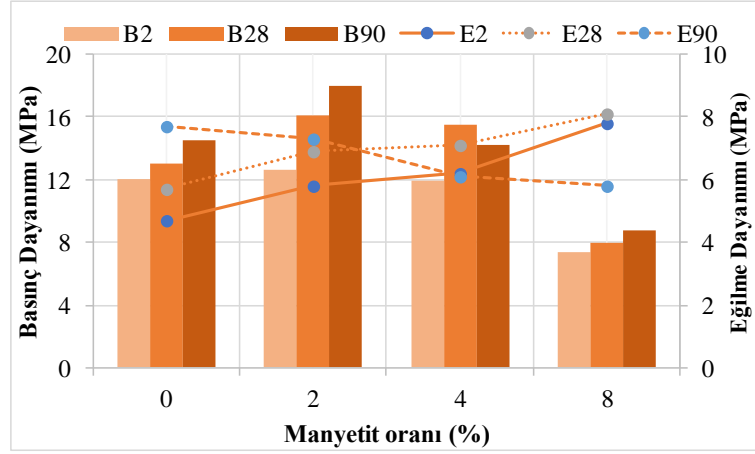
Şekil 4.10. Yeşil tüf esaslı tüm AAH'lerin basınç dayanımı deney sonuçları.

Çizelge 4.5'te AAH'lerin BHA, eğilme ve basınç dayanımı sonuçları verilmiş ve üç tip lif halinde gruplandırılan hamurların eğilme ve basınç dayanımları Şekil 4.11 – 4.16'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.5. Beyaz tüf esaslı AAH'lerde eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları.

Kod	2 gün			28 gün			90 gün		
	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)	BHA (g/cm ³)	ED (MPa)	BD (MPa)
BPD0	1,69	4,7	12,0	1,58	5,7	13,0	1,60	7,7	14,5
BPD2	1,67	5,8	12,6	1,61	6,9	16,1	1,57	7,3	18,0
BPD4	1,70	6,2	11,9	1,70	7,1	15,5	1,59	6,1	14,2
BPD8	1,71	7,8	7,4	1,78	8,1	8,0	1,63	5,8	8,8
BKD0	1,76	19,5	14,3	1,67	12,0	11,8	1,61	12,7	13,7
BKD2	1,74	11,7	13,5	1,71	15,1	22,1	1,58	16,8	24,8
BKD4	1,77	8,9	13,0	1,71	11,7	18,6	1,62	18,7	19,5
BKD8	1,80	12,1	10,6	1,74	15,0	16,1	1,66	14,3	17,9
BÇD0	1,86	6,9	17,3	1,78	10,3	19,2	1,75	8,4	22,0
BÇD2	1,95	7,6	16,2	1,93	8,8	16,2	1,85	8,0	21,1
BÇD4	2,03	8,0	15,5	1,99	10,6	17,3	1,85	8,4	21,0
BÇD8	2,16	6,0	13,2	2,09	8,3	15,9	2,02	9,0	17,7

Lifle güçlendirilmiş AAH'lerde manyetit oranı arttıkça BHA'ları da artmıştır. PP lifle güçlendirilmiş AAH'lerde manyetit oranındaki artış BHA'yı önemli oranda etkilememiştir. Manyetitsiz ve %2 manyetiteli sertleşmiş AAH'ler arasındaki BHA düşüşü ise üretim sırasında kıvamın daha düşük olmasından yeterince sıkıştırılamamasından kaynaklanmaktadır. Tüm AAH'lerin 90 günlük BHA sonuçları 2 günlük BHA'lara göre belli oranlarda azalmıştır. Liflerin yapıda homojen olarak dağılmasını sağlamak için toz malzemelerin karışımındaki oranı değişmeksizin çözelti miktarının %8-9 oranında düşürülmesine rağmen çelik lifin yoğunluğunun kullanılan diğer lif tiplerinden ve bulunduğu matris içindeki toz malzemelerden fazla olması, çelik lifin kullanıldığı hamurların BHA'larını diğer hamurlardan daha yüksek yapmıştır.

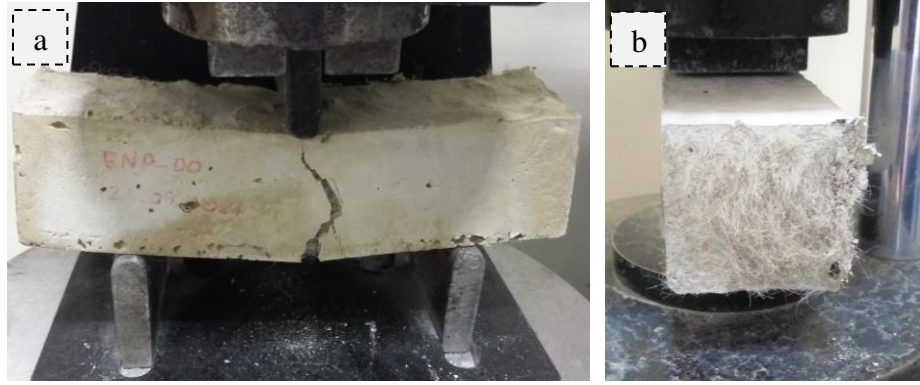


Şekil 4.11. Beyaz tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH'lerin eğilme ve basınç dayanımları.

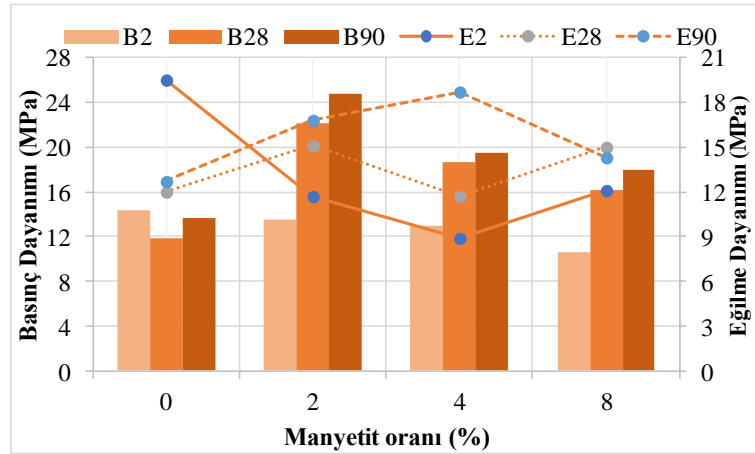
Şekil 4.11'e göre, beyaz tüf esaslı AAH'lerde manyetit oranı arttıkça 2 ve 28 gün yaşlarındaki eğilme dayanımları artmakta, 90 günlük eğilme dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. AAH'lerde eğilme dayanımları zamanla manyetitsiz ve %2 manyetitli hamurlarda artarken, diğerlerinde azalmaktadır. Ancak manyetit oranı %4'e kadar arttıkça, basınç dayanımlarının arttığı, ancak %8 manyetit ilavesinde azaldığı görülmektedir. Ayrıca basınç dayanımları zamanla farklı oranlarda artmıştır. PP lifi ile güçlendirilen AAH'lerin eğilme dayanımı basınç dayanımına oranı 1/2 (0,5) olarak hesaplanmıştır. 2 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı BPD8'de elde edilmiştir. 2-28 gün arasında BPD0, BPD2, BPD4 ve BPD8'in eğilme dayanımları sırasıyla %21,28, %18,97, %14,52 ve %3,85 artmıştır. 2 ve 28 günlük en düşük eğilme dayanımları BPD0'da elde edilmiştir. PP elyaf, eğilme sonuçlarını önemli oranda etkilemiştir ve Şekil 4.12-b'de de görüldüğü gibi homojen dağıldığı için AAH'leri daha sünek hale getirmiştir. 90 gün yaşında manyetit oranı arttıkça eğilme dayanımlarının azaldığı ve en yüksek eğilme dayanımının BPD2'de, en düşük eğilme dayanımının ise BPD8'de olduğu görülmektedir. 28 günlük verilere kıyasla BPD0 ve BPD2'nin eğilme dayanımları sırasıyla %35,09 ve %5,80 artarken, BPD4 ve BPD8'in eğilme dayanımları sırasıyla %14,08 ve %28,39 azalmıştır.

2 gün yaşındaki basınç dayanımı deneylerinde BPD0'a göre; BPD2, BPD4 ve BPD8'in basınç dayanımları sırasıyla %5, %0,83 ve %38,33 artmıştır. 2-28 günlük süreçte basınç dayanımların arttığı, en yüksek basınç dayanımı kazancının BPD4'te

olduğu ve bu süreçte BPD0, BPD2, BPD4 ve BPD8'ün sırasıyla %8,33, %27,78, %30,25 ve %8,11 arttığı hesaplanmıştır. En yüksek 90 günlük basınç dayanımı BPD2'de, en düşük basınç dayanımı BPD8'de elde edilmiştir. 2 – 28 gün yaşları arasında BPD0, BPD2 ve BPD8'in basınç dayanımları sırasıyla %11,54, %11,80 ve %10 artarken, BPD4'ün basınç dayanımı %8,39 azalmıştır. Sonuç olarak; BPD2'deki dayanım artışı manyetit mekanizmaya belli oranda dahil olduğunu göstermiş ve optimum oran %2 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.12. a) Eğilme dayanımı deneyi sırasında BPD0, b) PP lifin dağılımı.



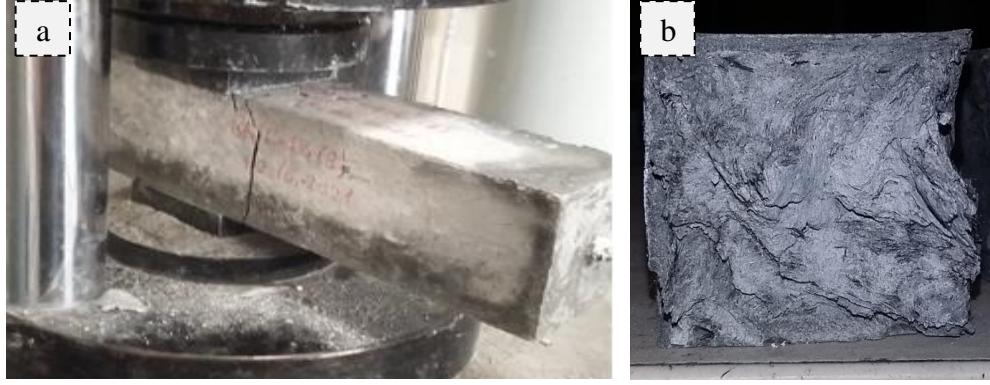
Şekil 4.13. Beyaz tüf esaslı kırılmış karbon lifle güçlendirilmiş AAH'lerin eğilme ve basınç dayanımları.

Şekil 4.13'e göre, beyaz tüf esaslı AAH'lerde manyetit oranı arttıkça 2 günlük eğilme dayanımlarında azalma, diğerlerinde artış gözlemlenmiştir. AAH'lerde eğilme dayanımları zamanla manyetitsiz hamur dışında artmıştır. Bu artışlar manyetit oranına göre değişkenlik göstermektedir. Manyetit oranı arttıkça 2 günlük basınç

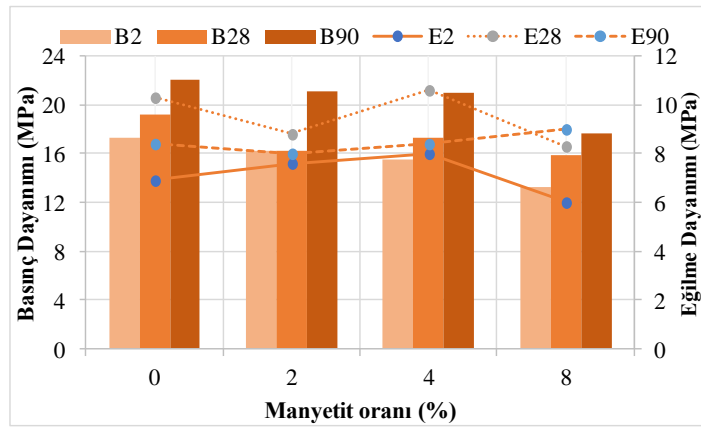
dayanımları azalmıştır, ancak diğer süreçlerde artmıştır. BKD0 haricinde basınç dayanımları zamanla artmaktadır. Karbon lifli AAH'lerde eğilme dayanımının basınç dayanımı oranı 3/4 (0,75) olarak hesaplanmıştır. 2 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı BKD0'da elde edilmiştir. 2-28 gün yaşları arasında BKD2, BKD4 ve BKD8'in eğilme dayanımları sırasıyla %29,06, %31,46 ve %23,97 artarken, BKD0'ın eğilme dayanımı %38,46 azalmıştır. 2 ve 28 gün yaşlarında en düşük eğilme dayanımı BKD4'te elde edilmiştir. Karbon elyaf, eğilme deneylerinde önemli bir etken olup düşük yoğunluğu itibarıyla matriste Şekil 4.14-b'de görüldüğü gibi homojen dağılmış ve malzemeyi daha sünek hale getirmiştir. 90 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı BKD4'te, en düşük eğilme dayanımı BKD0'da elde edilmiştir. 28-90 gün yaşları arasında BKD0, BKD2 ve BKD4'ün eğilme dayanımları sırasıyla %5,83, %11,26 ve %59,83 artarken, BKD8'in eğilme dayanımı %4,67 azalmıştır.

2 gün yaşında AAH'lerin manyetit oranı arttıkça basınç dayanımları azalmıştır. BKD2, BKD4 ve BKD8'in basınç dayanımları BKD0'a göre sırasıyla %5,59, %9,09 ve %25,87 azalmıştır. 2-28 gün yaşları arasında manyetiteli AAH'ler basınç dayanımlarının artmasına sebep olmuştur ve BKD0'ın basınç dayanımı %17,48 azalırken, BKD2, BKD4 ve BKD8'ün basınç dayanımları sırasıyla %63,70, %43,08 ve %51,89 artmıştır. 90 gün yaşındaki en yüksek basınç dayanımı BKD2'de, en düşük basınç dayanımı BKD0'da elde edilmiştir. 28-90 gün yaşları arasında BKD0, BKD2 BKD4 ve BKD8'in basınç dayanımları sırasıyla %16,10, %12,22, %4,84 ve %11,18 artmıştır.

BKD0'ın dayanım kaybedişi, fiziksel etmenlerden biri olan büzülme, karbonatlaşma ve yeterince hidrat yapının oluşmaması sebebiyle olduğu düşünülmüştür. Manyetit bulundurmeyen bu hamurun etüv sonrası büzülme miktarı (yaklaşık 0,004) diğer hamurlardan daha fazladır. Sonuç olarak; BKD2, BKD4 ve BKD8 'deki dayanım artışı ise manyetitin geopolimerizasyon mekanizmasına belli oranda dahil olduğunu göstermiş, optimum oran %2 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.14. a) Basınç dayanımı deneyi sırasında BKD4, b) Karbon lifin dağılımı.

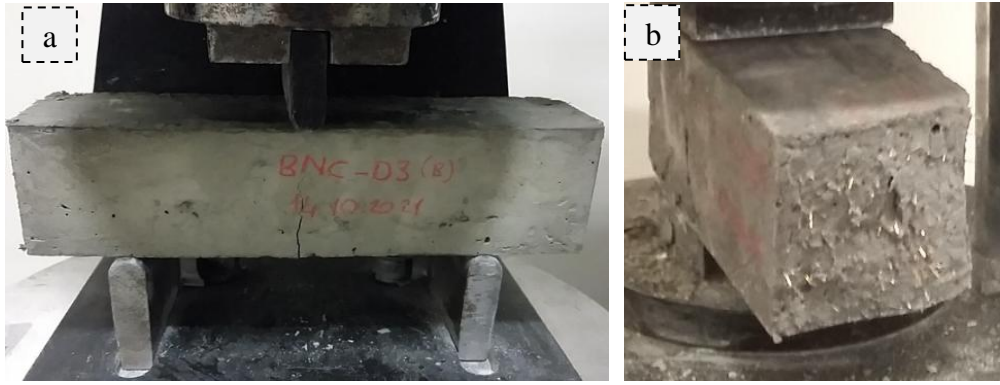


Şekil 4.15. Beyaz tüf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH'lerin eğilme ve basınç dayanımı sonuçları.

Şekil 4.15'e göre, beyaz tüf esaslı AAH'lerde manyetit oranı arttıkça eğilme dayanımları azalmıştır. Ancak eğilme dayanımlarındaki bu azalmanın %10'dan daha düşük oranlı olması sebebiyle bu ilişkinin önemli olmadığı düşünülmektedir. AAH'lerde eğilme dayanımları zamanla 28 güne kadar artmakta, devamında azalmaktadır. Manyetit oranı arttıkça basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Fakat basınç dayanımları zamanla artmaktadır. Çelik lifli AAH'lerin eğilme dayanımının basınç dayanımı oranı 1/2 (0,5) olarak hesaplanmıştır. 2 gün yaşında en yüksek eğilme dayanımı BÇD4'te elde edilmiştir. 2-28 gün yaşları arasında BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in eğilme dayanımları sırasıyla %49,27, %15,79, %32,5 ve %38,33 artmıştır. 2 ve 28 gün yaşlarındaki en düşük eğilme dayanımı BÇD8'de elde edilmiştir. Çelik elyaf, matriste Şekil 4.16-b'de de görüldüğü üzere homojen dağılmış ve malzemeyi sünek bir hale getirmiştir. 90 gün yaşındaki en yüksek eğilme dayanımı BÇD8'de, en düşük eğilme dayanımı BÇD2'de

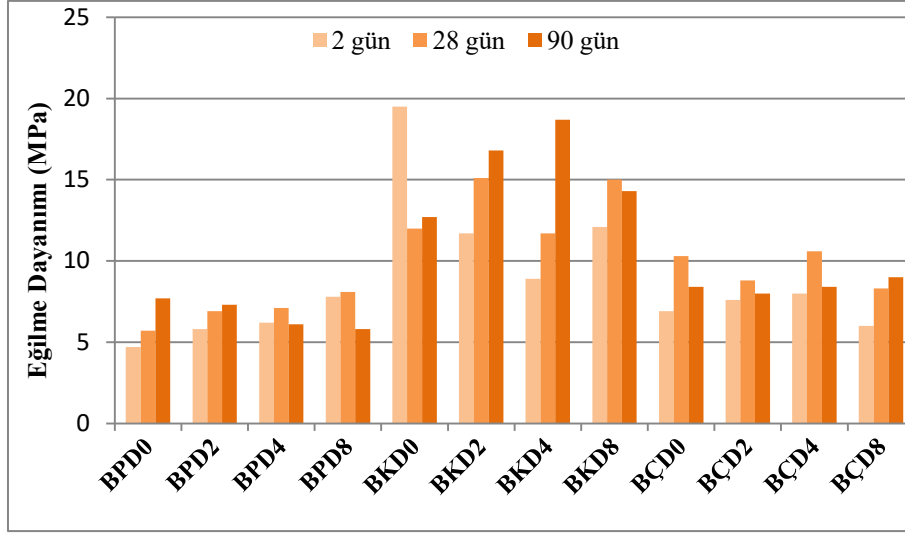
elde edilmiştir. 28-90 gün yaşları arasında BÇD8'in eğilme dayanımı %8,43 artarken, BÇD0, BÇD2 ve BÇD4'ün eğilme dayanımları sırasıyla %18,45, %9,09 ve %20,75 azalmıştır.

AAH'lerin manyetit oranı arttıkça, 2 günlük basınç dayanımları azalmıştır. BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in basınç dayanımları BÇD0'a göre sırasıyla %6,36, %10,40 ve %23,70 azalmıştır. 2 – 28 gün yaşları arasında BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in basınç dayanımları sırasıyla %10,98, %0, %11,61 ve %20,45 artmıştır. AAH'lerin manyetit oranı arttıkça 90 günlük basınç dayanımlarının düştüğü, en yüksek basınç dayanımı BÇD0'da, en düşük basınç dayanımı ise 17,7 MPa ile BÇD8'de elde edilmiştir. 28 – 90 gün yaşları arasında BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in basınç dayanımları sırasıyla %14,58, %30,25, %21,39 ve %11,32 artmıştır.



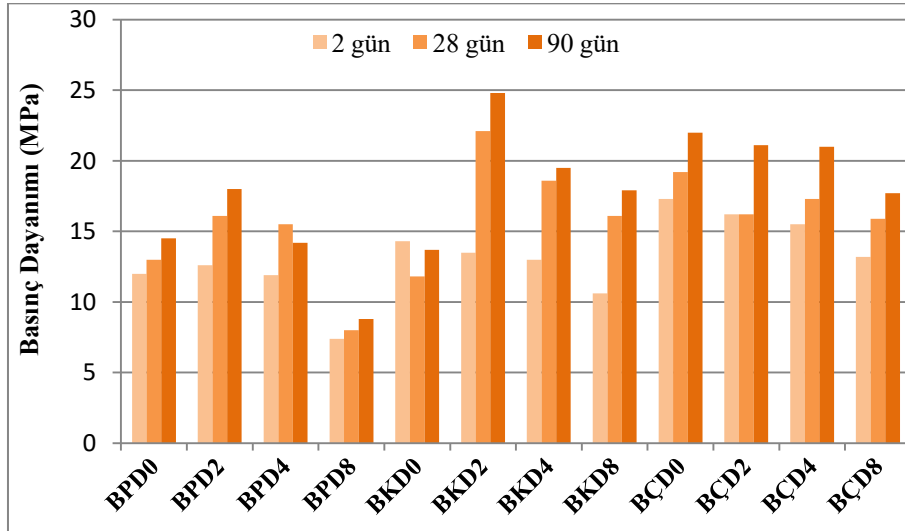
Şekil 4.16. a) Eğilme dayanımı deneyi sırasında BÇD8, b) Çelik lifin dağılımı.

Şekil 4.17'de beyaz tüf esaslı AAH'lerin 2, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımı sonuçları, Şekil 4.18'de basınç dayanımı sonuçları verilmiştir. Aynı manyetit oranlı PP lifli ve karbon lifli gruplar mukayese edildiğinde, karbon lifli hamurların eğilme dayanımlarının tüm günler (2, 28 ve 90) dahilinde daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, karbon lifin çekme mukavemetinin PP lifin yaklaşık olarak 10 katı olduğundan kaynaklanmaktadır.

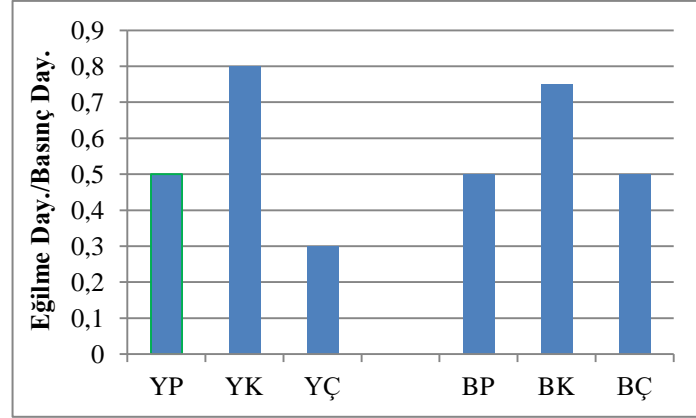


Şekil 4.17. Beyaz tüf esaslı tüm AAH'lerin eğilme dayanımı deney sonuçları.

Aynı manyetit oranlı karbon ve PP lifli gruplar mukayese edildiğinde, karbon lifli hamurların basınç dayanımlarının tüm günler dahilinde daha yüksek olduğu (BKD0 hariç) gözlemlenmiştir. Bu, karbon lifin gerilme altında şekil değiştirme davranışının daha az oluşundan ve çözelti emici özelliği sonucu moleküllerin birbirine yaklaşmasıyla boşluk yapısının azalmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.18. Beyaz tüf esaslı tüm AAH'lerin basınç dayanımı deney sonuçları.



Şekil 4.19. AAH’lerin eğilme dayanımı/basınç dayanımı verileri.

Şekil 4.19’da görülen eğilme day./basınç day. grafiğinde, aynı ç/t oranına sahip hamurlarda, karbon lifin PP life kıyasla değerleri arttırdığı görülmüştür. Karbon lifin narinlik oranı ve elastisite modülü PP life göre çok daha yüksektir. Eğilme dayanımında etkin olan, gerilme enerjisini sönmleme ve bu gerilmeyi numune içinde dağıtma ve çatlak gelişimini önleme yeteneği karbon lifle takviye edilen hamurları PP lifle takviye edilenlerden daha üstün kılmaktadır. Bu durumun yeşil ve beyaz tüflü üretimlerin her ikisinde de geçerli olduğu, aynı tip lif içerikli (çelik lif hariç) hamurlarda değerlerin birbirine yakın olduğu saptanmıştır. Ç/t oranları farklı olduğundan ayrı olarak değerlendirilen çelik lifli yeşil ve beyaz tüflü AAH’lerde eğilme dayanımları birbirine yakınken basınç dayanımlarında yeşil tüflü hamurların üstünlüğünün, aradaki %60’lık değişimin sebebi olduğu anlaşılmaktadır.

4.3. ÖZGÜL AĞIRLIK, SU EMME VE GÖRÜNEN POROZİTE SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

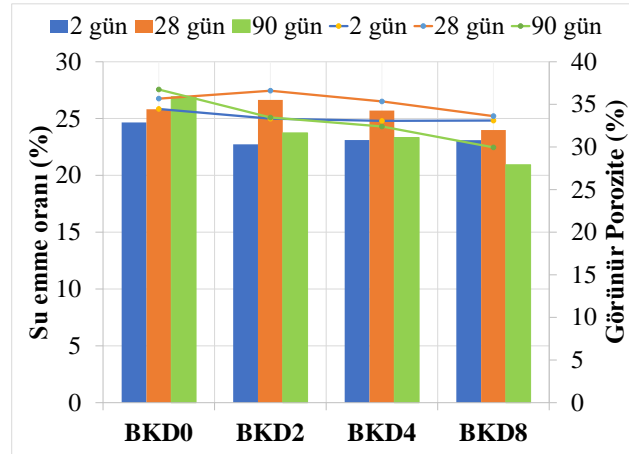
Topaklaşmış üretimler dahilinde her bir grupta bulunan küp numunelere uygulanan su emme deneyi, sertleşmiş hamurlar üzerinde 2, 28 ve 90 günlerde gerçekleştirilmiştir. Jeopolimerizasyon reaksiyonları sonucu polimer yapıdaki ürünlerin oluşum hızıyla ilişkili olarak hamurların suya direnç sağlaması belirli yaşlarda görülememiştir. Tüm yaşlar dahilinde, yeşil tuf içerikli tüm hamurlarda, çelik lifle takviye edilen beyaz tuf içerikli hamurlarda ve PP lifle takviye edilen beyaz tuf içerikli bazı hamurlarda meydana gelen deformasyonlar (çatlak, şişme, dağılma vb.) sebebiyle su emme deneyi yapılamamıştır. Grupların özgül ağırlık, su

emme ve görünür porozite deney sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiş olup 2, 28 ve 90 günlük su emme ve görünür porozite değerleri Şekil 4.20’deki grafikte gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. Sertleşmiş hamurların su emme deney sonuçları.

Grup	2 gün			28 gün			90 gün		
	ÖA	S (%)	P _g (%)	ÖA	S (%)	P _g (%)	ÖA	S (%)	P _g (%)
BPD0	2,07	28,72	37,30	2,12	27,48	36,84	Su direnci yok		
BPD2	Su direnci yok								
BPD4	Su direnci yok								
BPD8	2,45	33,57	45,10	2,27	29,50	40,07	Su direnci yok		
BKD0	2,13	24,66	34,46	2,15	25,82	35,67	2,16	26,92	36,74
BKD2	2,20	22,73	33,32	2,17	26,64	36,60	2,12	23,74	33,46
BKD4	2,14	23,11	33,06	2,13	25,70	35,34	2,06	23,33	32,40
BKD8	2,14	23,10	33,10	2,11	23,99	33,62	2,04	20,93	29,95
BÇ	Su direnci yok								

* S: Su emme oranı, P_g: Görünür porozite, ÖA: Özgül ağırlık



Şekil 4.20. Beyaz tüf esaslı AAH’lerin 2, 28 ve 90 günlük su emme deney sonuçları.

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.20’ye göre; PP lifli AAH’lerin su emme oranları zamanla azalmıştır. Manyetit su emme ve poroziteyi erken süreçlerde artırırken, geç süreçte önemli oranda azaltmıştır. Manyetitsiz PP lifli AAH’lerde her süreçte yaklaşık %25 su emme oranı ile %35 porozite elde edilirken, manyetitli AAH’lerde su emme oranı

%37'den %24'e azalarak porozite önemli oranda azalmıştır. 90 gün yaşında PP lifli ve %8 manyetitli AAH'lerin su emme oranı ve porozitesi, manyetit içermeyen AAH'lere göre sırasıyla %3 ve %8 azalmıştır. Ayrıca, %8 manyetit PP lifli AAH'lerin özgül ağırlığını %18,36 artırmıştır.

Ancak karbon lifli AAH'lerde manyetit oranı arttıkça kuru özgül ağırlık azalmıştır. Bunun temel sebebi karbon lifli AAH'lerin işlenebilirliğinin yeterince olmamasından kaynaklanmaktadır. İşlenebilirliği düşük olan karbon lifli AAH'lerde manyetit eklenmesi ile daha katı kıvamlı hamurlar üretilmiştir. Böylece karbon liflerin hamur davranışını kontrol ettiği bir yapı elde edilmiştir. Bu sebeple karbon lifli hamurlarda özgül ağırlıklar yakın değerlerde elde edilmiştir. Karbon lifli AAH'lerde porozite ve su emme oranları birbirlerine yakın değerlerde elde edilmiştir. BKD2, BKD4 ve BKD8'in su emme oranları BKD0'a göre sırasıyla %7,83, %6,28 ve %6,33 azalmıştır.

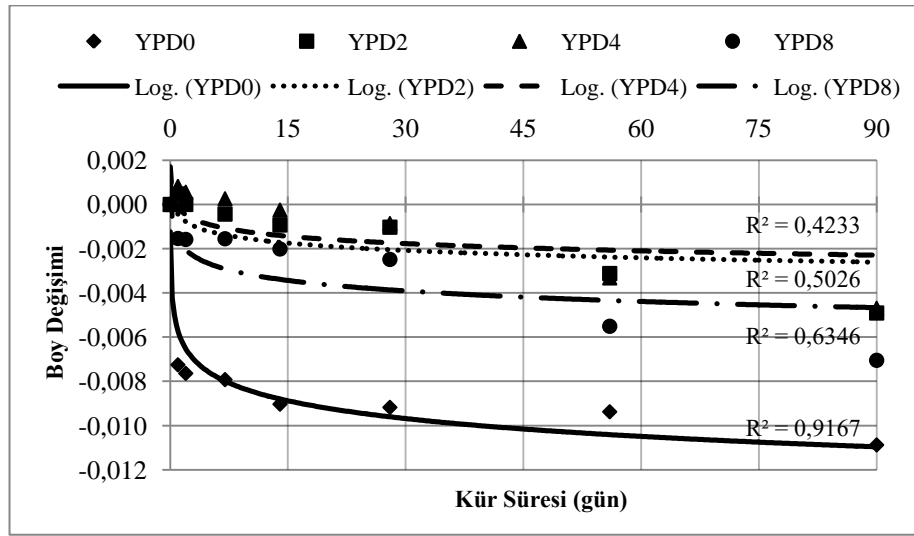
BPD0 ve BPD2'lerin su emme oranları 2 – 28 günlük süreçte sırasıyla yaklaşık %1 ve %5 azalmıştır. Reaksiyonlar sonucunda zamanla yeni ürünler oluşarak gözenekler kapanma eğilimine girmişlerdir. Karbon lifli; %0, %2, %4 ve %8 manyetit içerikli sertleşmiş AAH'lerin 28 günlük su emme yüzdeleri, 2 günlüğe kıyasla sırasıyla %4,70, %17,20, %11,21 ve %3,85 oranında artmıştır.

Manyetit içerikli hamurlarda manyetitin ince bir malzeme olmasından ötürü boşlukları doldurması ve reaksiyon ürünlerinin oluşumunda aktif rol alması porozitenin düşüşünü sağlamaktadır. Sikora vd. (2016) ve Bragança vd. (2017) çalışmaları sonucunda manyetitin toplam gözenekliliği azaltan bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir [124,127]. Bunun yanı sıra, BPD0 ve BPD8 küp numuneleri 90 günlük su emme deneyi dahilinde suya direnç gösterememişlerdir.

4.4. BÜZÜLME DENEYİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Büzülme deneyi, her gruptan bu deney için üretilen iki ucu vidalı numuneler üzerinde başlangıçta priz sonu olmak üzere, sırasıyla kür sonu, 2, 7, 14, 28, 56 ve 90. günlerde uzunluk ölçümleri yapılmıştır. Değerlendirmeler, yeşil ve beyaz tüfler

dahilinde üç tip lif (pp, karbon ve çelik lif) sınıfında gruplandırılarak yapılmıştır. Yeşil ve beyaz tüflü karışımların molaritesi birbirinden farklı olduğu için kıyaslanmaları söz konusu olmamıştır. Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 sırasıyla YBT/PP lif, YBT/karbon lif ve YBT/çelik lif hamurlarının; Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26 ise sırasıyla BBT/PP lif, BBT/karbon lif, BBT/çelik lif gruplarının büzülme sonuçlarını göstermektedir.

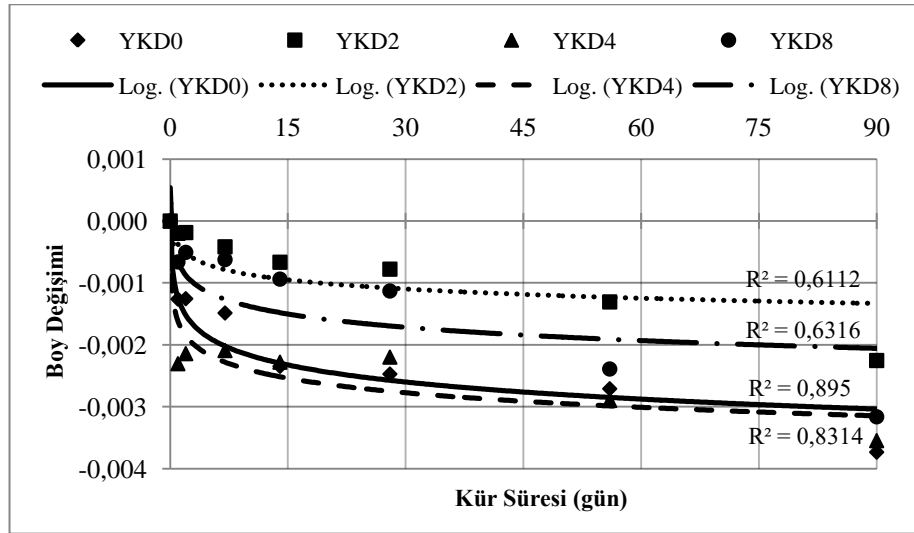


Şekil 4.21. Yeşil tuf esaslı PP lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.

Şekil 4.21'e göre, yeşil tuf esaslı AAH'lerde manyetit oranı arttıkça büzülme oranları genel olarak azalmıştır. Ancak %8 manyetitli AAH'de büzülme oranlarının diğer manyetitli hamurlardan yüksek olduğu gözlenmektedir. Zamanla tüm numunelerde büzülme oranları artmaya devam etmekte olup YPD2 ve YPD4 hamurlarındaki hacim değişimleri tüm günler dahilinde birbirine çok yakındır. Yeşil tuf esaslı PP lifli AAH'lerde ısıtma işlemi (80 °C-24±2 saat) sonrası kuruma rötresine ve otojen rötreye ilişkin en fazla hacim kaybı, %0,7 ile manyetitsiz YPD0 hamurunda görülmüştür. Kür sonrası, %2 ve %4 manyetit içerikli numunelerde meydana gelen düşük oranlardaki hacim artışı, CaO ya da FeO'den kaynaklanabilir. Tüm numunelerde ilk gün sonunda büzülme değerleri artmıştır. En büyük büzülme 90 gün sonucunda YPD0 hamurunda %1,1 olarak görülmüştür.

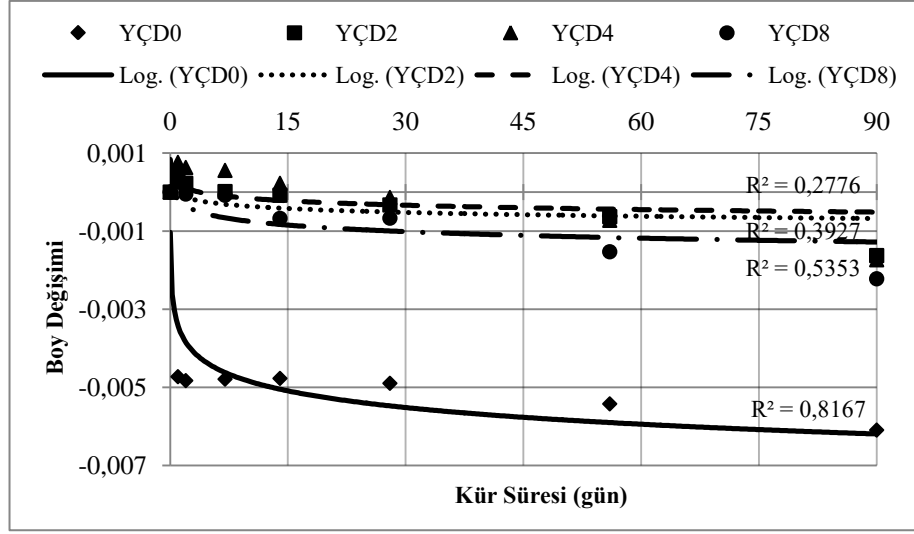
PP lifli AAH'lerde zamanla büzülmeler artarken, manyetitin büzülmeyi azalttığı görülmüştür. 90 günlük maksimum büzülme değerleri kıyaslandığında; YPD0'ın

büzülmesi, değeri en düşük olan YPD4'ün büzülmesinden 0,006, manyetitli gruplarda en yüksek büzülmeye sahip olan YPD8'in büzülmesinden ise 0,004 fazladır. Ayrıca, %2 ve %4 manyetitli AAH'lerin büzülme değerleri priz sonundan 90 güne kadar çok yakındır. Karbonatlaşma etkisine bağlı olarak matristeki boşluk oranının artması, üretim ve kürün yapıldığı laboratuvaradaki nemin düşüklüğüne bağlı reaksiyonların hızlanması ve manyetitin manyetik özelliği yüksek olduğu için taneciklerin mıknatıs davranışı sergileyip zamanla birbirine yaklaşması sonucu oluşan mikro poroz yapı, hamurlarda büzülmenin artmasına neden olan faktörlerdendir. Jeopolimerizasyon dahilinde yeni jellerin oluşumu ile tanecikler arası mesafelerin azalarak boşlukların dolarak büzülmeleri engellemiştir.



Şekil 4.22. Yeşil tüf esaslı karbon lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.

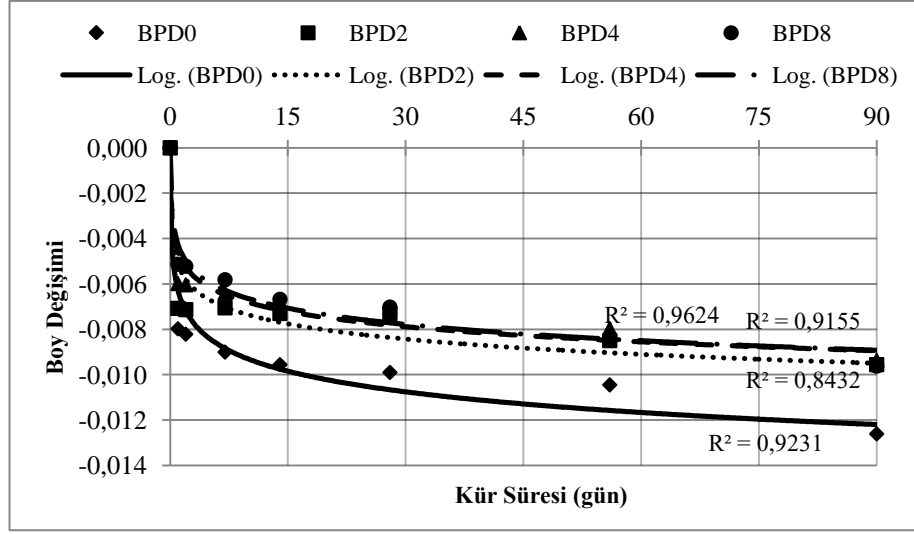
Şekil 4.22'ye göre, yeşil tüf esaslı karbon lifli AAH'lerde ısı işlem sonrası kuruma rötresinden dolayı en fazla büzülme %0,2 ile %4 manyetitli YKD4 hamurunda görülmüştür. Tüm numunelerde büzülme değerleri çoğunlukla artan bir eğilim gösterirken en yüksek büzülme değerine 90 gün sonucunda %0,4 ile YKD0 hamurunda rastlanılmıştır. Karbon lifli üretimlerde manyetit kullanımının büzülmeyi azalttığı, kür sonu devamında büzülme gelişimini arttırdığı görülmüştür.



Şekil 4.23. Yeşil tuf esaslı çelik lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.

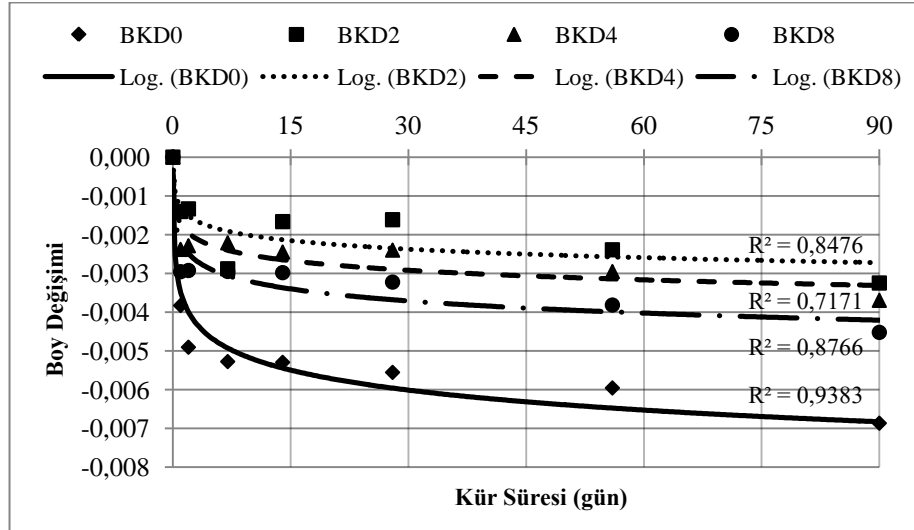
Şekil 4.23'e göre, çelik lifli AAH'lerde ısı kür sonrası büzülme oranı YÇD0 hamurunda %0,5 olarak görülmüştür. Tüm numunelerde ilk gün sonunda büzülmeler çoğunlukla artan bir eğilim göstermiş, maksimum büzülme 90 gün sonucunda %0,6 ile YÇD0 hamurunda görülmüştür. Çelik lifli üretimlerde manyetit kullanımının büzülmeyi azalttığı belirlenmiştir. 90 günlük maksimum büzülme oranlarına göre; manyetit içerikli hamurların büzülme oranları birbirine yakın olduğu, YÇD0'ın büzülmesinden 0,004 daha az hacim kaybı gösterdikleri belirlenmiştir. Ayrıca, %2, %4 ve %8 manyetit içerikli kompozitlerin büzülme değerlerinin priz sonundan 90 güne kadar çok yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.24'e göre, ısı kür sonrası en fazla büzülme %0,8 ile manyetitsiz BPD0 hamurunda olmuştur. Tüm numunelerde büzülme değerleri çoğunlukla artan bir eğilim göstermiş, maksimum büzülme değerine 90 gün sonucunda %1,3 ile BPD0 hamurunda rastlanılmıştır. Öte yandan, %4 ve %8 manyetit içerikli hamurların büzülme eğrileri birbiri ile aynı olup, %2 manyetitli hamurun eğrisi buna yakındır. Kullanılan manyetit miktarı nihai büzülmeyi gözle görülür derecede etkilememiştir.



Şekil 4.24. Beyaz tüf esaslı PP lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.

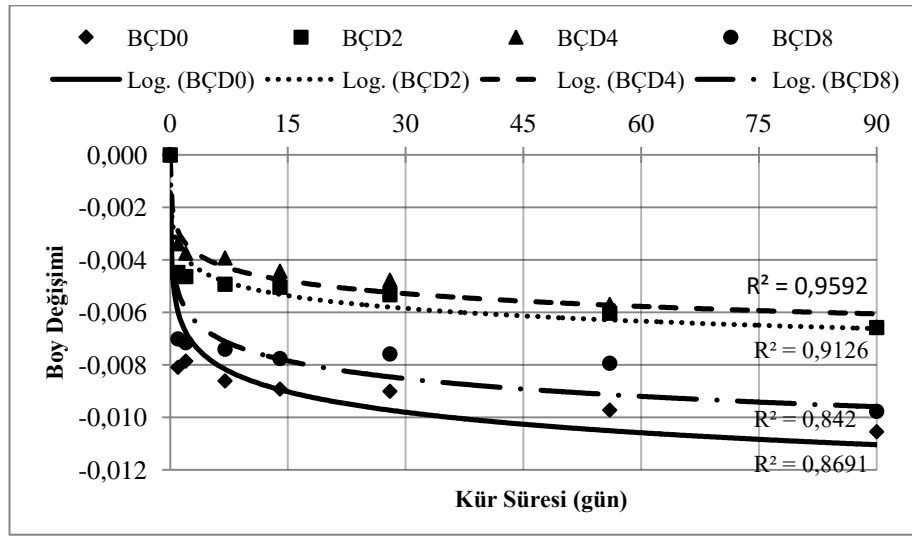
PP lifli üretimlerde manyetit kullanımının büzülme azalttığı, kür sonu devamında genel itibarıyla büzülme gelişimlerinin yakın olduğu görülmüştür. 90 günlük maksimum büzülme değerleri kıyaslandığında; BPD0'ın büzülmesi, değeri en düşük olan BPD4'ün büzülmesinden 0,004, BPD2 ve BPD8'in büzülmesinden ise 0,003 fazladır.



Şekil 4.25. Beyaz tüf esaslı karbon lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.

Şekil 4.25'e göre en fazla büzülme %0,4 ile manyetitsiz BKD0 hamurunda görülmüştür. Tüm numunelerde büzülme değerleri çoğunlukla artan bir eğilim

gösterirken maksimum büzülme değeri 90 gün sonucunda %0,7 ile BKD0 hamurunda görülmüştür. Karbon lifli üretimlerde manyetit kullanımının büzülmeyi azalttığı, kür sonu devamında genel itibarıyla büzülme gelişimlerinin yakın olduğu görülmüştür. 90 günlük en fazla büzülmeler kıyaslandığında; BKD0'ın büzülmesi, değeri en düşük olan BKD2'nin büzülmesinden 0,004, manyetitli AAH'lerde en yüksek büzülmeye sahip olan BKD8'in büzülmesinden ise 0,002 daha fazladır.

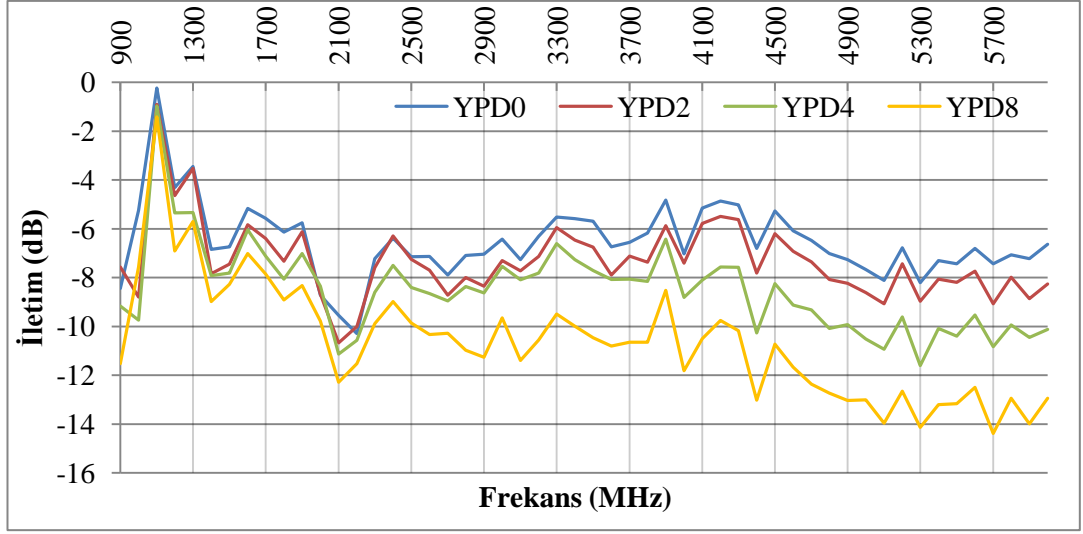


Şekil 4.26. Beyaz tüf esaslı mikro çelik lif takviyeli AAH'lerin büzülme sonuçları.

Şekil 4.26'ya göre, en fazla büzülme %0,8 ile manyetitsiz BÇD0 hamurunda görülmüştür. Tüm numunelerde büzülme değerleri artan bir eğilim göstermiş, maksimum büzülme 90 gün sonucunda %1,1 ile BÇD0 hamurunda gözlemlenmiştir. Ayrıca, 90 günlük en yüksek büzülmeler doğrultusunda, manyetitsiz ve %8 manyetit içerikli hamurların ve %2 ve %4 manyetit içerikli hamurların büzülmelerinin kendi aralarında birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Çelik lifli üretimlerde %2 ve %4 oranında manyetit kullanımının büzülmeyi azalttığı gözlenmiştir. 90 günlük maksimum büzülme değerleri kıyaslandığında; BÇD0'ın büzülmesi, değeri en düşük olan BÇD4'ün büzülmesinden 0,004, manyetit içerikli hamurlar arasında en yüksek değere sahip olan BÇD8'in büzülmesinden ise 0,001 fazladır.

4.5. ELEKTROMANYETİK ÖZELLİK TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

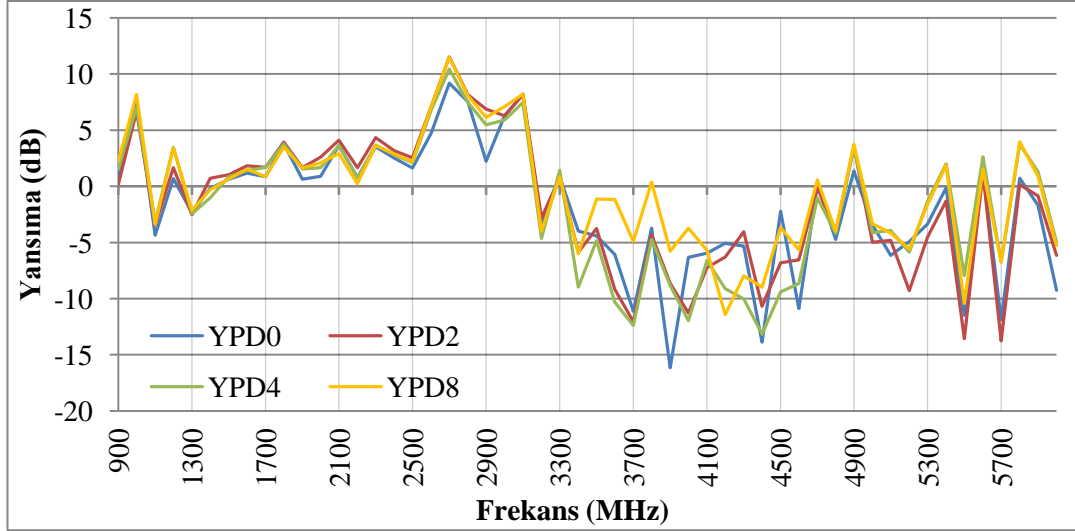
Deneyde, elektromanyetik alan içinde (EMF) Faraday kafesi içinde 900 MHz – 6000 MHz arasında 100 MHz ara ile her bir AAH'den üretilen 300×300×10 mm boyutlarındaki lifli kaplama malzemeleri üzerinde iletim ve yansıma özellikleri incelenmiştir. Deneyler, AAH kaplama malzemelerinin üretiminden sonra 56 – 90 günleri arasında yapılmıştır. Bu bölümde ilk aşamada iletim, sonraki aşamada ise yansıma sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 4.27 – Şekil 4.44, EMF iletim ve yansıma verilerini göstermektedir. EMF iletimi grafiklerinin ardından kaplamaların görüntülerine yer verilmiştir. Elektromanyetik özellikler, kaplama malzemesinin 900 MHz, 1800 MHz (cep telefonu frekansları), 2400 MHz (bluetooth ve wi-fi frekansları) ve 5000 MHz (wi-fi frekansları) frekanslı dalgaların dB cinsinden absorpsiyon ya da yansıtma değerlerinin değerlendirmelerini kapsamaktadır. AAH'lerin molaritesi elektromanyetik özellikler için etkili bir parametre olmadığı için yeşil ve beyaz tüflü üretimler arasında kıyaslamalar yapılmıştır. Şekillerde verilen iletim ölçüleri malzemelerin EMF dalgalarını ne ölçüde absorbe ettiğini ve yansıttığını göstermektedir. İletim değerlerindeki negatif ifade absorpsiyon ve yansımanın birlikte ne kadar yüksek derecede gerçekleştiğini belirtmektedir. Bu aşamada PC ve TV radyasyonundan korunmak için -20 dB, Wi-Fi vericilerini kapatmak için -50 dB – -70 dB ve cep telefonu bandını kapatmak için -70 dB – -90 dB enerji kesmeye ihtiyaç bulunmaktadır.



Şekil 4.27. Yeşil tuf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.

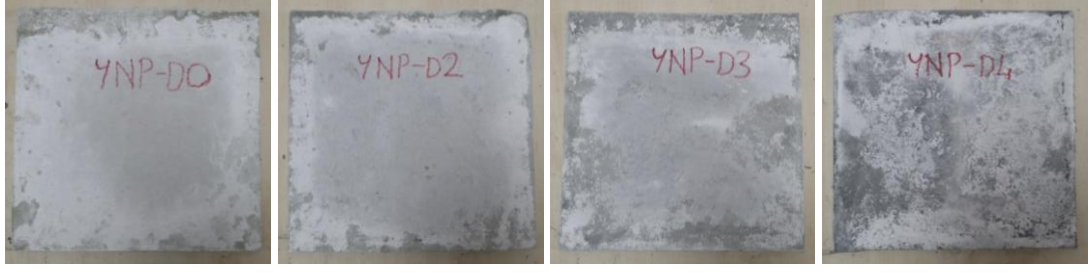
Şekil 4.27'ye göre, manyetit oranı arttıkça özellikle yüksek enerjilerde etkileşimin arttığı, yansıma ya da absorpsiyon özelliğinin daha net görüldüğü belirlenmiştir. Ancak özellikle 3000 MHz'den daha düşük enerjideki EMF dalgalarına karşı hemen hemen tüm kaplama malzemeleri benzer etki göstermişlerdir. 900 MHz'lik frekans kapsamında YPD0, YPD2, YPD4 ve YPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -8,45 dB, -7,56 dB, -9,16 dB ve -11,52 dB 'dir. En yüksek miktarda EMF zayıflatan AAH YPD8, en düşük oranda EMF zayıflatan AAH %2 manyetitli YPD2'de elde edilmiştir. AAH malzemelerde manyetit oranı arttıkça daha fazla EMF zayıflatılmıştır. 1800 MHz frekansta YPD0, YPD2, YPD4 ve YPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -6,14 dB, -7,33 dB, -8,07 dB ve -8,92 dB 'dir. En yüksek miktarda EMF zayıflatan AAH YPD8 iken, en düşük oranda EMF zayıflatan AAH manyetitsiz YPD0'da elde edilmiştir. Manyetit oranının artışı, iletim ölçülerinde dikkate değer bir etki oluşturmamış, ayrıca ölçüler 900 MHz'e göre azalmıştır. 2400 MHz frekansta YPD0, YPD2, YPD4 ve YPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -6,38 dB, -6,29 dB, -7,50 dB ve -8,98 dB'dir. En yüksek oranda EMF zayıflatan AAH YPD8 iken, en düşük oranda EMF zayıflatan AAH manyetitsiz YPD0'da elde edilmiştir. Manyetit oranının artışıyla, EMF iletim ölçüleri de artmıştır. 5000 MHz frekansta YPD0, YPD2, YPD4 ve YPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -7,67 dB, -8,62 dB, -10,52 dB ve -13,01 dB'dir. En yüksek oranda EMF zayıflatan AAH YPD8 iken, en düşük oranda EMF zayıflatan AAH manyetitsiz YPD0'da elde edilmiştir. Manyetit

oranı arttıkça EMF zayıflatma ölçüleri de artmıştır. 900 – 6000 MHz frekans bantlarında tüm AAH’lerin iletim (EMF zayıflatma ölçüsü) değeri -20 dB’den daha düşük olduğu için PP lifle üretilen AAH kaplama malzemelerinin 900 – 1800 MHz bantlarında iletken malzeme gibi davrandığı söylenebilir.

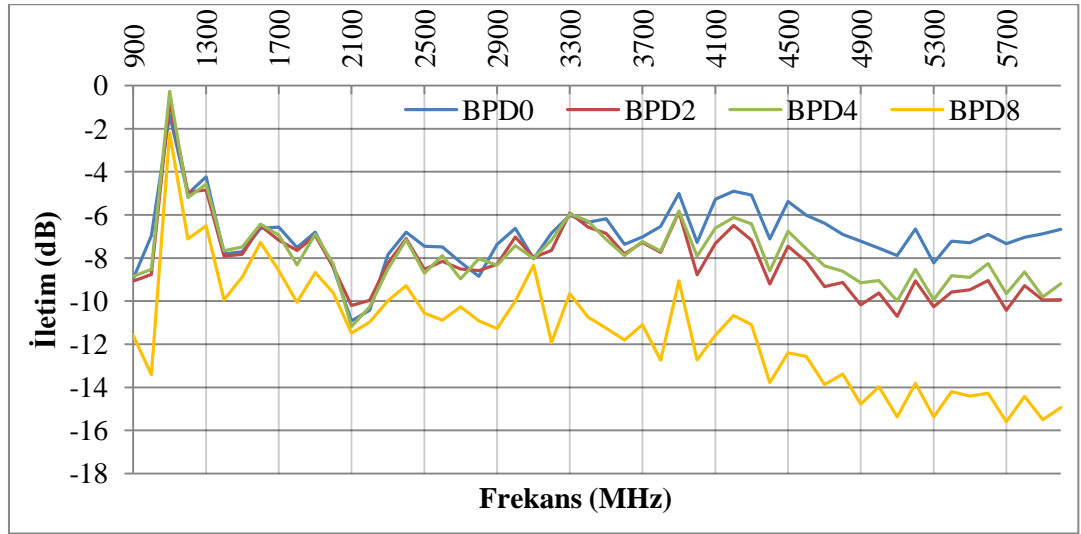


Şekil 4.28. Yeşil tuf esaslı ve PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.

Şekil 4.28’e göre, 900 – 3000 MHz arasında daha yüksek yansıma, sonrasında daha düşük yansıma değerleri elde edilmiştir. Yansıma detektöründen alınan ölçümlere göre, AAH’lerde manyetit oranındaki artışın yani kaplama malzemesindeki iletkenlik artışının EMF dalgalarını yansıma davranışını çok fazla etkilemediği yani yansıma davranışının malzemenin manyetit oranındaki artış ile doğrudan ilgili olmadığı belirlenmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi manyetit artışı frekans artışıyla birlikte önemli sapmalara sebep olmamıştır. En yüksek yansıma 1000 MHz ve 2700 MHz frekanslarında sırasıyla 8 dB ve 11 dB ile gözlenmiştir. En düşük yansıma değerleri -10 ile -15 dB arasında 3600 MHz ile 5500 MHz arasında olmuştur. Ahmed (2021), hacimce %2 pp lif kullandığı çalışmasında maksimum yansıma değeri 900 MHz’de -9,23 dB olarak ölçülmüştür [55]. Guan vd. (2017)’nin yapmış olduğu çalışmada ise en yüksek yansıma kaybı, 3,7 GHz’de -28 dB olarak elde edilmiştir. Ayrıca Şekil 4.29’da gösterildiği gibi kaplama malzemeleri her ne kadar 90 gün yaşına kadar karbonatlaşmaya uğrasa da manyetitin etkisiyle kaplamaların renklerinin koyulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Karbonatlaşma manyetit oranı arttıkça azalmıştır.



Şekil 4.29. Yeşil tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.



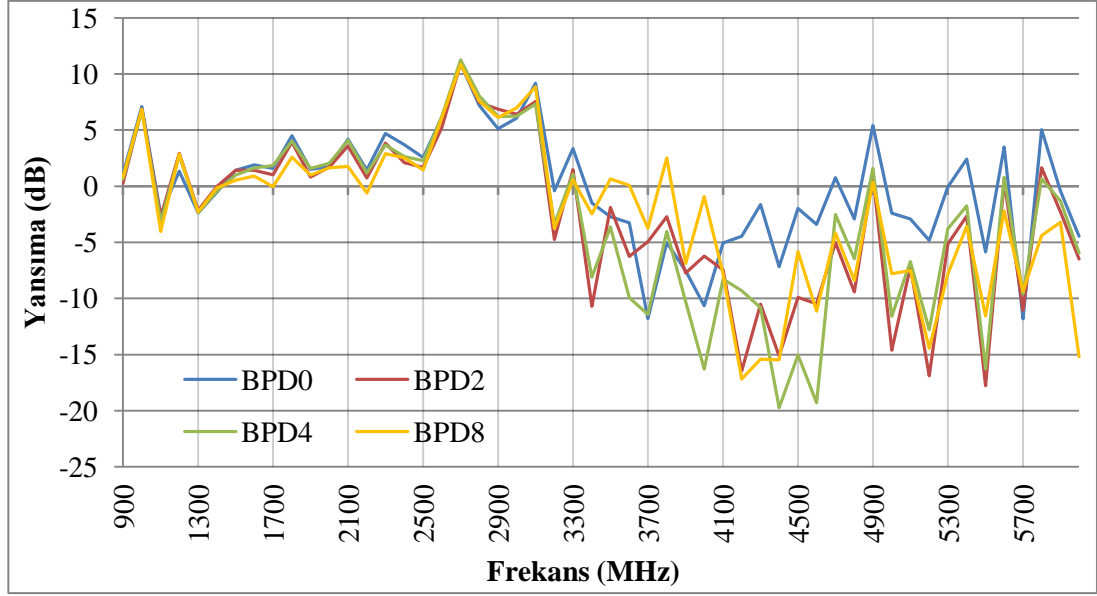
Şekil 4.30. Beyaz tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.

Şekil 4.30'a göre, PP lifli AAH'lerde göre manyetit oranı arttıkça özellikle yüksek enerjilerde EMF etkileşiminin arttığı, yansıma ya da absorpsiyon özelliğinin daha net görüldüğü belirlenmiştir. Ancak özellikle 3000 MHz'den daha düşük enerjideki EMF dalgalarına karşı hemen hemen tüm AAH kaplama malzemeleri benzer etki göstermişlerdir. 900 MHz frekansta BPD0, BPD2, BPD4 ve BPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -8,97 dB, -9,08 dB, -8,85 dB ve -11,58 dB'dir. En yüksek oranda EMF zayıflatan AAH BPD8'de elde edilmiştir. Ancak BPD0, BPD2 ve BPD4 için EMF zayıflatma ölçüleri birbirlerinden anlamlı derecede bir fark oluşturmamışlardır. 1800 MHz frekansta BPD0, BPD2, BPD4 ve BPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -7,51 dB, -7,65 dB, -8,32 dB ve -10,06 dB 'dir. En yüksek oranda EMF zayıflatan AAH BPD8 iken, en düşük oranda EMF zayıflatan AAH manyetitsiz BPD0'da elde edilmiştir. Manyetit ikame oranının arttıkça EMF zayıflatma ölçüleri de artmıştır.

2400 MHz frekansta BPD0, BPD2, BPD4 ve BPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -6,80 dB, -7,10 dB, -7,16 dB ve -9,28 dB 'dir. En yüksek oranda EMF zayıflatan AAH BPD8 iken, en düşük oranda EMF zayıflatan AAH manyetitsiz BPD0'da elde edilmiştir. Manyetit ikame oranının arttıkça EMF zayıflatma ölçüleri de artmıştır. 5000 MHz frekansta BPD0, BPD2, BPD4 ve BPD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -7,55 dB, -9,63 dB, -9,05 dB ve -13,98 dB'dir. En yüksek oranda EMF zayıflatan BPD8 iken, en düşük oranda EMF zayıflatan AAH manyetitsiz BPD0'da elde edilmiştir. 900 – 6000 MHz frekans bantlarında tüm AAH'lerin iletim (EMF zayıflatma ölçüsü) değeri -20 dB'den daha düşük olduğu için PP lifle üretilen BBT esaslı AAH kaplama malzemelerinin 900 – 1800 MHz bantlarında iletken malzeme gibi davrandığı söylenebilir.

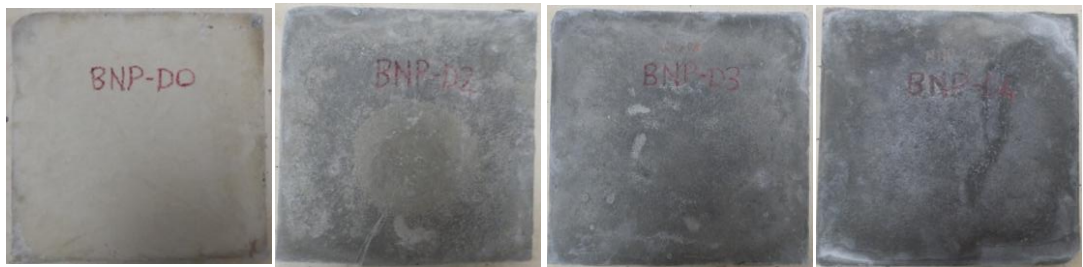
Şekil 4.31'e göre 900 – 3300 MHz arasında daha yüksek yansıma, sonrasında daha düşük yansıma değerleri elde edilmiştir. Yansıma detektöründen alınan ölçümlere göre, AAH'lerde manyetit oranındaki artışın yani kaplama malzemesindeki iletkenlik artışının 900 – 3300 MHz frekans aralığında EMF dalgalarını yansıtma davranışını çok fazla etkilemediği yani yansıma davranışının malzemenin manyetit oranındaki artış ile doğrudan ilgili olmadığı belirlenmiştir. Ancak 3300 MHz – 6000 MHz arasında AAH kaplama malzemelerindeki manyetit oranındaki artışın yansımadan çok absorpsiyon ya da iletim olduğu görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi manyetit artışı frekans artışıyla birlikte önemli sapmalara sebep olmamıştır. Özellikle 3700 MHz sonrasında manyetit oranındaki değişimin iletim veya absorpsiyonu daha belirgin oranda artırdığı belirtilebilir.

En yüksek yansıma değeri 2700 MHz frekansında 11 dB ile gözlenmiştir. En düşük yansıma değerleri -20 ile -18 dB arasında 4400 MHz ile 5500 MHz frekanslarında %4 manyetiteli AAH'lerde olmuştur. Diğer taraftan, manyetit oranı %2-8 arasında 3300 MHz'den sonra 20 dB'ye kadar iletim veya absorpsiyon oluşmasına rağmen, 900 – 3300 MHz arasında tüm AAH'ler yansıma enerjisi almıştır.

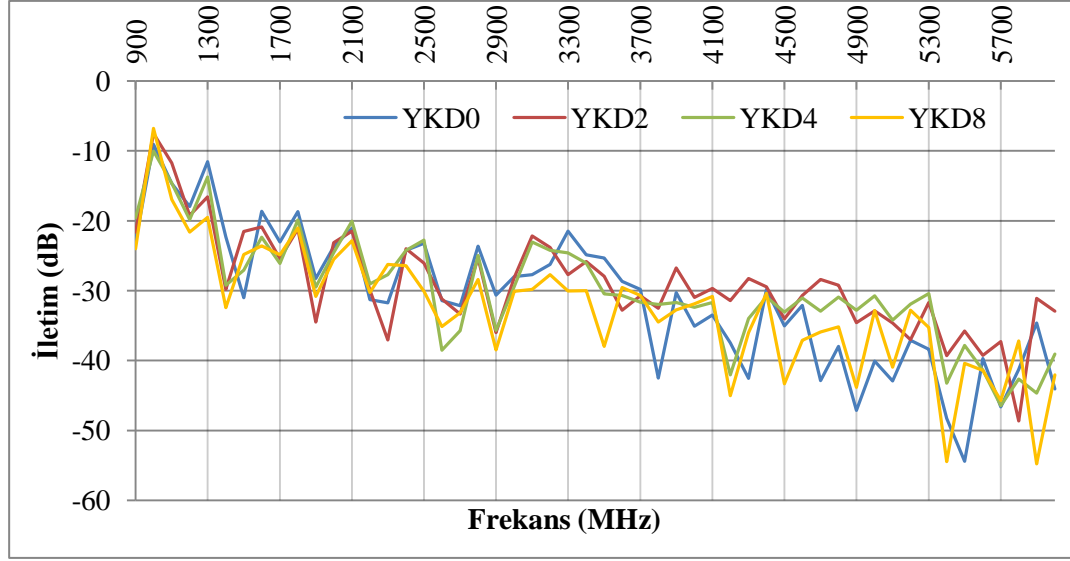


Şekil 4.31. Beyaz tüf esaslı ve PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıma özellikleri.

Manyetitsiz AAH'nin 3300 MHz sonrasında yansıma enerjisi alması beklenmeyen bir sonuç iken, manyetitli AAH'lerde 3300 MHz sonrasında yansıma enerjisinden çok iletim veya absorpsiyona sebep olması yine beklenen bir durum değildir. Burada manyetitin partikül boyutunun küçük olması sebebiyle 3300 MHz sonrasında PP liflerin daha etkin olduğu ve bundan dolayı manyetitin malzemenin yansıma karakterini önemli derecede etkilemediği de söylenebilir. Ayrıca Şekil 4.32'de gösterildiği gibi kaplama malzemeleri her ne kadar 90 gün yaşına kadar az oranda karbonatlaşmaya uğrasa da manyetitin etkisiyle kaplamaların renklerinin koyulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Beyaz tüf esaslı AAH'lerde karbonatlaşma etkisi manyetit oranı arttıkça artmıştır.



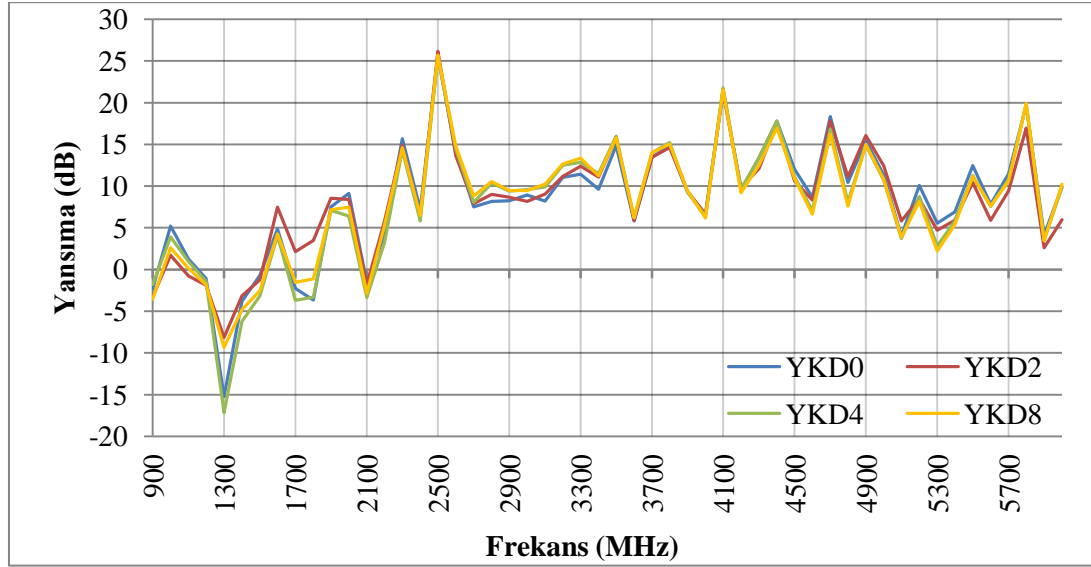
Şekil 4.32. Beyaz tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.



Şekil 4.33. Yeşil tuf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.

Şekil 4.33'e göre YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8 için frekans arttıkça EMF zayıflatma ölçüleri de önemli derecede artmıştır. Ancak AAH'lerde manyetit ilavesinin EMF zayıflatmasında önemli bir etkiye sahip olmadığı, EMF zayıflatmanın temel sebebinin daha çok karbon lif olduğu söylenebilir. Bundan dolayı tüm frekans değerlerinde tüm AAH iletim ölçüleri birbiri içine girmiş ve anlamsızlaşmıştır. Söz konusu yeşil tuf içerikli ve karbon lifli kaplamalar dahilinde manyetit oranı ve dalga iletimi arasında ilişki kurulamamıştır. Karbon lifin, karışımda manyetik özellikli malzeme varken bile sisteme hâkim olduğu görülmüştür. 900 MHz frekansta YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -23,01 dB, -21,64 dB, -19,56 dB ve -24 dB'dir. 1800 MHz frekansta YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -18,67 dB, -21,18 dB, -19,87 dB ve -21,04 dB'dir. 2400 MHz frekansta YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -24,21 dB, -23,99 dB, -24,25 dB ve -26,44 dB'dir. Hemen hemen tüm AAH kaplama malzemelerinin 900 – 5000 MHz frekans bantlarında EMF kalkanlama konusunda başarılı olduğu, TV ve mobil iletişimi zayıflattığı söylenebilir. 5000 MHz frekansta YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -40,08 dB, -32,88 dB, -30,74 dB ve -32,83 dB'dir. Lesbayev vd. (2017)'nin yaptıkları çalışmada 10 mm kalınlığında ürettikleri malzemede maksimum verimlilik -19.9 dB ile 1.5 GHz frekansında elde edilmiştir [126]. Bütün kaplamalarının iletim değerleri -20 dB'den fazla olduğu için wi-fi

kaynaklı cihazlar tarafından üretilen dalgaları engellemede başarılı oldukları görülmüştür. Ayrıca, Vlasceanu vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada %10'a kadar manyetit ilavesinin manyetik geçirgenlik ve dielektrik sabitinde hafif bir artışa neden olduğu ve yüksek bağıl nemde manyetik geçirgenliğin arttığı belirtilmiştir [132].

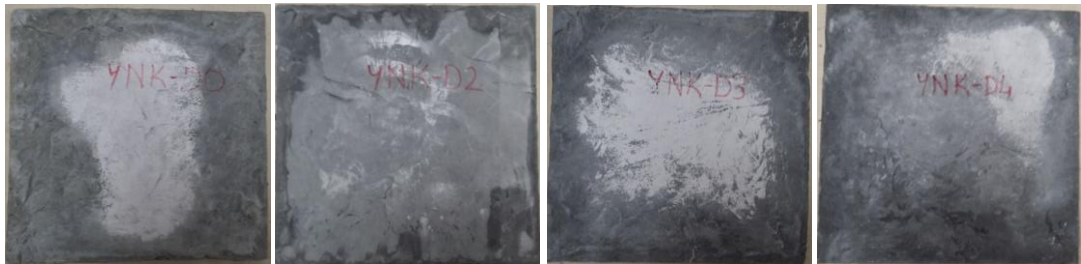


Şekil 4.34. Yeşil tuf esaslı ve karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıtma özellikleri.

Şekil 4.34'e göre, 2100 MHz – 6000 MHz arasında yüksek yansıtma, 900 – 2100 MHz arasında daha düşük yansıtma değerleri elde edilmiştir. Yansıtma detektöründen alınan ölçümlere göre, AAH'lerde manyetit oranındaki artışın yani kaplama malzemesindeki iletkenlik artışının, 1300 MHz hariç, EMF dalgalarını yansıtma davranışını çok fazla etkilemediği yani yansıtma davranışının malzemenin manyetit oranındaki artış ile doğrudan ilgili olmadığı belirlenmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi manyetit artışı EMF frekansındaki artışla birlikte yansıtma değerlerinde önemli sapmalara sebep olmamıştır. Şekil 4.34'de verildiği gibi 2500 MHz'de oluşan 25 – 30 dB değerindeki enerji azalmasının sebebi, Şekil 4.33'de verildiği gibi %90'ından fazlası yansıtma olarak kaplama malzemesinden saçılarak yansıtma detektörü tarafından tutulmasıdır. 2500 MHz'den sonraki iletim değerlerindeki 54 dB değerindeki enerji azalmasının büyük bir kısmının yansıtma olduğu söylenebilir. Yeşil tüflü AAH'de karbon lif ve manyetit malzemenin elektrik iletkenliğini

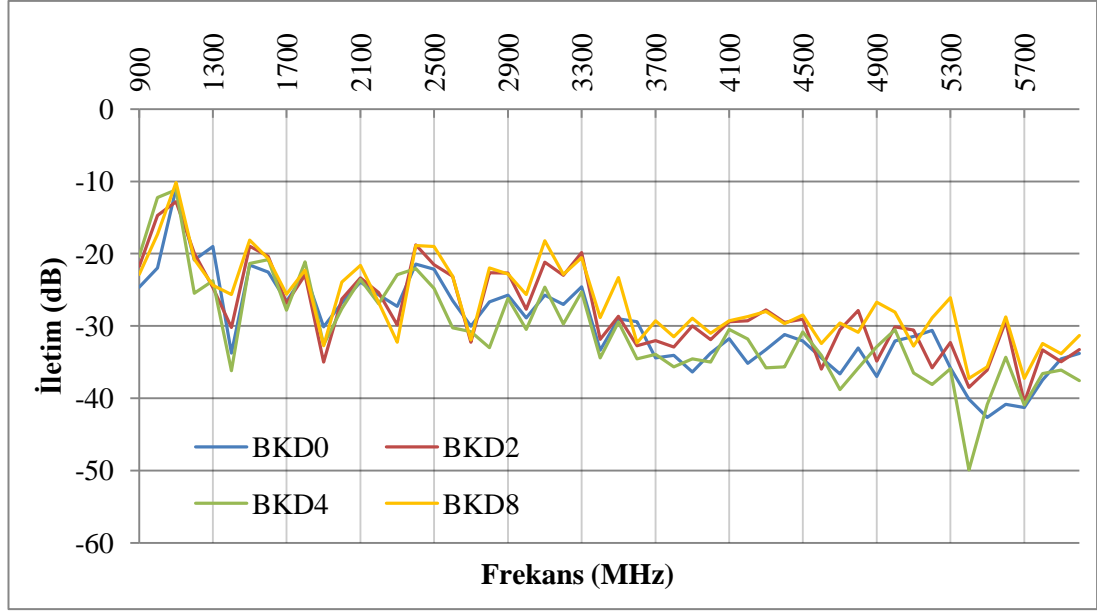
artırmasından dolayı kaplama malzemesinin absorpsiyon ile yansıtma özelliğinin gelişmesine sebep olmuştur.

900 MHz'lik frekans kapsamında YKD0, YKD2, YKD4 ve YKD8 gruplarının dalga yansıma değerleri sırasıyla -2,31 dB, -3,33 dB, -1,80 dB ve -3,55 dB 'dir. 1800 MHz'lik frekans kapsamında yansıma değerleri sırasıyla -3,64 dB, 3,50 dB, -3,32 dB ve -1,13 dB 'dir. 2400 MHz'lik frekans kapsamında yansıma değerleri sırasıyla 7,19 dB, 6,44 dB, 5,84 dB ve 6,48 dB 'dir. 5000 MHz'lik frekans kapsamında ise yansıma değerleri sırasıyla 11,31 dB, 12,41 dB, 10,68 dB ve 10,80 dB olarak ölçülmüştür. En yüksek yansıma değeri 2500 MHz frekansında 26 dB ile gözlenmiştir. En düşük yansıma değerleri -17 dB ile 1300 MHz frekansında %4 ve %0 manyetitli AAH'lerde olmuştur. Ayrıca Şekil 4.35'de gösterildiği gibi kaplama malzemeleri her ne kadar 90 gün yaşına kadar az oranda karbonatlaşmaya uğrasa da manyetitin etkisiyle kaplamaların renklerinin koyulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Karbonatlaşma etkisi manyetit oranı arttıkça azalmıştır.



Şekil 4.35. Yeşil tüf esaslı ve karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.

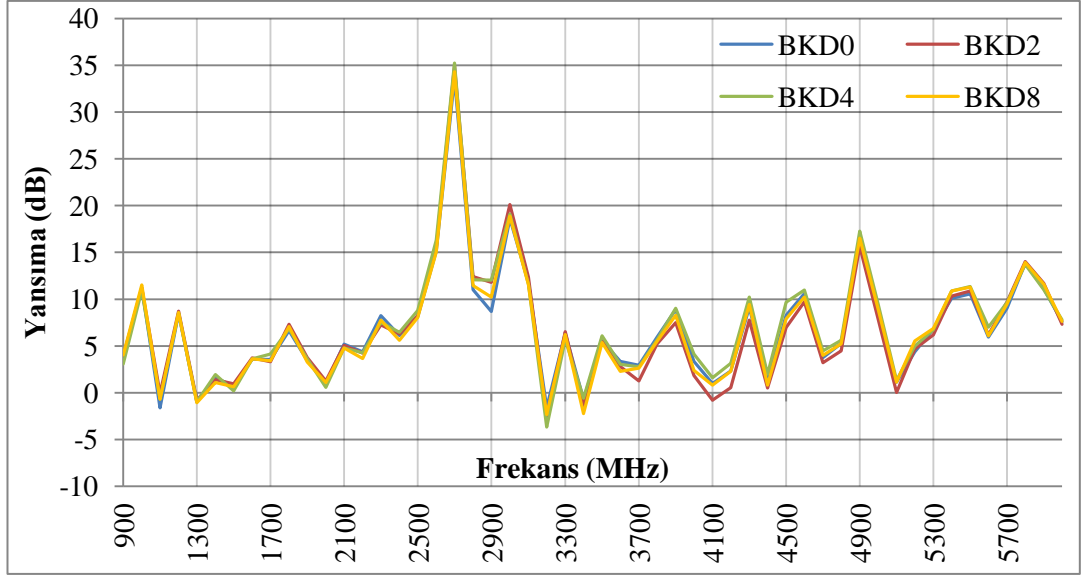
Şekil 4.36'ya göre, BKD0, BKD2, BKD4 ve BKD8 grupları için genel itibarıyla artan frekans doğrultusunda iletim değerlerinin azaldığı (EMF kalkanlama özelliğinin arttığı) görülmektedir. Söz konusu beyaz tüf içerikli ve karbon lifli kaplamalar dahilinde manyetit oranı ve kalkanlama potansiyeli arasında ilişki kurulamamıştır. Yeşil tüflü AAH'lerde olduğu gibi karbon lifin, karışımda manyetik özellikli malzeme varken bile sisteme hakim olduğu görülmüştür.



Şekil 4.36. Beyaz tüf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.

900 MHz frekansta BKD0, BKD2, BKD4 ve BKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -24,65 dB, -21,77 dB, -20,33 dB ve -22,86 dB'dir. 1800 MHz frekansta BKD0, BKD2, BKD4 ve BKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -22,70 dB, -22,93 dB, -21,13 dB ve -22,30 dB'dir. 2400 MHz frekansta BKD0, BKD2, BKD4 ve BKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -21,46 dB, -18,78 dB, -22,06 dB ve -18,88 dB'dir. 5000 MHz frekansta BKD0, BKD2, BKD4 ve BKD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -32,09 dB, -30,13 dB, -30,53 dB ve -28,07 dB'dir. Bütün kaplamalarının iletim değerleri -20 dB'den fazla olduğu için TV ve wi-fi kaynaklı cihazlar tarafından üretilen dalgaları engellemede ve mobil telefon hatlarının zayıflatılmasında başarılı oldukları belirlenmiştir.

Şekil 4.37'ye göre, 2500 – 6000 MHz arasında yüksek yansıtma, 900 – 2500 MHz ve arasında daha düşük yansıtma değerleri elde edilmiştir. Ancak Beyaz tüf esaslı karbon lifli AAH'lerde analizi gerçekleştirilen tüm frekanslarda yansıtma etkisinin daha yüksek olduğu söylenebilir. Yansıtma detektöründen alınan ölçümlere göre, AAH'lerde manyetit oranındaki artışın yani kaplama malzemesindeki iletkenlik artışının EMF dalgalarını yansıtma davranışını çok fazla etkilemediği yani yansıtma davranışının malzemenin manyetit oranındaki artış ile doğrudan ilgili olmadığı belirlenmiştir.



Şekil 4.37. Beyaz tüf esaslı ve karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıma özellikleri.

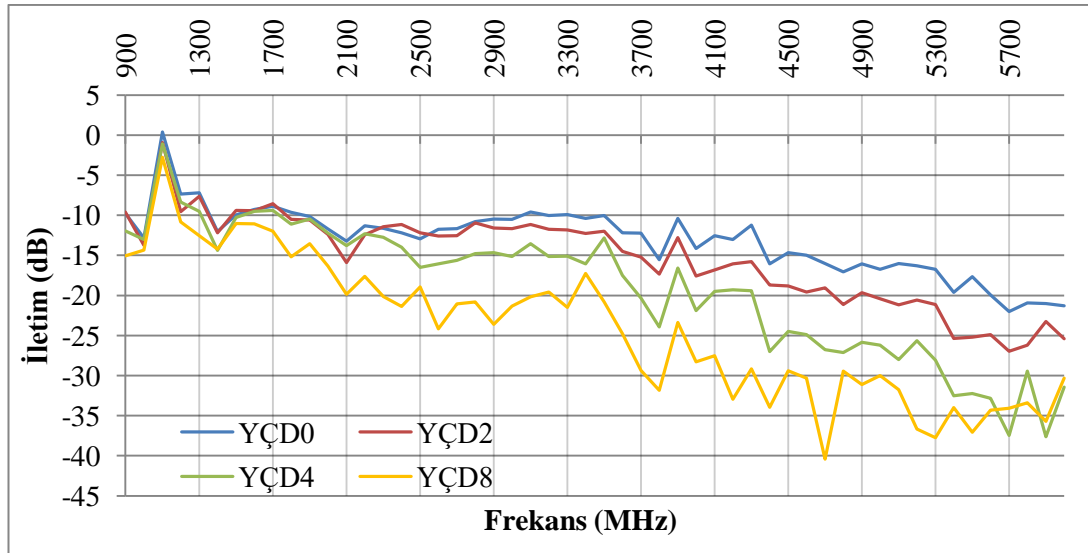
Karbon lifin boyutlarından dolayı AAH'lerde sistemin yansıma ve absorpsiyon davranışını kontrol ettiği de söylenebilir. Şekil 4.37'de verildiği gibi 2700 MHz'de oluşan 35 dB değerindeki enerji azalmasının sebebi, Şekil 4.36'da verildiği gibi tümü yansıtma olarak kaplama malzemesinden saçılarak yansıma detektörü tarafından tutulmasıdır. 2500 MHz'den sonraki iletim değerlerindeki 54 dB'ye kadar değişen enerji azalmasının büyük bir kısmının yansıma olduğu söylenebilir. Beyaz tüflü AAH'de karbon lif ve manyetit malzemenin elektrik iletkenliğini artırmasından dolayı kaplama malzemesinin yansıtma özelliğinin gelişmesine sebep olmuştur.

900 MHz'lik frekans kapsamında BKD0, BKD2, BKD3 ve BKD4 gruplarının dalga yansıma değerleri sırasıyla 3,74 dB, 3,94 dB, 3,08 dB ve 4,02 dB 'dir. 1800 MHz'lik frekans kapsamında yansıma değerleri sırasıyla 6,63 dB, 7,31 dB, 6,83 dB ve 7,08 dB'dir. 2400 MHz'lik frekans kapsamında yansıma değerleri sırasıyla 6,13 dB, 6,30 dB, 6,45 dB ve 5,59 dB 'dir. 5000 MHz'lik frekans kapsamında ise yansıma değerleri sırasıyla 8,69 dB, 7,94 dB, 9,53 dB ve 8,98 dB olarak ölçülmüştür. En yüksek yansıma değeri 2700 MHz frekansında 35 dB ile gözlenmiştir. En düşük yansıma değerleri -2 dB ile 3200 MHz frekansında tüm AAH'lerde olmuştur. Ayrıca Şekil 4.38'de gösterildiği gibi kaplama malzemelerinin renklerinin manyetitin

etkisiyle koyulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Beyaz tuf esaslı AAH'lerde karbonatlaşma etkisi manyetit oranı arttıkça artmıştır.



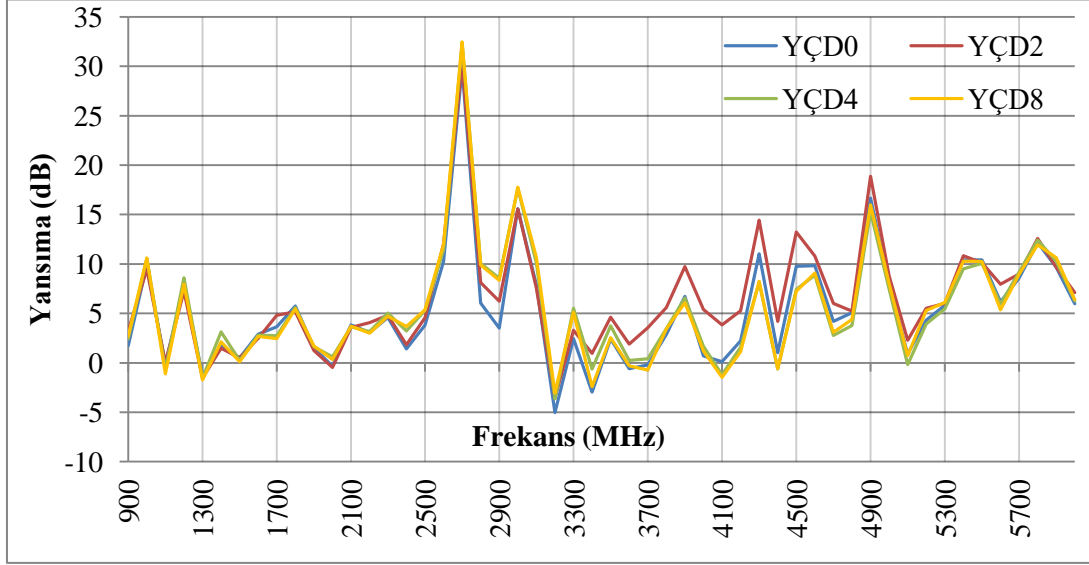
Şekil 4.38. Beyaz tuf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.



Şekil 4.39. Yeşil tuf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.

Şekil 4.39'a göre, 900 MHz frekansta YÇD0, YÇD2, YÇD4 ve YÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -9,74 dB, -9,58 dB, -11,93 dB ve -15,05 dB'dir. En yüksek EMF kalkanlayan AAH kaplama malzemesi YÇD8 olmuştur. Manyetit ikame oranının büyümesi, iletim ölçüsünün (EMF zayıflatılmasının artmasına) azalmasına neden olmuştur. 1800 MHz frekansta YÇD0, YÇD2, YÇD4 ve YÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -9,65 dB, -10,51 dB, -11,13 dB ve -15,18 dB'dir. 2400 MHz frekansta YND0, YÇD2, YÇD4 ve YÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -12,20 dB, -11,15 dB, -14 dB ve -21,38 dB'dir. 5000 MHz frekansta YÇD0, YÇD2, YÇD4 ve YÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -16,8 dB, -20,4 dB, -26,2 dB ve -30 dB'dir.

2400 MHz frekansında YÇD8, 5000 MHz frekansında YÇD2, YÇD4 ve YÇD8 kaplamalarının iletim değerleri -20 dB'den daha düşük olduğu için wi-fi cihazları tarafından üretilen dalgaları engellemede veya zayıflatmada etkili olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.40. Yeşil tüf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF yansıtma özellikleri.

Şekil 4.40'a göre, yeşil tüf esaslı çelik lifli AAH kaplama malzemelerinde tüm frekanslarda yüksek yansıtma değerleri elde edilmiştir. Ancak yansıtma detektöründen alınan ölçümlere göre, AAH'lerde manyetit oranındaki artışın yani kaplama malzemesindeki iletkenlik artışının (%2 manyetit oranı hariç) EMF dalgalarını yansıtma davranışını çok fazla etkilemediği yani yansıtma davranışının malzemenin manyetit oranındaki artış ile doğrudan ilgili olmadığı belirlenmiştir. Çelik lifin boyutlarından dolayı bu AAH'lerde sistemin yansıtma ve absorpsiyon davranışını kontrol ettiği de söylenebilir. Şekil 4.40'da verildiği gibi 2700 MHz'de oluşan 32,5 dB değerindeki enerji azalmasının sebebi, Şekil 4.39'da verildiği gibi tümü yansıtma olarak kaplama malzemesinden saçılarak yansıtma detektörü tarafından tutulmasıdır. 2500 MHz'den sonraki iletim değerlerindeki 37 dB'ye kadar değişen enerji azalmasının yaklaşık %50'sinin yansıtma diğer kısmının absorpsiyon olduğu söylenebilir. Yeşil tüflü AAH'de çelik lif ve manyetit malzemenin elektrik

iletkenliğini artırmasından dolayı kaplama malzemesinin yansıtma özelliğinin gelişmesine sebep olmuştur.

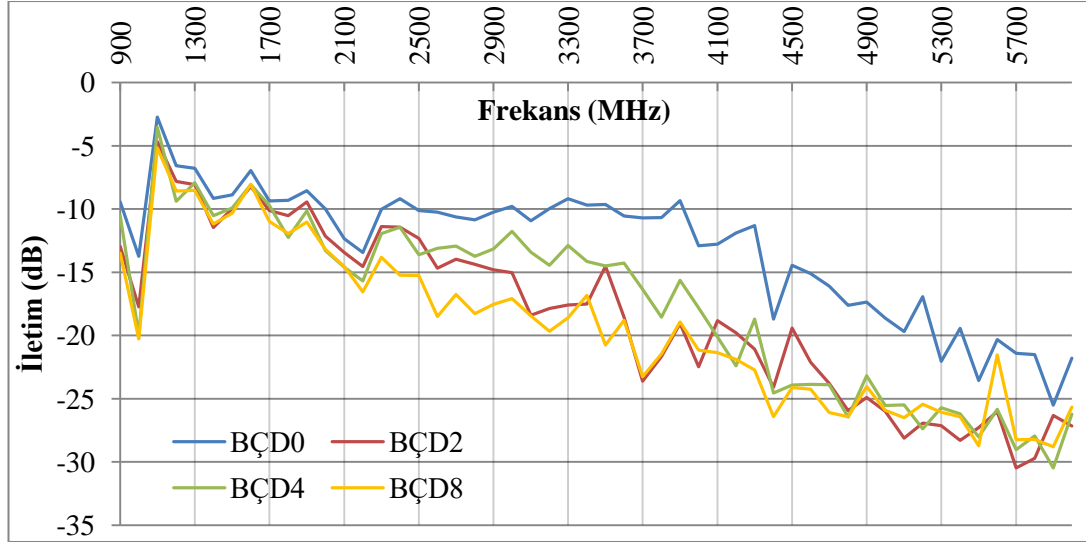
900 MHz'lik frekans kapsamında YÇD0, YÇD2, YÇD4 ve YÇD8 gruplarının dalga yansıma değerleri sırasıyla 1,72 dB, 3,21 dB, 2,41 dB ve 2,72 dB 'dir. 1800 MHz'lik frekans kapsamında yansıma değerleri sırasıyla 5,75 dB, 5,18 dB, 5,60 dB ve 5,45 dB'dir. 2400 MHz'lik frekans kapsamında yansıma değerleri sırasıyla 1,40 dB, 1,82 dB, 3,22 dB ve 3,68 dB 'dir. 5000 MHz'lik frekans kapsamında ise yansıma değerleri sırasıyla 7,92 dB, 8,79 dB, 7,48 dB ve 8,03 dB olarak ölçülmüştür. En yüksek yansıma değeri 2700 MHz frekansında 32,5 dB ile gözlenmiştir. En düşük yansıma değerleri -3,6 dB ile 3200 MHz frekansında tüm AAH'lerde olmuştur. Ayrıca Şekil 4.41'de gösterildiği gibi kaplama malzemelerinin renklerinin manyetitin etkisiyle koyulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Yeşil tuf esaslı çelik lifli AAH'lerde karbonatlaşma etkisi oldukça yüksek oranda görülmüştür.



Şekil 4.41. Yeşil tuf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.

Şekil 4.42'ye göre, 900 MHz frekansta BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -9,45 dB, -12,95 dB, -10,53 dB ve -13,49 dB'dir. Çelik lifler yüksek derecede iletkenliğe sahip oldukları için manyetitin etkisini azaltmıştır. Çünkü hem boyut olarak hem de hacim olarak yüksek miktardadır. Bu sebeple %2 ve %4 manyetit oranları için çelik lif sistemin EMF etkileşimini kontrol etmiştir. 1800 MHz frekansta BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -9,32 dB, -10,53 dB, -12,24 dB ve -11,95 dB'dir. EMF ölçümleri 900 MHz ve 1800 MHz için benzer davranış göstermiştir. Manyetitin etkisinin görülmediği bu frekans aralığında en yüksek soğurma/yansıta miktarı 13 dB olmuştur. Ancak malzemeler arasında önemli bir EMF kalkanlama özelliği görülmemiştir. Sistem bu arada az bir

miktar yansıtma yaptığı ve aslında iletim yönünde bir davranış gösterdiği söylenebilir.

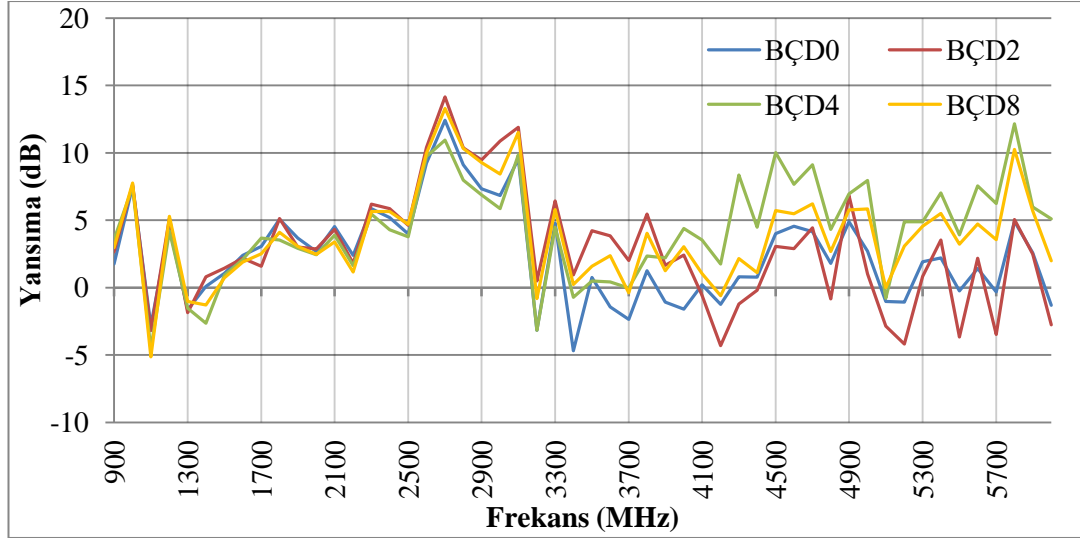


Şekil 4.42. Beyaz tûf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamaların EMF iletim özellikleri.

2400 MHz frekansta BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -9,18 dB, -11,43 dB, -11,43 dB ve -15,24 dB'dir. 2400 MHz'e kadar, tüm AAH kaplama malzemelerinin iletim değeri de -20 dB'e erişemediğinden bluetooth ve wi-fi kaynaklı cihazlar tarafından üretilen dalgaları engellemede yetersizdir. 5000 MHz frekansta BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8'in EMF iletim ölçüleri sırasıyla -18,62 dB, -25,98 dB, -25,53 dB ve -25,92 dB 'dir. 5000 MHz frekansta BÇD2, BÇD4 ve BÇD8 kaplamalarının iletim değerleri -20 dB'den fazla olduğu için wi-fi kaynaklı cihazlar tarafından üretilen dalgaları zayıflatmada başarılı oldukları görülmüştür.

Şekil 4.43'e göre, beyaz tûf esaslı çelik lifli AAH kaplama malzemelerinde tüm frekanslarda yüksek yansıma değerleri elde edilmiştir. Ancak yansıma detektöründen alınan ölçümlere göre, AAH'lerde manyetit oranındaki artışın yani kaplama malzemesindeki iletkenlik artışının EMF dalgalarını yansıtma davranışını 3300 MHz'e kadar çok fazla etkilemediği yani yansıma davranışının malzemenin manyetit oranındaki artış ile doğrudan ilgili olmadığı belirlenmiştir. Ancak 3300 MHz'den sonra manyetit oranındaki değişimin yansıtma ölçüsündeki değişkenliği belirgin

şekilde etkilediği görülmüştür. Çelik lifin boyutlarından dolayı bu AAH’lerde sistemin yansımaya ve absorbsiyon davranışını kontrol ettiği de söylenebilir.



Şekil 4.43. Beyaz tûf esaslı ve çelik lifle takviye edilmiş kaplamaların elektromanyetik dalga yansımaya özellikleri.

Şekil 4.43’de verildiği gibi 2700 MHz’de oluşan 13 dB değerindeki enerji azalmasının sebebi, Şekil 4.42’de verildiği gibi tümü yansıtma olarak kaplama malzemesinden saçılarak yansıma detektörü tarafından tutulmasıdır. 2500 MHz’den sonraki iletim değerlerindeki 30 dB’ye kadar değişen enerji azalmasının yaklaşık %50’sinin yansıma diğer kısmının absorbsiyon olduğu söylenebilir. Beyaz tûflü AAH’de çelik lif ve manyetit malzemenin elektrik iletkenliğini artırmasından dolayı kaplama malzemesinin yansıtma özelliğinin gelişmesine sebep olmuştur.

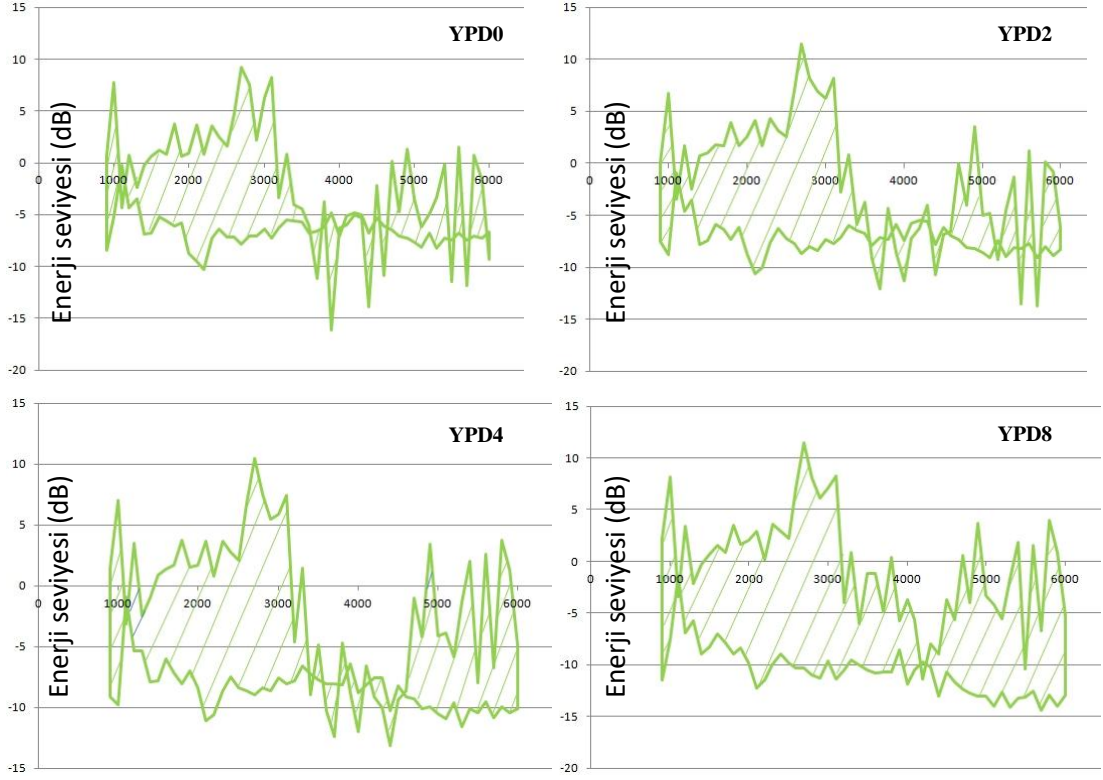
900 MHz’lik frekans kapsamında BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8 gruplarının dalga yansıma değerleri sırasıyla 1,74 dB, 2,66 dB, 3,57 dB ve 2,97 dB ‘dir. 1800 MHz’lik frekans kapsamında yansıma değerleri sırasıyla 5,08 dB, 5,12 dB, 3,52 dB ve 4,10 dB’dir. 2400 MHz’lik frekans kapsamında ise yansıma değerleri sırasıyla 5,20 dB, 5,85 dB, 4,29 dB ve 5,65 dB olarak ölçülmüştür. 5000 MHz’lik frekans kapsamında BÇD0, BÇD2, BÇD4 ve BÇD8 gruplarının dalga yansıma değerleri sırasıyla 2,70 dB, 1,02 dB, 7,95 dB ve 5,84 dB olarak ölçülmüştür. En yüksek miktarda dalgayı yansıtan BÇD2, yansımayı, manyetit bulundurmeyen BÇD0’a kıyasla -1,68 dB yükseltmiştir. Ayrıca Şekil 4.44’de gösterildiği gibi kaplama malzemelerinin

renklerinin manyetit etkisiyle koyulaştığı net bir şekilde görülmektedir. Beyaz tüf esaslı çelik lifli AAH’lerde karbonatlaşma etkisi oldukça diğerlerine göre daha düşük oranda görülmüştür. Manyetit oranındaki artışla birlikte karbonatlaşma da artmıştır.

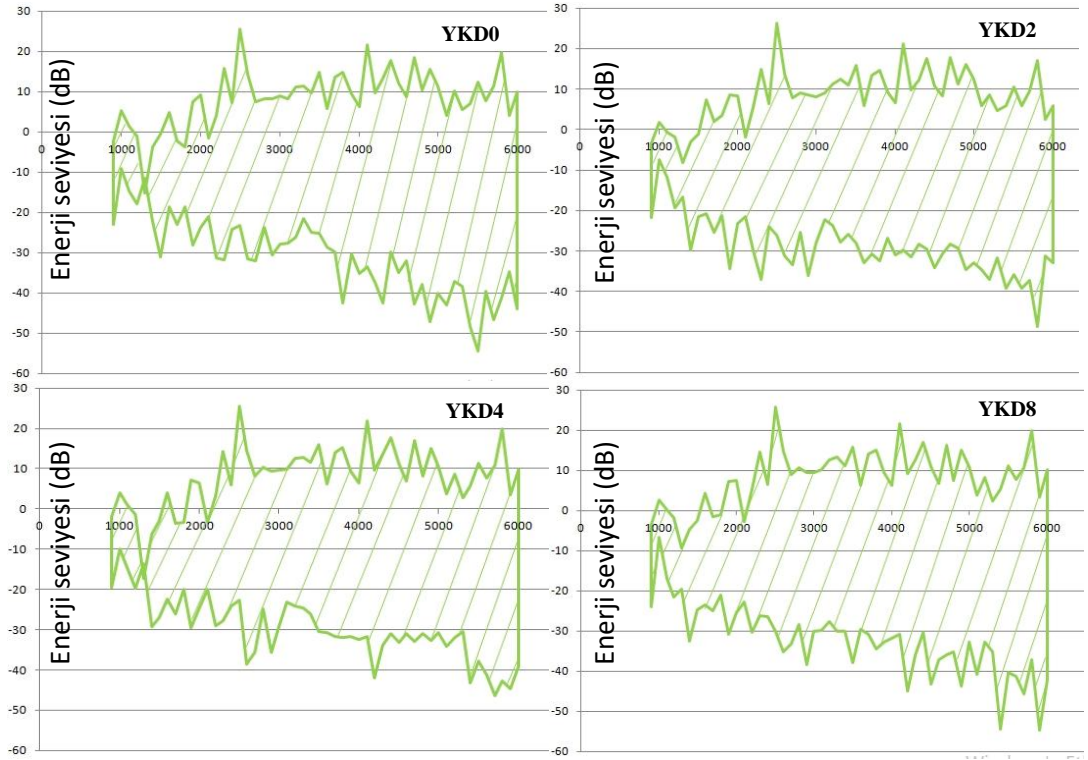


Şekil 4.44. Beyaz tüf esaslı ve çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplama malzemelerinin 90 gün yaşındaki görüntüleri.

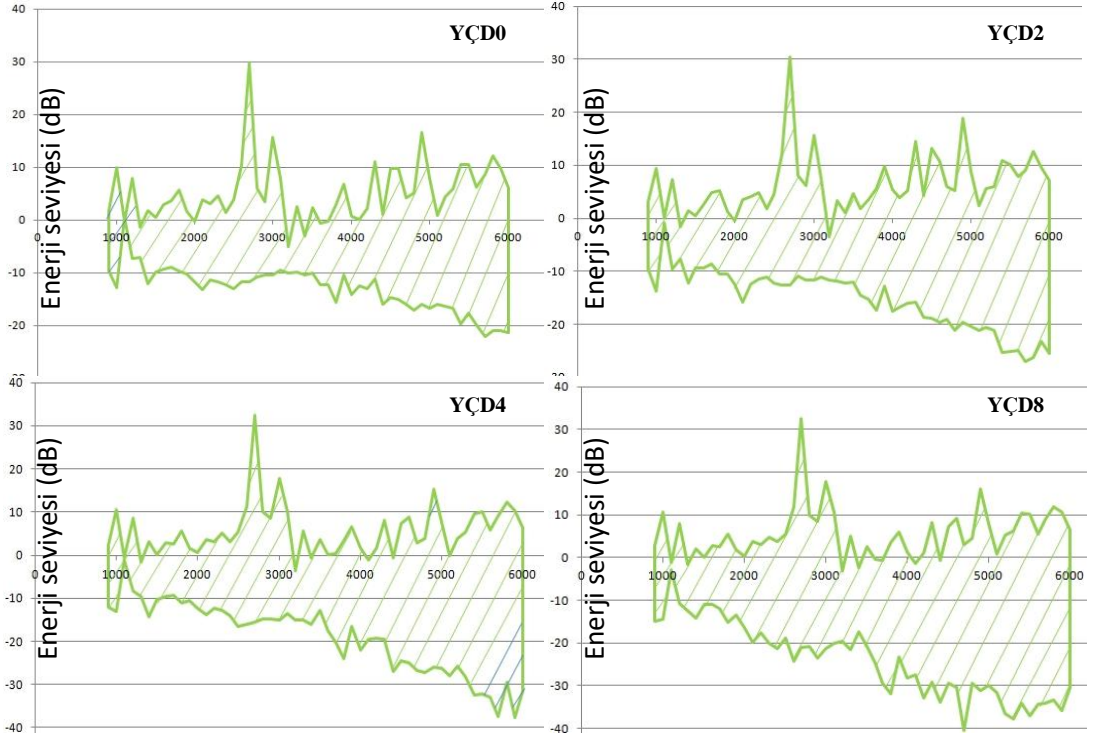
Manyetitin elektromanyetik etkileşime olan etkisinin daha net hesaplanabilmesi amacıyla alan grafikleri iletim ve yansıma değerleri her bir AAH kaplama malzemesi için bir grafikte çizilmiş ve iletim çizgileri ile yansıma ölçümleri çizgileri arasında kalan alanlar belirtilmiştir. Şekil 4.45 - Şekil 4.47, yeşil tüf esaslı AAH kaplama malzemelerine ilişkin iletim ve yansıma ölçümleri çizgilerinin oluşturduğu alanları, Şekil 4.48 – Şekil 4.50 ise beyaz tüf esaslı AAH kaplama malzemelerine ilişkin iletim ve yansıma ölçümleri çizgilerinin oluşturduğu alanları göstermektedir. Şekillerde gösterilmiş alanlar, Cross Alan Metoduyla hesaplanarak elde edilen sayısal veriler Şekil 4.51’deki histogram grafiğine dönüştürülmüştür. Burada temel amaç her bir AAH kaplama malzemesinin toplam enerji kalkanlama miktarını belirlemektir. Şekillerde de görüldüğü gibi bazı kaplama malzemelerinde bazı frekans değerlerinde yansıma ölçümleri negatif değerlere düşerken, iletim değerleri yansıma değerlerinin üstünde gözlenmiştir. Bu alanlarda iletim oluştuğu ve malzemenin bu frekans değerlerinde EMF dalgalarını iyi ilettiği ve malzemenin ilgili frekanslarda iletken yapıya dönüştüğü söylenebilir. Tarama yapılan alanlar ise absorpsiyon ve yansımanın toplam enerji miktarını yansıtmaktadır.



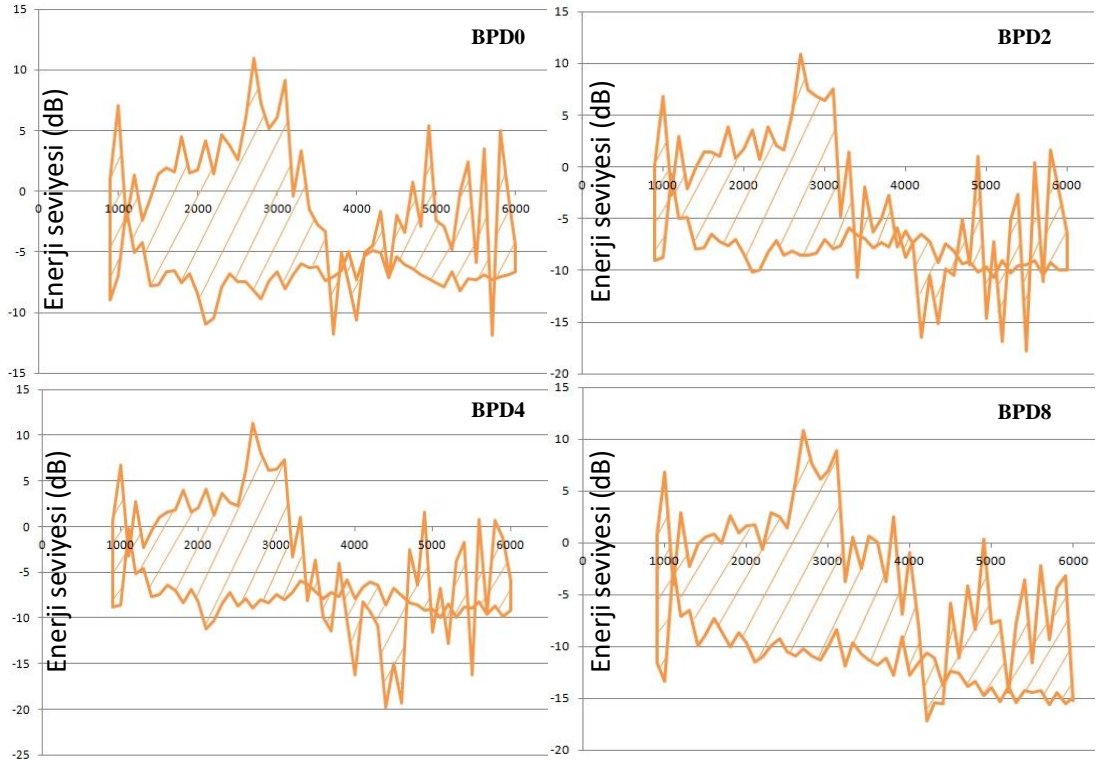
Şekil 4.45. Yeşil tüf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar.



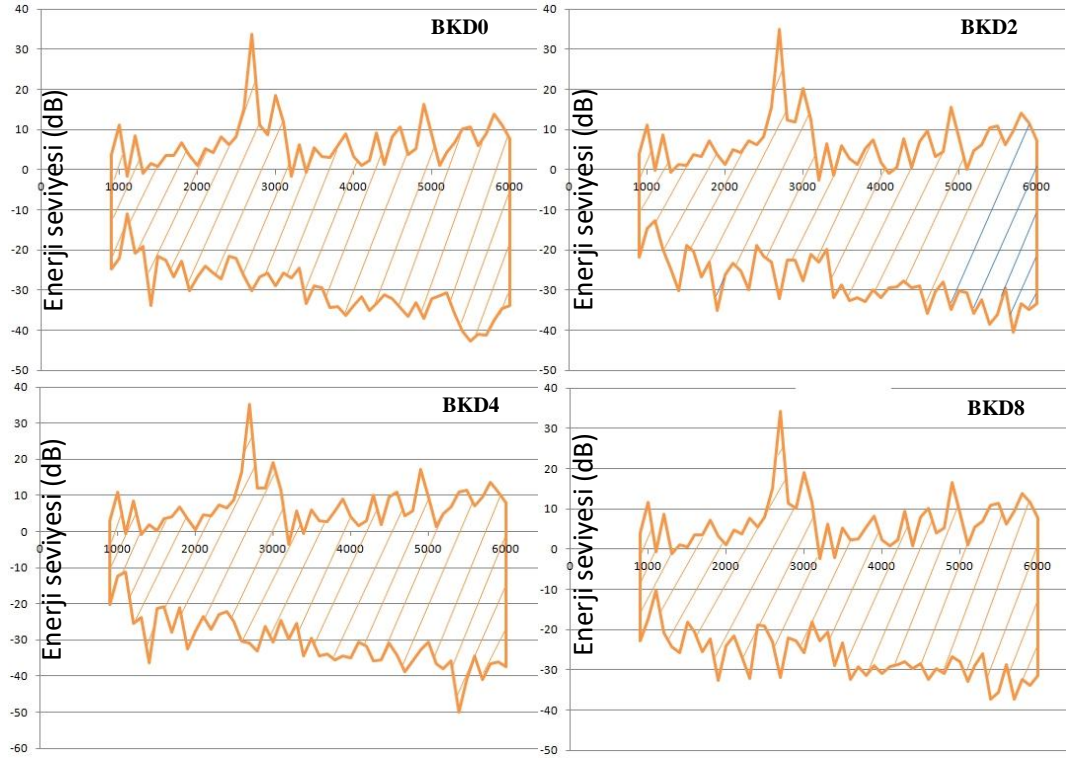
Şekil 4.46. Yeşil tüf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar.



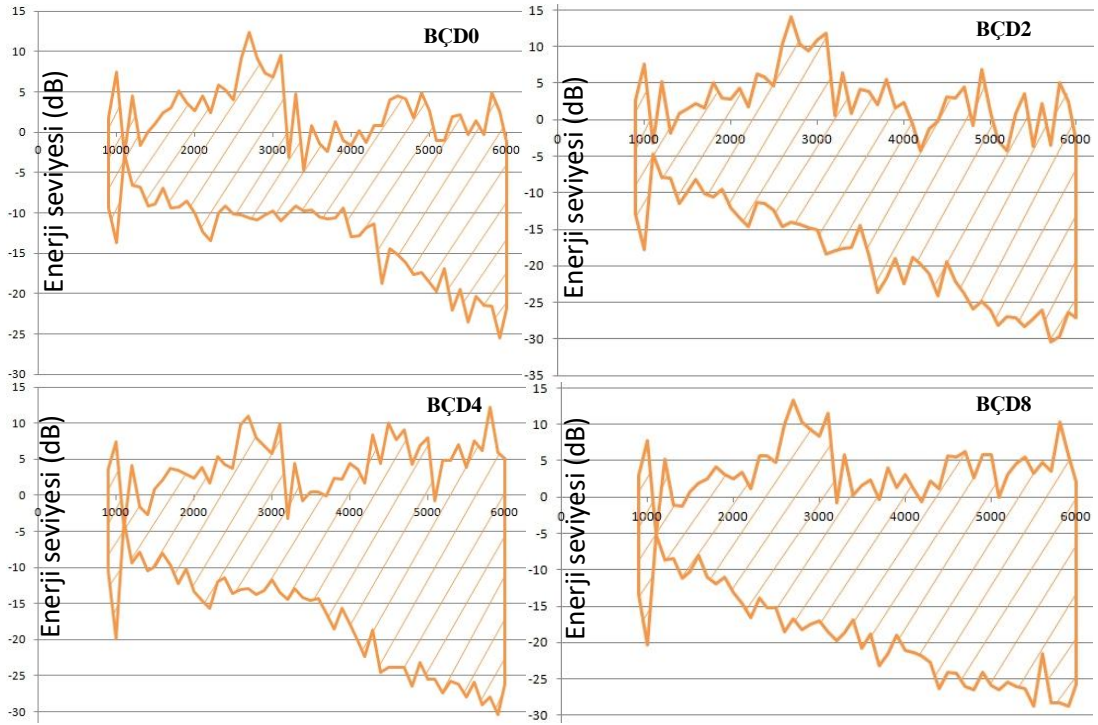
Şekil 4.47. Yeşil tuf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansımaya ve iletim değerleri arasında kalan alanlar.



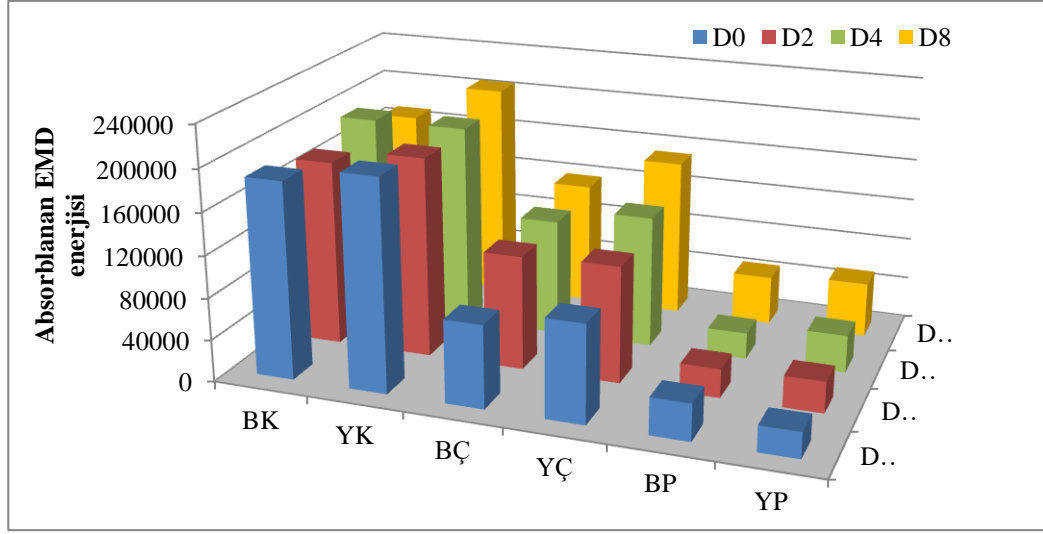
Şekil 4.48. Beyaz tuf esaslı PP lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansımaya ve iletim değerleri arasında kalan alanlar.



Şekil 4.49. Beyaz tuf esaslı karbon lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar.



Şekil 4.50. Beyaz tuf esaslı çelik lifle güçlendirilmiş AAH kaplamalarda elektromanyetik yansıma ve iletim değerleri arasında kalan alanlar.



Şekil 4.51. Hesaplama sonucu tüm gruplarda absorbe edilen EMD enerjisi.

Şekil 4.51’de verilen grafiğe göre yapılan değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır;

Yeşil tüf içerikli ve polipropilen lifli gruplarda karışımdaki manyetit oranı arttıkça alanın büyüdüğü, elektromanyetik etkileşimin arttığı gözlenmektedir. Manyetitin manyetik geçirgenliği ve dielektrik katsayısıyla ilgili olan bu durum, elektromanyetik dalgaların daha çok tutulduğunu (absorblama) göstermektedir. Manyetit, elektromanyetik alan çizgilerini sıklaştırmış, dipol yoğunluğunu artırmıştır. Beyaz tüfle üretilen gruplarda ise manyetit ikamesiyle Cross alanın arasında korelasyon ilişkisi kurulamamıştır. BPD0 ile BPD8’in, BPD2 ile BPD4’ün yaklaşık olarak aynı alana sahip olduğu görülmektedir. Beyaz tüfün kimyasal yapısının yeşil tüften farklı oluşuyla, manyetitin sistemdeki etkisinin baskılandığı anlaşılmaktadır. Ayrıca, manyetitsiz kaplamalar haricinde aynı manyetit ikame oranları doğrultusunda; YP gruplarında etkileşimin arttığı, dalgaların daha fazla absorblandığı görülmektedir.

Yeşil tüf içerikli ve çelik lifli gruplarda manyetit oranı arttıkça alanın büyüdüğü, beyaz tüflü, aynı oranda manyetit ikameli gruplarla karşılaştırıldıklarında ise yine daha fazla alana sahip oldukları görülmektedir. Manyetitin manyetik özellikleri, karışımdaki oranı arttıkça etkisini göstererek bu özelliklerin elektromanyetik etkileşimi yükselttiği gözlemlenmektedir. Manyetik geçirgenliğin ve dipol yoğunluğunun artmasının absorpsiyon davranışını etkilediği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, çelik lifli kaplamaların Cross alanının polipropilen (PP) lifli olanlardan

ciddi ölçüde fazla olduğu grafiğe yansımıştır. Çelik lifin iletkenliği yüksek bir madde olduğu için iletimi artırdığı, alanı büyütürük elektromanyetik alan (EMF) ile kompozit kaplama arasındaki etkileşimi tetiklediği gözlenmektedir.

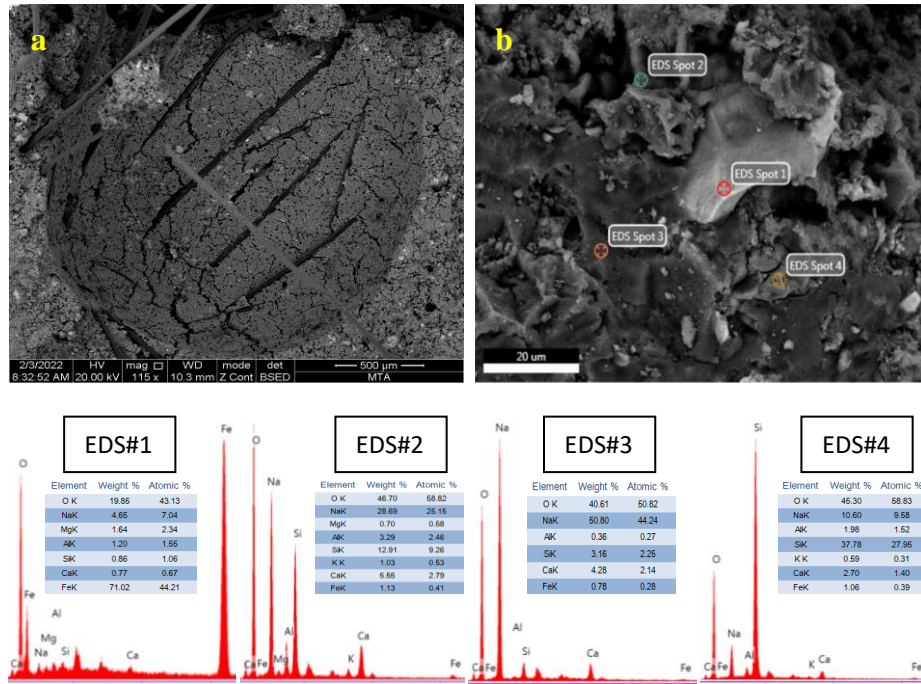
Yeşil ve beyaz tuf içerikli, karbon lifli gruplarda karışımındaki manyetit oranı arttıkça alanlarda belli bir korele ilişkiye rastlanmamaktadır. Yeşil tüflülerde D0-D8 ve D2-D4, beyaz tüflülerde ise D0-D4 ve D2-D8 neredeyse aynı alanlara sahiptir. Karbon lifin sistemdeki hakimiyetinin gözle görülür derecede olduğu anlaşılmaktadır. YK kaplamalarındaki alanlar, genel itibarıyla diğer lif tiplerindekine benzer biçimde BK kaplamalarından (aynı manyetit ikameli) yüksektir. Ayrıca, karbon lifli grupların sahip olduğu Cross alanlar, tüm gruplar arasında en yüksektir. Karbon lifin manyetik alan çizgilerini sıklaştırıp manyetik geçirgenliği artırarak absorpsiyon davranışını pozitif yönde ve en fazla şekilde etkilediği gözlemlenmektedir.

4.6. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM), ENERJİ DAĞILIMLI X-IŞINI SPEKTROSKOPİSİ (EDS) VE X-IŞINI DİFRAKSİYONU (XRD) ANALİZİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

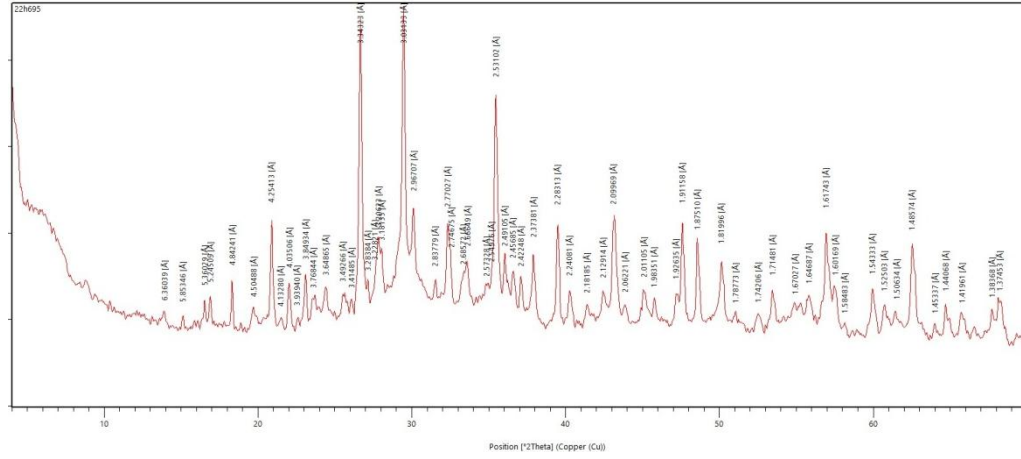
SEM görüntüleri verilen hamurların bazı noktalarından EDS alınmıştır. Mikro görüntüde uygulanan EDS analizleri örnek olması amacıyla sadece Şekil 4.52’de açıklanmıştır. XRD analizi verileri ise SEM görüntüleriyle art arda aktarılmıştır. Tuf cinsi aynı olan ve aynı oranda manyetit bulunduran gruplarda bir lif çeşidi seçilip görüntülerine yer verilmiştir. Tüm kompozitlerde en yüksek ve en düşük dayanımı sergileyen, ayrıca manyetitsiz ve en yüksek oranda manyetit içeren hamurların analizleri değerlendirilmiştir. Belirleyici mekanik ve fiziksel özellikler de mikroyapısal analizlerle ilişkilendirilmiştir. Başlangıçta yeşil tuf ile, ikinci aşamada ise beyaz tuf ile üretilen belirlenmiş grupların mikroyapısal analizlerine yer verilmiştir.

Hacimce %8 manyetit içerikli YPD8 kompozit hamuru, YT ile üretilen gruplar arasında geç dayanımı en düşük olandır ve büzülme değeri %0,7’dir. Şekil 4.52-a’da genel itibarıyla yoğun şekilde kılcal çatlaklarla birlikte yaklaşık olarak aynı boyuttaki mikro boşluklara rastlanılmıştır. Çatlakların bu boşluklar üzerinden geliştiği

görülmektedir. Ayrıca, daha büyük boyutta olanları da göze çarpmakta, söz konusu çatlakların gelişimlerinin şekildeki PP liflerce engellendiği gözlemlenmiştir. Bazı bölgelerde muhtelif boyutlarda kapiler gözenekler de gözlenmiştir. Görüntüden anlaşılacağı üzere, bazı PP liflerin sıyrıldığı ve bu sıyrılmış boşlukların SEM analizinde görsele yansıdığı tanımlanmıştır. Öte yandan, matriste yoğun biçimde çeşitli mikro boyutlardaki parlak haldeki manyetit kristalleri görünmekte, bu kristallerin çoğunluğunun kübik, ters spinel yapısını koruduğu, reaksiyonlara dahil olmadığı anlaşılmaktadır. Ç/T oranının yüksek olmasının yanı sıra etüv esnası ve sonrası büzülme oranının yüksek olması, çatlak ve boşluk miktarı yoğunluğunu destekler niteliktedir.



Şekil 4.52. YPD8 nolu alkali-aktive edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.



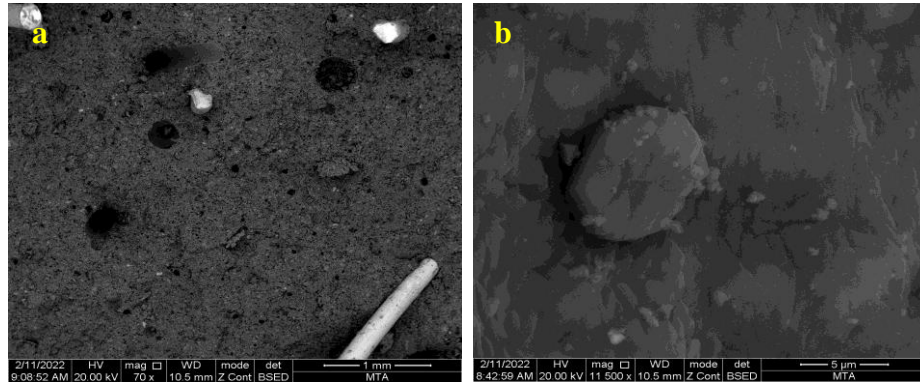
Şekil 4.53. YPD8 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.

Şekil 4.52-a'nın 25 kat kadar büyütülmesiyle elde edilen Şekil 4.52-b üzerinde farklı noktalara EDS analizi uygulanmıştır. Elementel analizlere göre; EDS Spot 1, iki farklı yükseltgenme basamağına sahip demir iyonu içeren rijit görünümlü manyetit bileşenini, EDS Spot 2, alümina-silikatlı, sodyum ve kalsiyum içerikli (içinde Ca bulunduran NASH) jeopolimer yapıyı, EDS Spot 3, görüntüde yoğun olarak görülen, Al eksikliğinden dolayı jeopolimer yapının oluşmasını engelleyen, aynı zamanda volkanik tüfle aktivatörün bağ yapmadığını gösteren zayıf Na-O bağlı amorf fazlı yapıyı, EDS Spot 4 ise dayanım gelişiminde görevli Na-Si-O bağ yapısına sahip fazı göstermektedir.

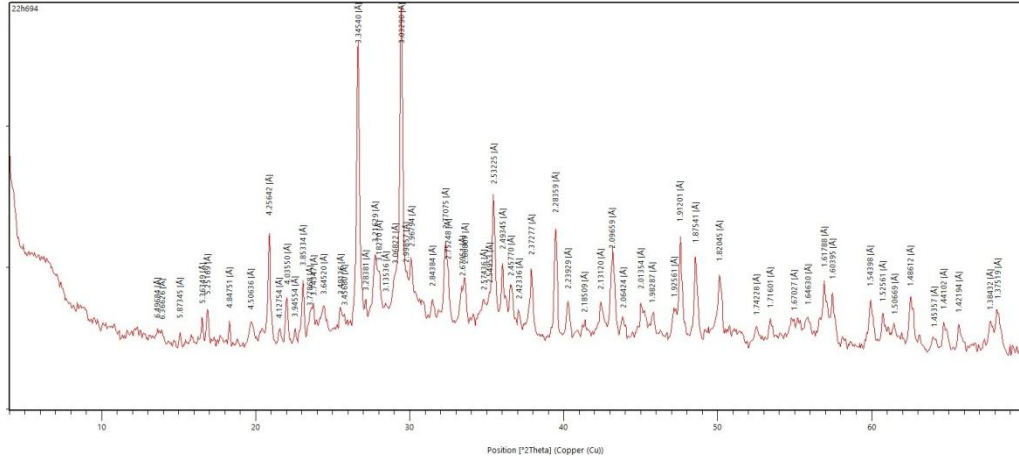
Şekil 4.53'de verilen XRD analizinden elde edilen sonuçlara göre 90 günlük YPD8 hamurunda; natron ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), alkali feldispat, natrit (Na_2CO_3), korundum (Al_2O_3), kalsit, kuvars, manyetit, termonatrit ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$) ve plajiyoklas ($(\text{Na,Ca})[(\text{Si,Al})\text{AlSi}_2]\text{O}_8$) minerolojik yapılarına rastlanılmıştır. Çeşitli kimyasal formüllere sahip sodyum karbonatın sistemdeki yoğunluğu, sodyumun çözünmediği anlamına gelmektedir. Söz konusu bileşen diğer hamur yapılarında da tespit edilmiştir. Bu durum, dayanımın düşük olmasına neden olan ana etmenlerdendir. Diğer yandan, piklerin tanımladığı yapılarla SEM analizi sonucu tespit edilen bileşenlerin birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.

nedeni olarak karışım süresinin yetersizliği söylenebilir. Bunun sonucunda, Al reaksiyonlarda yer alamazken gerekli jeopolimer ürünler oluşmamaktadır. Dolayısıyla dayanım gelişiminde etkin rol oynayan bir parametredir. Ayrıca, şekilde yine çözünmeyen ve reaksiyona katılmamış kalsit kristali gözlemlenmiştir. Homojen dağılmasında karışım tekniği ve süresi önem arz etmektedir. Topaklaşma riski de oluşturabilen bu bileşen CSH ya da CASH ürünlerinin oluşumunda etkin olamamıştır. Öte yandan, amorf fazlı, içinde sodyum bulunduran CASH ürünü Al-O yapısı etrafında konumlanmıştır. Görüntüde daha küçük boyutlardaki kristal yapılı, Na-Si-O bağ oluşumları gözlenmiştir. Matriste karbon lifin de görsele yansıdığı belirlenmiştir.

Şekil 4.55’de verilen XRD analizinden elde edilen verilere göre 90 günlük YKD0 hamurunda; dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$, mika grubu mineral, kalsit, kuvars, termonatrit, plajiyoklas, zeolit grubu mineral (analsim), piroluzit (MnO_2 -manyetit kaynaklı), alkali feldispat, natron ve korundum minerolojik yapılarına rastlanılmıştır. Bu yapılarla SEM analizi sonucu tespit edilen bileşenlerin birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.56. YCD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.

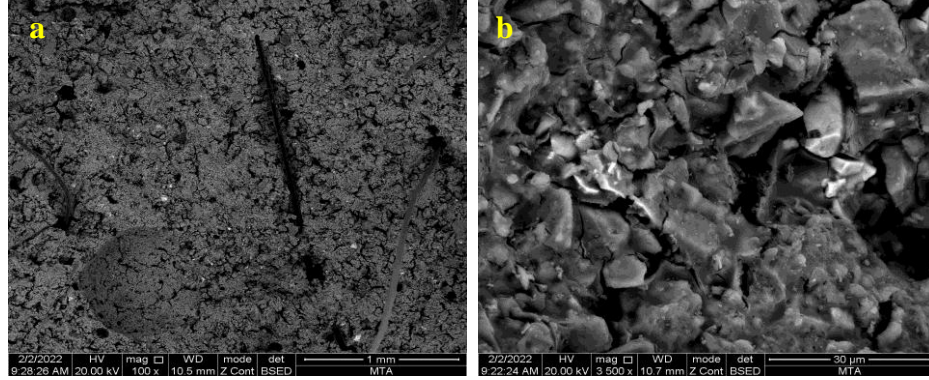


Şekil 4.57. YÇD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.

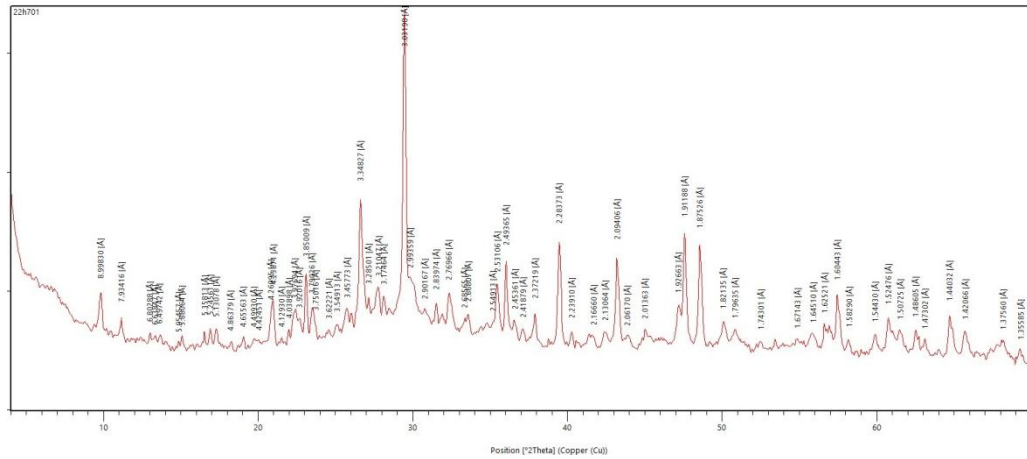
%4 manyetit içerikli YÇD4 kompozit hamuru, 90 günlük büzülme değeri yaklaşık %0,2 olan ve diğerlerine kıyasla en yüksek geç dayanımı verendir. Şekil 4.56-a'da belirgin biçimde çelik lifler görülmektedir. Görüntünün incelenmesiyle çelik liflerin sıyrıldığı ve bu sıyrılmış boşlukların SEM analizinde görsele yansıdığı anlaşılmıştır. Bunun yanı sıra, matriste çeşitli muhtelif boyutlarda yoğun biçimde kapiler gözeneklerin bulunduğu tanımlanmıştır. Ayrıca, belirli noktalarda fazladan çözelti oluşunun göstergesi olan ay çukuru şeklindeki sıkışmış hava boşlukları ve bu boşlukların içinde çeşitli kristalize yapıların mevcut olduğu gözlenmiştir. Söz konusu makro görüntüde noktasal boyutlardaki parlak görünümlü manyetit parçacıklarının bölgede eşit olarak dağıldığı görülmektedir.

Şekil 4.56-a'nın 200 kat kadar büyütülmesiyle elde edilen Şekil 4.56-b, sıkışmış bir hava boşluğu içerisindeki düzgün amorf fazı göstermektedir. Bu bölgedeki farklı noktalar üzerine EDS analizi uygulanmıştır. Elementel analizlere göre; zeminin üst tarafında yer alan yaklaşık 7-8 µm boyutundaki parçacık, alkali aktivasyon sonucunda meydana gelen, yapının dayanım kazanmasında ve polimerleşmesinde etkin rol oynayan bileşenlerden biri olan NASH jelidir. Düşük Ca'lu sistemlerin alkali aktivasyonu sonucu oluşur. Arka planda yer alan neredeyse pürüzsüz bir tabaka görünümlü yapı ise Ca'un reaksiyonlara katılmasıyla ortaya çıkan CASH jelidir. Alkali aktive tepkimeleriyle doğrudan oluşacağı gibi, CSH'nin dönüşümüyle (Al^{+3} 'ün varlığının Si-O-Al bağlarını meydana getirmesiyle) de ortaya çıkabilmektedir.

Şekil 4.57’de verilen XRD analizi sonuçlarına göre 90 günlük YÇD4 hamurunda; kalsit, kuvars, manyetit, termonatrit, plajiyoklaz, alkali feldspat, korundum, mika grubu mineral ve natron mineralojik gruplarına rastlanılmıştır. Bu yapılarla SEM analizi sonucu tespit edilen bileşenlerin birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.58. BPD2 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.



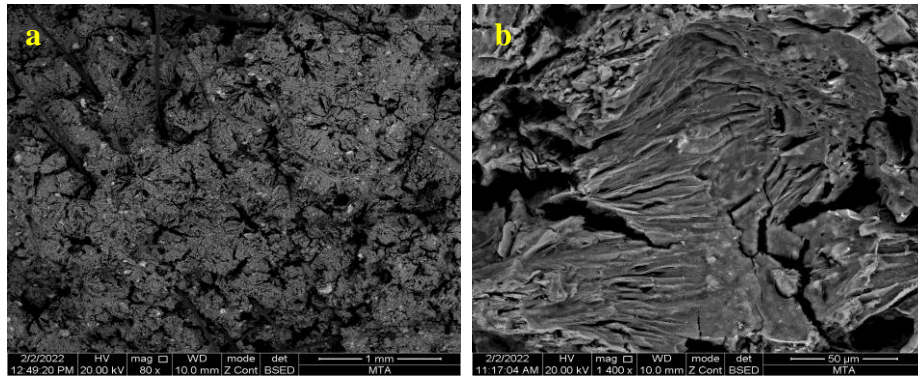
Şekil 4.59. BPD2 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.

Beyaz Tüf kullanıldığında, manyetit ikame oranı %2 ve beyaz tüf/pp lifli hamurlar arasında en yüksek geç dayanıma sahip olan BPD2’nin makro görüntüsü Şekil 4.58-a’da verilmiştir. Görüntüde çeşitli boyutlara sahip yoğun kapiler gözenekler görülmekle beraber çoğunlukla bu boşlukların arasında gelişen yoğun kısa boylu çatlaklar göze çarpmaktadır. Bu durum, hamurun termal rötre ile fazla miktarda çözelti kaybetmesiyle ve 90 günlük süreçte reaksiyon ürünleri oluşmaya devam etse bile bu bileşenlerin boşlukları yeteri kadar dolduramamasıyla açıklanmaktadır. Nitekim, büzülmenin etüv sonrası yaklaşık %0,7, 90 gün sonunda ise yaklaşık %1

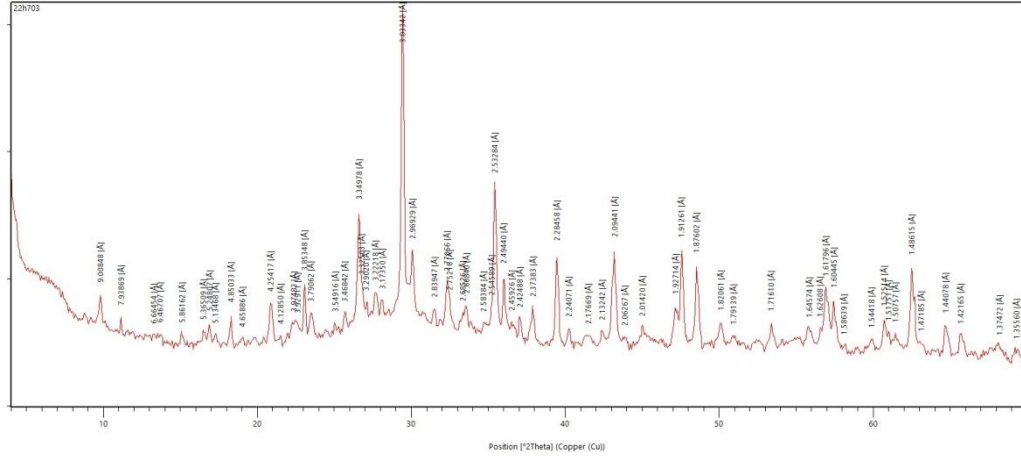
oranında olması, yorumu destekler niteliktedir. Bununla birlikte, matriste belirli bölgelerde fazla çözelti oluşunun sebebi olarak ay çukuruna benzer büyük ve küçük boyutlarda sıkışmış hava boşlukları gözlenmiştir. Şekilde PP liflere de rastlanılmaktadır. Yatay şekilde yer alan PP lifin etrafında matris bütünlüğünü engelleyen ayrılmış bir yapı oluşmuştur. Ayrıca, bazı liflerin sıyrılması itibarıyla meydana gelen boşluklar görsele yansımıştır. Homojen olarak dağılan farklı boyutlardaki manyetit taneciklerinin de amorf ya da rijit görünümünün yanı sıra %8 ikameli hamurların makro görüntülerindekinden daha az oldukları görülmüştür.

Şekil 4.58-b, a'nın yaklaşık olarak 33 kat kadar büyütülmüş hali olup görüntüdeki farklı noktalar üzerinde EDS analizleri gerçekleştirilmiştir. Elementel analizlere göre; matriste Ca ve Na içeren alümina-silikatlı sisteme demirin de dahil olduğu, amorf faza tamamıyla geçmemiş yapılar görülmektedir. Karışım sonrası hidrate olmamış, etrafında az oranda Na-Si bağı içerikli kalsit taneciği de görüntüde belirlenmiştir. Bu durumun tersi olarak, kalsiyumun reaksiyonlarda yer almasıyla oluşan Na içerikli CASH yapısına alt kısımlarda yoğun olarak rastlanmıştır. Bu, bazı kısımlarda meydana gelen jeopolimer yapıyı açıklamaktadır. Ayrıca, aynı yapının içinde potasyum veya demir bulunan bileşenler de analizlerde tespit edilmiştir.

Şekil 4.59'da verilen XRD analizinden elde edilen sonuçlara göre 90 günlük BPD2 hamurunda; kalsit, kuvars, manyetit, termonatrit, zeolit grubu mineral (hoylandit, klinoptilolit), alkali feldspat ve plajiyoklaz mineralojik yapılarına rastlanılmıştır. Bu yapılarla SEM analizi sonucu tespit edilen bileşenlerin birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.60. BPD8 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.



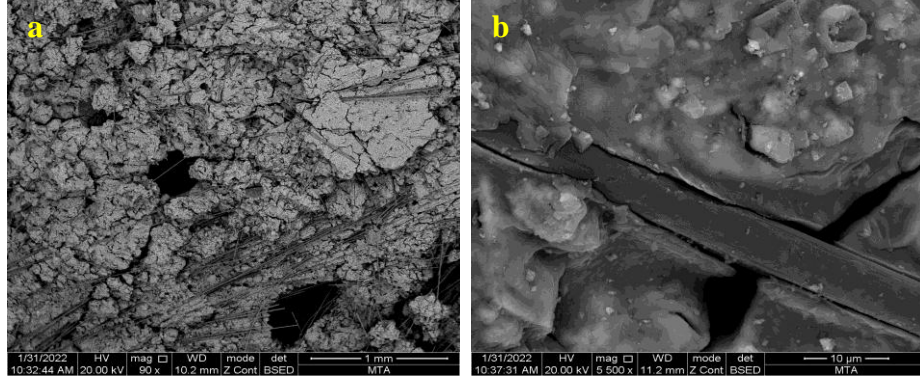
Şekil 4.61. BPD8 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.

BPD8 kompozit hamuru, beyaz tüfle üretilmiş gruplar arasında en düşük geç dayanıma ve dayanım gelişimine sahiptir ve bir bölgesinden alınan makro görüntü Şekil 4.60-a'da verilmiştir. Görüntüde yoğun biçimde çiçeksi haldeki boşluk yapısına sahip oluşumlar gözlemlenmiştir. Bu boşluklara sistemdeki fazla miktarda mevcut olan demirin beyaz tuf ile olan etkileşiminin neden olduğu düşünülmektedir. Bunlar matrisin ayrışmasına neden olmuş, kompaktlığı önlemiştir. Yer yer kapiler gözeneklerle birlikte liflerin sıyrılmasıyla ortaya çıkan boşluklar da görselde yer almaktadır. Öte yandan, yoğun biçimde yer alan muhtelif boyutlardaki manyetit kristal parçacıkları görüntüye yansımıştır.

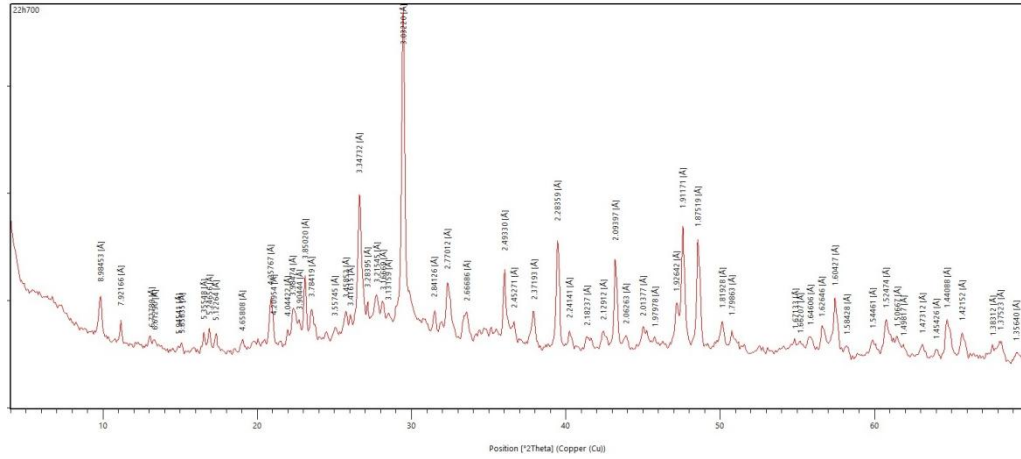
Üzerindeki belirli noktalardan EDS analizi yapılan Şekil 4.60-b, a'nın 20 kat kadar büyütülmüş halidir. Elementel analizlere göre; görüntüdeki yapraksı yapı, dayanım kazanımda rol oynayan, alümina-silikatlı, içinde Na ve Ca bulunduran (Na içerikli CASH) jeopolimer ürününü göstermektedir. Bu gibi yapıların matristeki fazlalığı polimerleşmeye katkı sağlayarak suya karşı direnci de oluşturmaktadır. Bunun yanı sıra, şekilde bu jel kısımına bağdaşmış bir biçimde bulunan rijit yapıdaki manyetit kristaline rastlanmıştır.

Şekil 4.61'de verilen XRD analizi verilerine göre 90 günlük BPD8 hamurunda; kalsit, kuvars, manyetit, termonatrit, zeolit grubu mineral (hoilandit, klinoptilolit), plajiyoklaz, alkali feldspat ve korundum mineralojik yapılarına rastlanılmıştır. Bu

yapılarla SEM analizi sonucu tespit edilen bileşenlerin birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.62. BKD0 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.

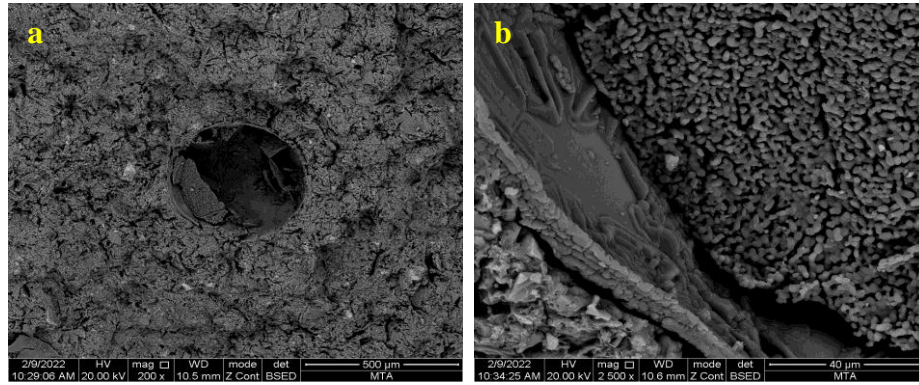


Şekil 4.63. BK-D0 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.

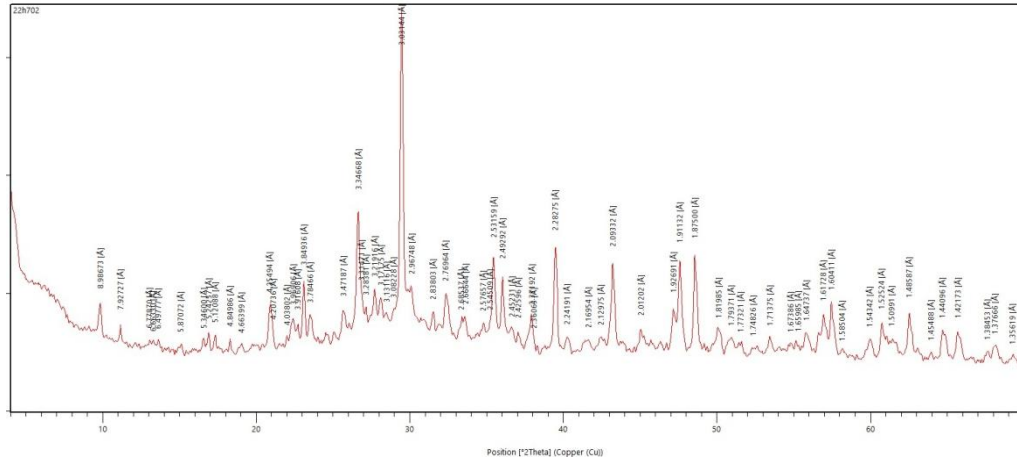
Şekil 4.62-a, manyetitsiz/beyaz tüflü üretimler dahilinde en düşük en düşük geç dayanımı veren BKD0 sertleşmiş hamurundan alınan bir makro görüntüyü sergilemektedir. Matris bütünüyle parçalı ve ayrılmış bir görünüm halinde olup buna yüksek orandaki büzülmenin ve karbon liflerin bazı kısımlardaki sık dizilişinin neden olduğu söylenebilmektedir. Öte yandan, geniş ve derin boşluklarla birlikte yoğun çatlaklar da gözlemlenmiştir. Beyaz tüflü/karbon lifli hamurlar arasında etüv sonrası (yaklaşık %0,4) ve 90 günlük süreç sonucunda (yaklaşık %0,7) en fazla büzülmeye bu grupta rastlanılmıştır. Bu durum ise anlatılanları desteklemektedir.

Şekil 4.62-a'nın 100 kat kadar büyütülmesiyle elde edilen Şekil 4.62-b üzerinde çeşitli noktalarda EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Elementel analizlere göre; matraste görülen düzgün amorf fazlı yapıda yoğun biçimde CASH jeopolimer yapıları görülmektedir. Fakat CASH yapılarında Ca atomik oranının düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, matraste yer alan kalsit taneciklerinin tamamıyla çözünme-yişinden kaynaklanmaktadır. Buna rağmen düzgün yapıdaki bu alkali aktivasyon ürünleri oluşmuştur. Şekilde görülen karbon lifin etrafını saran faz genel itibarıyla bu jellerdir. Yapısındaki Si/Al oranları değişkenlik göstermektedir. Daha küçük boyuttaki pamuksu NASH jelleri ise çeşitli noktalarda gözlemlenmiştir. Ayrıca, matraste karbon lifin altında yer alan, CASH faz bütünlüğünü engelleyen bir mikro çatlak göze çarpmaktadır.

Şekil 4.63'de verilen XRD analizi sonuçlarına göre 90 günlük BKD0 hamurunda; kalsit, kuvars, termonatrit, piroluzit, zeolit grubu mineral (hoylandit, klinoptilolit), trona ($\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), plajiyoklaz, alkali feldspat, korundum ve natron mineralojik yapılarına rastlanılmıştır. Bu yapılarla SEM analizi sonucu tespit edilen bileşenlerin birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.64. BCD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun SEM-EDS analizi.



Şekil 4.65. BÇD4 nolu alkali-aktif edilmiş hamurun XRD analizi.

Şekil 4.64-a, %4 manyetit içerikli çelik lifli BÇD4 hamurunun bir noktasından alınan SEM görüntüsünü ifade etmektedir. İncelemelere göre, matriste genel olarak düzgün bir yüzey görülmemekle birlikte yoğun şekilde kapiler gözenekler bulunmaktadır. Gözeneklerin ve mikro çatlakların fazla oluşu, giderek artan büzülme değeriyle ilişkilendirilebilmektedir. Çelik liflerin yer almadığı görselde parlak manyetit kristalleri homojen olarak dağılmış şekilde görülmektedir. Orta kısımda yer alan büyük boyuttaki sıkışmış hava boşluğunun içinde plaka yapılarına rastlanmıştır.

Üzerindeki belirli noktalardan EDS analizi yapılan Şekil 4.64-b, a'nın 12,5 kat kadar büyütülmüş halidir. Elementel analizlere göre; görüntünün sağ kısmında bulunan süngerimsi yapı sodyum karbonattır (NaCO_3). Bu yapı sodyumun sistemde çözünmediği anlamına gelmektedir. Buradan üretim sırasındaki karışım süresinin yeterli gelmediği anlaşılmıştır. Dolayısıyla çözünmeyen Na, gerekli jeopolimer yapı oluşumunun önüne geçmiştir. Görüntüde bünyesinde bir miktar Si bulunduran NaCO_3 bileşenleri de bulunmaktadır. Söz konusu yapılar, plakalardakilerle benzer görünüm sergilemektedir. Öte yandan, şekilde çözünmemiş kalsit (kireç taşı) kristalinin etrafında Na-Si bağlı fazlar görülmektedir. Boşluk duvarındaki düzgün amorf faz, Na içerikli CASH yapılarını tanımlamaktadır. Diğer bazı noktalarda da CASH'a rastlanmıştır.

Şekil 4.65'de verilen XRD analizinden elde edilen verilere göre 90 günlük BÇD4 hamurunda; kalsit, kuvars, manyetit, termonatrit, zeolit grubu mineral (hoylandit, klinoptilolit), plajiyoklaz, natrit, alkali feldspat, dolomit, korundum ve natron

mineralojik yapılarına rastlanmaktadır. Bu yapılarla SEM analizi sonucu tespit edilen bileşenlerin birbirini desteklediği anlaşılmaktadır.

BÖLÜM 5

SONUÇ

Bu çalışmada, silika ve alümina kaynağı olarak Türkiye'nin Bayburt bölgesinden temin edilen yeşil ve beyaz volkanik tüfler, alkali aktive edilmiş kompozit hamurların üretiminde kullanılmıştır. Karışımda kalsitten kalsiyum, alüminyum oksitten alümina kaynağı olarak yararlanılmıştır. Sodyum Hidroksit (NaOH) ve Sodyum Silikat (Na_2SiO_3), kullanılan alkali aktivatörlerdir. Elektromanyetik özelliği iyileştirmek amacıyla manyetit (ferro-ferrik oksit), hacimce %2, %4 ve %8 oranında karışıma ikame edilmiştir. Ayrıca, farklı hacim sürtünme yüzdeli üç tip lif (polipropilen, karbon ve çelik), üretilen alkali aktifleştirilmiş malzemelerin mekanik, fiziksel ve elektromanyetik özelliklerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Kompozit hamurların mekanik ve fiziksel özellikleri, üretimin 2, 28 ve 90'ıncı gününde; kaplama malzemelerinin elektromanyetik iletim ve yansıma özellikleri ise üretimin 56 ve 90'ıncı günleri arasında, 900-6000 MHz aralığında test edilmiştir. Ayrıca, 90 günlük deneylerin ardından belirlenen numuneler üzerinde mikro yapısal analizler gerçekleştirilmiştir.

- Yeşil ve beyaz tüf ile üretilen alkali aktive hamurlarda manyetit oranı arttıkça yayılma miktarı artmış, priz süreleri azalmıştır.
- Beyaz tüf esaslı alkali aktive hamurlarda 90 günlük su emme deneyleri sadece bazı çelik lifli gruplarla, tüm karbon lifli gruplarda yapılabilmektedir. PP lifli AAH'lerde 90 günlük süreçte su direnci elde edilememiştir. Buna göre poroziteler en düşük BKD8'da %29,95 olarak, en yüksek BKD0'da %36,74 olarak ölçülmüştür. Yeşil tüf esaslı alkali aktive hamurlarda su direnci elde edilememiştir.

- Yeşil tuf esaslı alkali aktive hamurlarda 90 günlük eğilme dayanımı karbon lifte en fazla 20,2 MPa ile %2 manyetitli, PP lifte en fazla 9,1 MPa ile manyetitsiz, mikro çelik lifte en fazla 10,8 MPa ile %2 manyetitli numunelerde; 90 günlük basınç dayanımı ise karbon lifte en yüksek 26,1 MPa değeri ile %2 manyetitli, PP lifte en yüksek 19,1 MPa değeri ile %4 manyetitli, çelik lifte en yüksek 37,4 MPa değeri ile %4 manyetitli numunelerde elde edilmiştir.
- Beyaz tuf esaslı alkali aktive hamurlarda 90 günlük eğilme dayanımı karbon lifte en fazla 18,7 MPa ile %4 manyetitli, PP lifte en fazla 7,7 MPa ile manyetitsiz, mikro çelik lifte en fazla 9 MPa ile %8 manyetitli numunelerde; 90 günlük basınç dayanımı karbon lifte en yüksek 24,8 MPa değeri ile %2 manyetitli, PP lifte en yüksek 18 MPa değeri ile %2 manyetitli, çelik lifte en yüksek 22 MPa değeri ile manyetitsiz numunelerde elde edilmiştir.
- Yeşil tuf esaslı alkali aktive hamurlarda 90 günlük süreçte en fazla büzülme karbon lifte %0,4 ile manyetitsiz, PP lifte %1,1 ile manyetitsiz, mikro çelik lifte ise %0,6 ile manyetitsiz numunelerde elde edilmiştir.
- Beyaz tuf esaslı alkali aktive hamurlarda 90 günlük süreçte en fazla büzülme karbon lifte %0,7 ile manyetitsiz, PP lifte %1,3 ile manyetitsiz, mikro çelik lifte ise %1,1 ile manyetitsiz numunelerde elde edilmiştir.
- Yeşil tuf ile üretilen AAH'lerde 900, 1800, 2400 ve 5000 MHz frekansları için en yüksek elektromanyetik kalkanlama değerleri karbon lifte sırasıyla 24 dB, 21,18 dB, 26,44 dB ve 40,08 dB, mikro çelik lifte sırasıyla 15,05 dB, 15,18 dB, 21,38 dB ve 29,99 dB, PP lifte ise sırasıyla 11,52 dB, 8,92 dB, 8,98 dB ve 13,01 dB olmuştur. Bunun kaplama malzemesinden gerçekleşen yansıma miktarları karbon lifte sırasıyla -1,8 dB, 3,64 dB, 7,19 dB ve 12,41 dB, mikro çelik lifte sırasıyla 3,21 dB, 5,75 dB, 3,68 dB ve 8,79 dB, PP lifte ise sırasıyla 2,22 dB, 3,94 dB, 3,17 dB ve -3,33 dB olmuştur.
- Yeşil tuf ile üretilen kaplamalarda 900, 1800, 2400 ve 5000 MHz frekansları için en yüksek elektromanyetik kalkanlama değeri 40,08 dB ile YKD0'da (5000

MHz), en yüksek yansıma miktarı ise 12,41 dB ile YKD2’de (5000 MHz) ölçülmüştür.

- Beyaz tuf ile üretilen AAH’lerde 900, 1800, 2400 ve 5000 MHz frekansları için en yüksek elektromanyetik kalkanlama değerleri karbon lifte sırasıyla 24,65 dB, 22,93 dB, 22,06 dB ve 32,09 dB, mikro çelik lifte sırasıyla 13,49 dB, 12,24 dB, 15,24 dB ve 25,98 dB, PP lifte ise sırasıyla 11,58 dB, 10,06 dB, 9,28 dB ve 13,98 dB olmuştur. Bunun kaplama malzemesinden gerçekleşen yansıma miktarları karbon lifte sırasıyla 4,02 dB, 7,31 dB, 6,45 dB ve 9,53 dB, mikro çelik lifte sırasıyla 3,57 dB, 5,12 dB, 5,85 dB ve 7,95 dB, PP lifte ise sırasıyla 1,06 dB, 4,5 dB, 3,71 dB ve -2,4 dB olmuştur.
- Beyaz tuf ile üretilen kaplamalarda 900, 1800, 2400 ve 5000 MHz frekansları için en yüksek elektromanyetik kalkanlama değeri 32,09 dB ile BKD0’da (5000 MHz), en yüksek yansıma miktarı ise 9,53 dB ile BKD4’de (5000 MHz) ölçülmüştür.
- Elektromanyetik ölçümlerde 900 – 6000 MHz frekansları için en yüksek EMF kalkanlama ve yansımadan kaynaklı EMF kalkanlama değerleri sırasıyla 56 dB ve 35 dB olarak ölçülmüştür.
- Mikro yapısal analiz sonucunda, reaksiyon ürünü olan jeopolimer jel yapıları N-A-S-H, C-(N)-A-S-H, C-A-S-H, C-S-H ve karbonatlı bileşenler matriste gözlemlenmiştir. Ayrıca, özellikle manyetit içermeyen numunelerde yoğun biçimde mikro çatlak ve kapiler gözeneklere rastlanılmıştır. Bazı bölgelerde ise çözünmeyen Al ve Na yapıları görüntülerde tanımlanmıştır.
- Manyetiteli AAH’lerde dayanım artışına sebep olan mekanizmanın bir kısmının Fe iyonlarının jeopolimer matrisinin içine girerek yapıyı sağlamlaştırması ile açıklanmıştır. Bu yaklaşım mikro ve mineralojik analizlerde desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Eltundal, M. B., "Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül katkılı geopolimer betonların %5 sülfürik asit etkisinde mekanik davranışı", (2019).
2. M.C.G. Juenger, F. Winnefeld, J.L. Provis, J. H. I., "Advances in alternative cementitious binders", *Cement And Concrete Research*, 41 (12): 1232–1243 (2011).
3. Kantarcı, F., "Nano Silis, mikro silis ve polimer katkıların içeren volkanik tüf esaslı geopolimer beton üretimi ve özelliklerinin araştırılması", (2018).
4. Arslan, A. A., "Metakaolin tabanlı geopolimer harçlara farklı kür koşullarının etkisinin incelenmesi", (2019).
5. Taylor, M., Tam, C., and Gielen, D., "Energy efficiency and CO2 emissions from the global cement industry energy efficiency and CO2 emission reduction potentials and policies in the cement", (2006).
6. Şinik, O., "Geopolimer betonlarda dayanıklılık özelliklerinin araştırılması", (2019).
7. M. Özdal, "Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların donma-çözülme dayanıklılığının araştırılması", (2019).
8. Aydın, S., "Alkalilerle aktive edilmiş yüksek fırın cürufu bağlayıcılı lifli kompozit geliştirilmesi", (2010).
9. Davidovits, J., "30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs", *Geopolymer 2002 Conference*, 28–29 (2002).
10. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S., "Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products", *Construction And Building Materials*, 22 (7): 1305–1314 (2008).
11. V.B. Thapa, D. W., "A short review on alkali-activated binders and geopolymer binders", (2018).
12. Roy, D. M., "Alkali activated cements, opportunities and challenges", *Cement And Concrete Research*, 29: 249–254 (1999).

13. Görür, E. B., "Alkali ile aktifleştirilmiş uçucu kül geopolimer betonun dayanım ve durabilite özelliklerinin araştırılması", (2015).
14. R.J. Thomas, H. Ye, A. Radlińska, S. P., "Alkali-activated slag cement concrete: A closer look at a sustainable alternative to portland cement", *Concrete International*, 38 (1): (2016).
15. Aslan, M. E., "Farklı mineral katkılarının geopolimer harçların özelliklerine etkileri", (2019).
16. Tekin, I., Gencil, O., Gholampour, A., Oren, O. H., Koksall, F., and Ozbakkaloglu, T., "Recycling zeolitic tuff and marble waste in the production of eco-friendly geopolimer concretes", *Journal Of Cleaner Production*, 268 (May): 1–16 (2020).
17. Glukhovsky, V. D., "Ancient, modern and future concretes", *First International Conference Alkaline Cements And Concretes*, 1–9 (1994).
18. Krivenko, P., "Why alkaline activation - 60 years of the theory and practice of alkali-activated materials", *Journal Of Ceramic Science And Technology*, 8 (3): 323–333 (2017).
19. Humur, G. H., "Effect of nano-silica on the chemical durability and mechanical performance of fly ash based geopolimer concrete", (2018).
20. Dirikolu, İ., "Volkanik tüf esaslı alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcıların fiziksel ve mekanik özellikleri", (2019).
21. Davidovits, J., "Why alkali-activated materials are not geopolymers ?", (2018).
22. Marvila, M. T., Azevedo, A. R. G. de, and Vieira, C. M. F., "Reaction mechanisms of alkali-activated materials", *Revista IBRACON De Estruturas E Materiais*, 14 (3): 1–26 (2021).
23. Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., and Jalali, S., "Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture", *Construction And Building Materials*, 22 (7): 1315–1322 (2008).
24. Gümüş, A., "Geopolimer beton özelliklerine termal kür prosesinin etkisi", (2016).
25. Ranjbar, N. and Zhang, M., "Fiber-reinforced geopolimer composites: A review", *Cement And Concrete Composites*, 107 (103): 49–66 (2020).
26. H. Yiğiter, S. T., "Çelik lif kullanımının yüksek performanslı betonların süneklik

özelliğine etkisi", (2015).

27. Batool, S., Bibi, A., Frezza, F., and Mangini, F., "Benefits and hazards of electromagnetic waves, telecommunication, physical and biomedical: A review", *European Review For Medical And Pharmacological Sciences*, 23 (7): 3121–3128 (2019).
28. Gökoğlan, E., Ekinçi, M., Özgenç, E., Özdemir, D. İ., and Aşıkoğlu, M., "Radyasyon ve insan sağlığı üzerindeki etkileri", *Anadolu Kliniği Tıp Bilimleri Dergisi*, 25 (3): 289–294 (2020).
29. M. Gümüş, Ş. Demir, Ö. S., "Agrega tipinin ağır betonların radyasyon soğurma özelliklerine etkisi", *Uluslararası Mühendislik Araştırma Ve Geliştirme Dergisi*, 12 (2): 777–786 (2020).
30. H. Binici, A. Küçükönder, A. H. Sevinç, M. Eken, M. K., "Hafif ve ağır malzemelerin ısı, ses ve radyasyon yalıtım özelliklerinin araştırılması", *Çukurova University Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture*, 28 (2): 113–123 (2013).
31. Li, L., Dong, X., Dong, S., Yu, X., and Han, B., "Electromagnetic wave shielding/absorption performances of cementitious composites incorporating carbon nanotube metamaterial with helical chirality", *SAGE Journals*, 54 (25): 3857–3870 (2020).
32. Morton, J. J., "Magnetic properties of materials", (2012).
33. Gabrousenko, J., Holubnychyi, A. G., Hu, Z., Taranenکو, A. G., and Yanovsky, F. J., "Estimation of electromagnetic shielding efficiency", *Telecommunications And Radio Engineering*, 78 (2): 181–189 (2019).
34. G. Kürklü, G. G., "Alkali tuz içeriğinin geopolimer cephe kaplama malzemesi özelliklerine etkisi", 7. *Ulusal Çatı & Cephe Sempozyumu*, (2014).
35. Davidovits, J., "Properties of geopolymer cements", *First International Conference On Alkaline Cements And Concretes*, (October 1994): 131–149 (1994).
36. Wu, Y., Lu, B., Yi, Z., Du, F., and Zhang, Y., "The properties and latest application of geopolymers", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 472 (1): 1–4 (2019).
37. Bılal, M., "Geopolimer betonda pirinç kabuğu külü ve atık seramik tozu kullanımının araştırılması", (2019).
38. Their, J. M., "Mechanical and transport properties of geopolymer concrete with artificial lightweight aggregate", (2018).
39. F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. C., "Handbook of

Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes", (2015).

40. Rafeet, A., "Mix design, fresh and hardened properties and microstructural characterisation of alkali-activated concrete based on PFA/GGBS blends", (2016).
41. F. Puertas, S. Martinez-Ramirez, S. Alonso, T. V., "Alkali-activated fly ash/slag cements. Strength behaviour and hydration products", ***Cement And Concrete Research***, 30 (10): 1625–1632 (2000).
42. Özcan, A., "Ferrokrom cürufu ve yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen geopolimer betonların asit,tuz ve sülfat etkilerine karşı dayanıklılığının araştırılması", (2018).
43. Öksüzer, N., "Farklı inceliklere sahip mermer ve Bayburt taşı atıklarının lif donatılı geopolimer bağlayıcılı sistemlerde kullanılması", (2016).
44. Rakhimova, N. R. and Rakhimov, R. Z., "Reaction products, structure and properties of alkali-activated metakaolin cements incorporated with supplementary materials - A review", ***Journal Of Materials Research And Technology***, 8 (1): 1522–1531 (2019).
45. Ekinci, E., "Volkanik tüf kullanılarak üretilen geopolimer betonların bazı mekanik ve fiziksel özelliklerinin araştırılması", (2017).
46. Cao, V. D., Pilehvar, S., Salas-Bringas, C., Szczotok, A. M., Do, N. B. D., Le, H. T., Carmona, M., Rodriguez, J. F., and Kjøniksen, A. L., "Influence of microcapsule size and shell polarity on the time-dependent viscosity of geopolymer paste", ***Industrial And Engineering Chemistry Research***, 57 (29): 9457–9464 (2018).
47. Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., and Criado, M., "Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model", ***Cement And Concrete Research***, 35 (6): 1204–1209 (2005).
48. Gasca-Tirado, J. R., Manzano-Ramírez, A., RiveraMuñoz, E. M., Velázquez-Castillo, R., Apátiga-Castro, M., Nava, R., and Rodríguez-López, A., "Ion exchange in geopolymers", (2018).
49. Davidovits, J., "Geopolymer chemistry and sustainable development. The Poly (sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry", ***Geopolymer: Green Chemistry And Sustainable Development Solutions***, (2005).
50. Provis, J. L., Palomo, A., and Shi, C., "Advances in understanding alkali-activated materials", ***Cement And Concrete Research***, 78: 110–125 (2015).
51. Çolak, C., "Mechanical and durability properties of alkali activated slag concrete", (2018).

52. Krivenko, P., "Progress in alkaline cements", *First International Conference Alkaline Cements And Concretes*, 11–129 (1994).
53. Duxon, P. and Provis, J. L., "Designing precursors for geopolymer cements", *Journal Of The American Ceramic Society*, 91 (12): 3864–3869 (2008).
54. Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., and Fernández-Jiménez, A., "A review on alkaline activation: New analytical perspectives", *Materiales De Construcción*, 64 (315): 1–24 (2014).
55. Ahmed, I., "Electromagnetic radiation properties of cementless alkali activated materials reinforced with polypropylene and steel fibers", (2021).
56. C. Shi, P.V. Krivenko, D. R., "Alkali-Activated Cements and Concretes", (2006).
57. Wang, S. D. and Scrivener, K. L., "Hydration products of alkali activated slag cement", *Cement And Concrete Research*, 25 (3): 561–571 (1995).
58. Girgin, S., "NaOH ile aktifleştirilmiş metakaolin katkılı geopolimer malzeme özelliklerinin araştırılması", (2016).
59. Li, C., Sun, H., and Li, L., "A review: The comparison between alkali-activated slag (Si + Ca) and metakaolin (Si + Al) cements", *Cement And Concrete Research*, 40 (9): 1341–1349 (2010).
60. M. Tuyan, O.C. Boyacı, Ö. Çakır, K. R., "Uçucu kül esaslı gepolimer betonların mekanik özellik ve yüksek sıcaklık dirençlerinin araştırılması", *Hazır Beton Kongresi Fuarı*, (April): (2017).
61. Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A., "Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements", *Fuel*, 82 (18): 2259–2265 (2003).
62. E. Shamsaei, O. Bolt, F.B. Souza, E. Benhelal, K.S. Crentsil, J. S., "Pathways to commercialisation for brown coal fly ash-based geopolymer concrete in Australia", *Sustainability (Switzerland)*, 13 (8): (2021).
63. Shi, C., Jiménez, A. F., and Palomo, A., "New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement", *Cement And Concrete Research*, 41 (7): 750–763 (2011).
64. Criado, M., Fernández-Jiménez, A., Aranda, M. A. G., and De la Torre, A. G., "An XRD study of the effect of the SiO₂/Na₂O ratio on the alkali activation of fly ash", *Cement And Concrete Research*, 37 (5): 671–679 (2007).
65. Erdoğan, S. T. and Erdoğan, T. Y., "Puzolanik mineral katkıları ve tarihi geçmişleri", *2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 263–275 (2007).

66. Erdoğan, T. Y., "Beton", 179–212 (2015).
67. Erdoğan, Ş. and Kurbetçi, Ş., "Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 4 (426): 115–120 (2003).
68. Tekin, İ., "Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes", *Construction And Building Materials*, 127: 607–617 (2016).
69. Özen, S., "Volkanik tüf esaslı geopolimerlerin basınç dayanımına kür süresi ve sıcaklığın etkileri", *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11 (2): 530–536 (2021).
70. Gökçe, H. S., Taban, S., and Şimşek, O., "Zeolitik tüf ikamesinin farklı agregalar üzerinde alkali-silika reaksiyonu etkilerinin belirlenmesi", *Journal Of The Faculty Of Engineering And Architecture Of Gazi University*, 25 (4): 803–809 (2010).
71. Taban, S. and Şimşek, O., "Zeolitik tüf katkı oranı ve deniz suyunun çimentonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 24 (1): 145–153 (2009).
72. Kaplan, H. and Binici, H., "Tras ve trasslı çimentolar", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1 (2): 121–127 (1995).
73. Uzal, B., Bektaş, F., and Turanlı, L., "Öğütülmüş doğal zeolitin alkali silika reaksiyonu ve sülfat etkisi ile genişlemesinin incelenmesi", (2004).
74. Rožek, P., Król, M., and Mozgawa, W., "Geopolymer-zeolite composites: A review", *Journal Of Cleaner Production*, 230 (30): 557–579 (2019).
75. Acar, M. C., Şener, A., Özbayrak, A., and Çelik, A. İ., "Geopolimer harçlarda zeolit katkısının etkisi", *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 8 (3): 820–832 (2020).
76. Yurt, Ü. and Emiroğlu, M., "Zeolit ikameli geopolimer betonlarda kür şartlarının etkileri", *Academic Platform Journal Of Engineering And Science*, 8 (2): 396–402 (2020).
77. Ş. Ekmen, K. M., "Alkali aktivatör parametrelerinin ve test koşullarının geopolimer betonların büzülme ve sünme davranışı üzerine etkisi", *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 8733 (3): 93–101 (2018).
78. Xu, Y., Chen, H., and Wang, P., "Effect of polypropylene fiber on properties of alkali-activated slag mortar", *Advances In Civil Engineering*, 2020: 12 (2020).
79. Mısır, M. N., "Elazığ ferrokrom cürufu ile alkali aktive edilmiş cam lifi ve atık mermer tozu katkılı harçların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi", (2021).

80. Rasheed, A. A., "Effect of nano silica and steel fiber on fresh state and mechanical properties of self-compacting geopolymer concrete", (2019).
81. Kuranlı, Ö. F., "Farklı bağlayıcı ve lif içeren geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi", (2020).
82. Yonar, Y., "Geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklık dayanıklılığı", (2014).
83. Aydın, S. and Baradan, B., "The effect of fiber properties on high performance alkali-activated slag/silica fume mortars", *Composites Part B: Engineering*, 45 (1): 63–69 (2013).
84. Yaprak, H., Şimşek, O., and Öneş, A., "Cam ve çelik liflerin bazı beton özelliklerine etkisi", *Politeknik Dergisi*, 7 (4): 353–358 (2004).
85. Kozak, M., "Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması", *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 3 (5): 26–35 (2013).
86. Süzgeç, E., "Termik santral uçucu küllerinden geopolimer yapı malzemesi üretimi ve radyasyon sönümlemesinin belirlenmesi", (2020).
87. Marcilio, I., Habermann, M., and Gouveia, N., "Extremely low-frequency magnetic fields and health effects: Literature review", *Revista Brasileira De Epidemiologia*, 12 (2): 1–19 (2009).
88. Zwinkels, J. C., "Light, Electromagnetic Spectrum", (2015).
89. Kaya, A. İ. and Çifci, A., "Kaplama yöntemi ile ahşap kompozit malzemelerinin elektromanyetik kalkanlama özellikleri", *Mesleki Bilimler Dergisi*, 6 (2): 180–185 (2017).
90. Yazıcı, E., "Elektromanyetizma", (2016).
91. Veillette, M., "Electromagnetism", (2018).
92. F. Taktak, İ. Tiryakioğlu, İ. Y., "Gps’de kullanılan elektromanyetik dalgaların insan sağlığına etkilerinin irdelenmesi", *2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu*, (2005).
93. Amca, H. A. and İlkan, M., "Mobil telefonlar ve baz istasyonları tarafından yayılan mikrodalga sinyallerin insan sağlığı üzerindeki etkileri", (1999).
94. Miller, A. B., Siers, M. E., Morgan, L. I., Davis, D. L., Hardell, L., Oremus, M., and Soskolne, C. L., "Risks to health and well-being from radio-frequency radiation emitted by cell phones and other wireless devices", *Front Public Health*, 7 (223): 1–10 (2019).

95. Torres-Duran, P. V., Ferreira-Hermosillo, A., Juarez-Oropeza, M. A., Elias-Vinas, D., and Verdugo-Diaz, L., "Effects of whole body exposure to extremely low frequency electromagnetic fields (ELF-EMF) on serum and liver lipid levels, in the rat", (2007).
96. Nelson, S. O., "Measurement of microwave dielectric properties of particulate materials", *Journal Of Food Engineering*, 21 (3): 365–384 (1994).
97. Internet: Nave, R., "Interaction of Radiation with Matter", <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/mod3.html> (2021).
98. Xie, S., Ji, Z., Zhu, L., Zhang, J., Cao, Y., Chen, J., Liu, R., and Wang, J., "Recent progress in electromagnetic wave absorption building materials", *Journal Of Building Engineering*, 27: 1–14 (2020).
99. Kılınçarslan, Ş., Başığit, C., Molla, T., and Sancar, S., "Radyoaktif ışınlardan korunaklı ekolojik yapılar", *Journal Of Polytechnic*, 14 (2): 93–99 (2011).
100. Akkurt, İ., Günoğlu, K., Başığit, C., Kılınçarslan, Ş., and Akkaş, A., "Farklı çimentolarla üretilen çimento pastalarının radyasyon zırhlama özellikleri", *SDU International Technologic Science*, 4 (2): 135–140 (2012).
101. Yılmaz, R., "Elektromanyetik kalkanlama özelliği olan malzemeler", *Ejovoc (Electronic Journal Of Vocational Colleges)*, 4 (1): 136–150 (2014).
102. Liu, C., Wang, L., Liu, S., Tong, L., and Liu, X., "Fabrication strategies of polymer-based electromagnetic interference shielding materials", *Advanced Industrial And Engineering Polymer Research*, 3 (4): 149–159 (2020).
103. Chung, D. D. L., "Materials for electromagnetic interference shielding", *Materials Chemistry And Physics*, 255 (April): 1–11 (2020).
104. Wanasinghe, D., Aslani, F., and Ma, G., "Electromagnetic shielding properties of carbon fibre reinforced cementitious composites", *Construction And Building Materials*, 260: 1–14 (2020).
105. Zhang, L., Bi, S., and Liu, M., "Lightweight electromagnetic interference shielding materials and their mechanisms", (2018).
106. Ribadeneyra, M. C., "EMI shielding composites based on magnetic nanoparticles and nanocarbons", (2014).
107. Palamutcu, S. and Dağ, N., "Fonksiyonel tekstiller 1: Elektromanyetik kalkanlama amaçlı tekstil yüzeyleri", *Tekstil Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3 (1): 87–101 (2009).
108. Adanur, İ., "Manyetik malzemelerin sınıflandırılması", (2015).
109. Williams, A., "Classification of magnetic materials", (2014).

110. Şatır, M., "Fe₃O₄ katkılı nanokompozit polimer üretimi ve karakterizasyonu", (2014).
111. Akgün, E., "Nadir toprak elementli bileşiklerin manyetik, yapısal ve termal karakterizasyonu", (2007).
112. Erdoğan, M., "Amorf ferromanyetik tellerde mıknatıslanma süreçleri", (2008).
113. *Domains To Geologic Terranes*, 1 (c): 16–30 (1992).
114. Karaoğlu, E., "Fe₃O₄ nanocomposites", (2012).
115. Velasco, S. and Román, F. L., "Determining the Curie Temperature of iron and nickel", *The Physics Teacher*, 45 (6): 387–389 (2007).
116. Keshtkar, A., Maghoul, A., and Kalantarnia, A., "Magnetic shield effectiveness in low frequency", *International Journal Of Computer And Electrical Engineering*, 3 (4): 507–513 (2011).
117. Shukla, V., "Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients", *Nanoscale Advances*, 1 (5): 1640–1671 (2019).
118. Majcher, K., Musial, M., Pakos, W., Rozanski, A., Sobotka, M., and Trapko, T., "Methods of protecting buildings against HPM radiation-a review of materials absorbing the energy of electromagnetic waves", *Materials*, 13: 1–21 (2020).
119. He, C., Wang, Q., and Qu, Z., "Research progress of electromagnetic shielding materials", *2nd International Symposium On Resource Exploration And Environmental Science*, 170: 1–5 (2018).
120. Beiu, C., Golovanov, N., Toader, C., and Buica, G., "Low frequency electromagnetic shielding solutions", *11th International Conference On Electromechanical And Power Systems, SIELMEN 2017 - Proceedings*, 179–183 (2017).
121. Emrich, R., "Low frequency magnetic shielding – an integrated solution", (2010).
122. Internet: Direct, S., "Jeopolimer Çalışmalarının Yıllara Göre Yayın Sayısı", <https://www.sciencedirect.com/search?q=geopolimer&date=2000-2022> .
123. Internet: Direct, S., "Elektromanyetik Kalkanlama Çalışmalarının Yıllara Göre Yayın Sayısı", [https://www.sciencedirect.com/search?date=2000-2022&q=electromagnetic shielding](https://www.sciencedirect.com/search?date=2000-2022&q=electromagnetic%20shielding) .
124. Sikora, P., Horszczaruk, E., Cendrowski, K., and Mijowska, E., "The influence of Nano-Fe₃O₄ on the microstructure and mechanical properties of

- cementitious composites", *Nanoscale Research Letters*, 11 (1): 1–9 (2016).
125. Guan, B., Ding, D., Wang, L., Wu, J., and Xiong, R., "The electromagnetic wave absorbing properties of cement-based composites using natural magnetite powders as absorber", *Materials Research Express*, 4 (5): 1–6 (2017).
 126. Lesbayev, A. B., Elouadi, B., Borbotko, T. V., Manakov, S. M., Smagulova, G. T., Boiprav, O. V., and Prikhodko, N. G., "Influence of magnetite nanoparticles on mechanical and shielding properties of concrete", *Eurasian Chemico-Technological Journal*, 19 (3): 223–229 (2017).
 127. Bragança, B., Portella, K. F., Gobi, C. M., Silva, E. M., and Alberti, E., "The use of 1% Nano-Fe₃O₄ and 1% Nano-TiO₂ as partial replacement of cement to enhance the chemical performance of reinforced concrete structures", *Athens Journal Of Technology And Engineering*, 4 (2): 97–108 (2017).
 128. Farhan, N. A., Sheikh, M. N., and Hadi, M. N. S., "Engineering properties of ambient cured alkali-activated fly ash–slag concrete reinforced with different types of steel fiber", *Journal Of Materials In Civil Engineering*, 30 (7): 13–25 (2018).
 129. Najm, M. S., "Structural behavior of geopolymer concrete beams", (2018).
 130. Mansouri, I., Nejat, M., Shahbazi, S., and Karami, A., "Effect of magnetite nanoparticles (ferroferric oxide) on discrete concrete properties", *Proceedings Of Institution Of Civil Engineers: Construction Materials*, 172 (2): 95–102 (2019).
 131. Tekin, İ. and Şahin, H., "The use of Bayburt region zeolitic tuffs as a mineral additive in blended cement production", *Cement Concrete World*, 25 (146): 54–67 (2020).
 132. Vlasceanu, I. N., Gharzouni, A., Tantot, O., Lalande, M., Elissalde, C., and Rossignol, S., "Geopolymer as dielectric materials for ultra-wideband antenna applications: Impact of magnetite addition and humidity", *Open Ceramics*, 2 (August): 1–9 (2020).
 133. Aykut, C., "Bayburt taşı atıklarının geopolimer tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması", (2017).
 134. Yağcıoğlu, U. C., Bak, T., and Şen, C., "Bayburt Taşı (Tüfit)", *Mavi Gezegen*, 5 (26): 91–95 (2019).
 135. Şahin, H., "Bayburt taşı olarak bilinen tüflerin çimento üretiminde mineral katkı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması", (2018).
 136. Kaçar, M. C., "Bayburt taşının üç boyutlu işlenebilmesi için mekanik sistemin ve kontrol yazılımının gerçekleştirilmesi", (2014).

137. Internet: ASTM C1437-20, "ASTM C1437 - 20 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar", .
138. Internet: ASTM C596-18, "ASTM C596 - 18 Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement", .
139. Internet: ASTM C348-18, "Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars", .
140. Internet: ASTM C109/C109M-16, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", .
141. Koppel, T., Shishkin, A., Haldre, H., Toropov, N., and Tint, P., "Reflection and transmission properties of common construction materials at 2.4 GHz frequency", *Energy Procedia*, 113 (June): 158–165 (2017).

ÖZGEÇMİŞ

Mücahit HAYAT, ilk, orta ve lise öğrenimini Karabük'te tamamladı. 2015 yılında başladığı Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği lisans programından 2019 yılında mezun oldu. 2020 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2021 yılında, Doç. Dr. İlker TEKİN danışmanlığında, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından Alkali-Aktif Malzemeler ile ilgili tamamen finanse edilen bir projede, bursiyer olarak görev aldı.

