

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

**SENTETİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BOR ATIĞI KATKILI
METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN
YÜKSEK SICAKLIK DAVRANIŞI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

DOKTORA TEZİ

Abdullah ÇELİK

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof.Dr. Kemalettin YILMAZ
Ortak Danışmanı : Doç. Dr. Orhan CANPOLAT

Temmuz 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

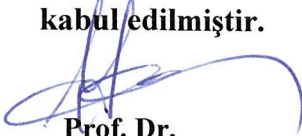
SENTETİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ BOR ATIĞI KATKILI
METAKAOLİN TABANLI GEOPOLİMER KOMPOZİTLERİN
YÜKSEK SICAKLIK DAVRANIŞI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

DOKTORA TEZİ

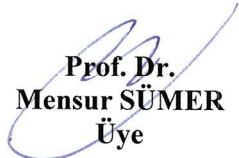
Abdullah ÇELİK

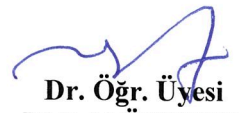
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 24 / 07 /2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr.
Kemalettin YILMAZ
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Metin İPEK
Üye


Prof. Dr.
Mensur SÜMER
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
M.Zeki ÖZYURT
Üye


Dr. Öğr. Üyesi
Hakan ASLAN

Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



İmza
Abdullah ÇELİK

23.07.2019

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalıőmam boyunca bana yardımcı olan, bilgi ve tecrubesini benimle paylaőan değerli hocam Sn. Prof. Dr. Kemalettin YILMAZ'a, çalışmanın hazırlanma sürecinin her aőamasında bilgilerini ve değerli zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli hocam Sn. Doç. Dr. Orhan CANPOLAT'a, Tez çalıőmama ait makalemin hazırlanma sürecinde tecrübelerini benimle paylaőan Sn. Doç. Dr. Mücteba UYSAL'a, Deneysel çalıőmalarım sırasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Arő. Gör. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ'e ve Dr. Mukhallad M. AL-MASHHADANI'ye, Hayatımın her anında yanımda olan, her türlü konuda maddi ve manevi desteklerini hissettiğim aileme teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	7
2.1. Genel Bilgiler	7
2.2. Betonun Çevresel Özellikleri	7
2.3. Geopolimer	8
2.3.1. Geopolimer kimyası	9
2.3.2. Geopolimer uygulamaları	10
2.4. Geopolimer Bileşenleri	11
2.4.1. Hammaddeler	11
2.4.2. Alkali sıvılar	12
2.5. Geopolimer Özellikleri	13
2.6. Literatür İncelemesinin Özeti	20

BÖLÜM 3.

MATERYAL VE YÖNTEM	21
3.1. Genel Bilgi	21
3.2. Malzemeler	21
3.2.1. Metakaolin (MK)	21
3.2.2. Kolemanit (K)	25
3.2.3. Granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)	28
3.2.4. Standart rilem kumu	31
3.2.5. Aktivatör çözeltileri	32
3.2.6. Kullanılan lifler	34
3.3. Tez Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmalar	35
3.3.1. Basınç dayanımı testi	35
3.3.2. Eğilme dayanımı testi	37
3.3.3. Ultrasonik ses hızı testi	38
3.3.4. Boşluk oranı, su emme ve birim hacim ağırlık deneyleri	40
3.3.5. Eğilme tokluğu faktörü	41
3.3.6. Aşınma direnci testi	41
3.3.7. Yüksek sıcaklık direnci testi	44
3.3.8. SEM analizi	45
3.4. Karışım Özellikleri	47
3.4.1. Alkali çözeltilerin hazırlanması	48
3.4.2. Taze geopolimer üretimi	48
3.4.3. Karışımların kür yöntemi	50

BÖLÜM 4.

ARAŞTIRMA BULGULARI	52
4.1. Ön Karışımlar	52

4.2. Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış ve Bırakılmamış Geopolimerlerin Mukavemet Özellikleri	54
4.3. Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış ve Bırakılmamış Geopolimerlerin Ultrasonik Ses Hızı Testi Özellikleri	61
4.4. Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonra Ağırlık Kaybı	63
4.5. Boşluk Oranı, Su Emme ve Birim Hacim Ağırlık Sonuçları	65
4.6. Eğilme Tokluğu Faktörü Sonuçları	66
4.7. Aşınma Direnci Testi Sonuçları	69
4.8. Araştırılan Bazı Özellikler Arasında Korelasyon	71
4.9. Görsel İnceleme	72
4.10. SEM Analizi	76
BÖLÜM 5.	
TARTIŞMA VE SONUÇ	84
KAYNAKLAR	88
ÖZGEÇMİŞ	96

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
B	: Bazalt
GPÇ	: Geleneksel Portland Çimentosu
GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
K	: Kolemanit
MK	: Metakaolin
PA	: Poliamid
PL	: Poliolefin
PVA	: Polivinil alkol
SEM	: Scanning Electron Microscopy

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Geopolimer oluşumunun denklemleri	9
Şekil 3.1. Metakaolin.....	22
Şekil 3.2. Metakaolin numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş	23
Şekil 3.3. Metakaolin numunesinin SEM görüntüleri: a) 7000 kez büyütülmüş b) 10000 kez büyütülmüş	24
Şekil 3.4. Kolemanit	25
Şekil 3.5. Kolemanit numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş	26
Şekil 3.6. Kolemanit numunesinin SEM görüntüleri: a) 7000 kez büyütülmüş b) 10000 kez büyütülmüş	27
Şekil 3.7. GYFC numunesi.....	28
Şekil 3.8. Cüruf numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş	29
Şekil 3.9. Cüruf numunesinin SEM görüntüleri: a) 7000 kez büyütülmüş b) 10000 kez büyütülmüş	30
Şekil 3.10. Standart rilem kumu	31
Şekil 3.11. Sodyum hidroksit kimyasal çözeltisinin hazırlanması	32
Şekil 3.12. Sodyum hidroksit	33
Şekil 3.13. Sodyum silikat.....	33
Şekil 3.14. Polivinil alkol lifi.....	34
Şekil 3.15. Bazalt lifi	35
Şekil 3.16. Basınç testi ekran görüntüsü.....	36
Şekil 3.17. Basınç dayanımı testinin küp numunelerde uygulanması	37
Şekil 3.18. Eğilme dayanımı testinin prizma numunelerde uygulanması	38
Şekil 3.19. Ultrasonik ses hızı testi ekran görüntüsü.....	39
Şekil 3.20. Ultrasonik ses hızı testi cihazı	39

Şekil 3.21. Arşimed deney düzeneği	40
Şekil 3.22. 71±1.5 mm küp numuneler	42
Şekil 3.23. Böhme aşındırma aleti.....	42
Şekil 3.24. Korondum tozu.....	43
Şekil 3.25. Korondum tozu kullanılarak 71±1.5 mm küp numunelerin hareketi	43
Şekil 3.26. Fırın	44
Şekil 3.27. Fırına konulan 10K numuneler.....	45
Şekil 3.28. SEM cihazı	46
Şekil 3.29. SEM kaplama cihazı.....	47
Şekil 3.30. 50 x 50 x 50 mm küp ve 40 x 40 x 160 mm prizma kalıplar.....	48
Şekil 3.31. Matkap karıştırıcı	49
Şekil 3.32. Vibrasyon masası.....	50
Şekil 3.33. Yanmaz fırın poşetli numunelerinin fırına konulması	51
Şekil 3.34. Numunelerin plastik saklama kutularına konulması	51
Şekil 4.1. MK geopolimer numuneler	53
Şekil 4.2. 10K ve 20K geopolimer numuneler	53
Şekil 4.3. 30K ve 40K geopolimer numuneler	54
Şekil 4.4. Kolemanit atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimerlerin basınç dayanımı test sonuçları	55
Şekil 4.5. Yüksek sıcaklık etkisinde kolemanit atığı katkılı numunelerin basınç dayanımı test sonuçları	56
Şekil 4.6. Kolemanit atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimerlerin eğilme dayanımı test sonuçları	58
Şekil 4.7. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kolemanit atığı katkılı numunelerin eğilme dayanımı sonuçları.....	59
Şekil 4.8. Metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yük-sapma eğrileri	68
Şekil 4.9. Araştırılan karışımların eğilme tokluğu faktörleri.....	68
Şekil 4.10. Metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin ağırlık kaybı miktarı	69
Şekil 4.11. Metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin boy değişimi miktarı	70
Şekil 4.12. Ultrasonik ses hızı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon	71
Şekil 4.13. Eğilme dayanımı ile ağırlık kaybı arasındaki korelasyon	72
Şekil 4.14. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer numunelerin görsel incelenmesi (300°C)	73

Şekil 4.15. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer numunelerin görsel incelenmesi (600°C)	74
Şekil 4.16. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer numunelerin görsel incelenmesi (900°C)	75
Şekil 4.17. Yüksek sıcaklığa maruz kalmamış PVA lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b).....	77
Şekil 4.18. Yüksek sıcaklığa maruz kalmamış bazalt lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b).....	78
Şekil 4.19. Yüksek sıcaklığa maruz kalmamış poliolefin lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b).....	79
Şekil 4.20. 300°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış PVA lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b).....	80
Şekil 4.21. 900°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış PVA lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b).....	81
Şekil 4.22. 300°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış poliolefin lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b).....	82
Şekil 4.23. 900°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış poliolefin lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b).....	83

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Geopolimer malzemelerin uygulanması	11
Tablo 3.1. Metakaolinin kimyasal bileşenlerinin analizi	21
Tablo 3.2. Metakaolinin fiziksel özellikleri	22
Tablo 3.3. Kolemanit numunesinin kimyasal analizi	25
Tablo 3.4. Granüle yüksek fırın cürufu numunesinin kimyasal bileşimi	28
Tablo 3.5. Kumun granülometrisi ve standart sınır değerleri	31
Tablo 3.6. Sodyum hidroksitin özellikleri	32
Tablo 3.7. Sodyum silikatın özellikleri	32
Tablo 3.8. Kullanılan liflerin özellikleri	34
Tablo 3.9. Geopolimer karışım oranları (gr)	47
Tablo 4.1. Metakaolin tabanlı geopolimerlerin kolemanit atığı içeren ön karışımlarının test sonuçları	52
Tablo 4.2. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin basınç dayanımı kaybı	57
Tablo 4.3. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin eğilme dayanımı kaybı	60
Tablo 4.4. Ultrasonik ses hızı testi sonuçları (m/sn)	61
Tablo 4.5. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin ultrasonik ses hızı testi sonuçları (m/sn)	62
Tablo 4.6. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin ultrasonik ses hızı kaybı	63
Tablo 4.7. Yüksek sıcaklıklar nedeniyle ağırlık kaybı (%)	64
Tablo 4.8. Sentetik liflerin kontrol karışımına göre daha az ağırlık kaybı göstermesi açısından performansı	64
Tablo 4.9. İncelenen karışımların fiziksel özellikleri	65
Tablo 4.10. Yapılan karışımların eğilme tokluğu özellikleri	67

ÖZET

Anahtar kelimeler: Geopolimer, metakaolin, bor atığı, sentetik lifler, yüksek sıcaklık, aşınma direnci

Bu çalışma, dört farklı lif kullanılarak takviye edilmiş bor atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimer harç kompozitlerinin bazı mekanik ve mikroyapısal özelliklerini ve yüksek sıcaklık davranışını incelemeyi hedeflemektedir. Sentetik lifler (poliolefin lifi, bazalt lifi, modifiye poliamid lifi ve polivinil alkol lifi), geopolimer kompozitler üzerindeki davranış etkilerini değerlendirmek için kullanılmıştır.

Metakaolin tabanlı geopolimer harçların özelliklerine ilave edilecek liflerin etkisini incelemek için basınç dayanımı, eğilme dayanımı, aşınma direnci, tokluk ve yüksek sıcaklığa maruz bırakma gibi bazı deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Geopolimer karışımları, sodyum hidrosit ve sodyum silikat çözeltileri ile aktive edilen metakaolin ve bor atığının bir kombinasyonu ile hazırlanmış ve daha sonra ısıyla kür yapılmıştır. Deneysel test sonuçları, çeşitli lif türlerinin ilave edilmesinin, geopolimer kompozitlerin mukavemet özelliklerini geliştirdiğini, örneğin, polivinil alkol lifli numunelerinin, kontrol numunesine göre % 415.58'lik bir eğilme tokluğu artışı sağladığını göstermiştir. Aşınma direncine ilişkin olarak, üretilen tüm numuneler 2 mm'den daha az bir uzunluk değişimi ve 15 g'dan daha az bir ağırlık kaybı göstermiştir. Sentetik liflerin kullanımı, metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin dayanım kaybı, ağırlık kaybı ve ultrases geçiş hızı kaybı açısından yüksek sıcaklık davranışını olumlu yönde etkilemiştir. Mikroyapısal analiz, sentetik lifler ve geopolimer matris arasında kabul edilebilir bir bağlanma derecesi olduğunu ortaya koymuştur.

HIGH-TEMPERATURE BEHAVIOR AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF BORON WASTE ADDITIVE METAKAOLIN BASED GEOPOLYMER COMPOSITES REINFORCED WITH SYNTHETIC FIBERS

SUMMARY

Keywords: Geopolymer, metakaolin, boron waste, synthetic fibers, high temperature, abrasion resistance.

This study aims to study some mechanical and microstructural properties and high temperature behavior of metakaolin based geopolymer mortar composites reinforced with boron waste using four different fibers. Synthetic fibers (polyolefin fiber, basalt fiber, modified polyamide fiber and polyvinyl alcohol fiber) were used to evaluate the behavioral effects of geopolymer composites.

Some experimental tests have been carried out to determine the effect of fibers to be added on the properties of metakaolin-based geopolymer mortars, such as compressive strength, flexural strength, abrasion resistance, toughness and high temperature resistance. Geopolymer mixtures were prepared with a combination of metakaolin and boron waste activated by sodium hydroxide and sodium silicate solutions and then cured with heating. Experimental test results show that the addition of various fiber types improves the strength properties of geopolymer composites, for example, polyvinyl alcohol fiber samples provided a 415.58% flexural toughness improvement compared to the control sample. As regards abrasion resistance, all produced samples showed a length change less than 2 mm and a weight loss less than 15 g. Using synthetic fibers has a positive effect on the high temperature behavior of metakaolin based geopolymer composites due to loss of strength, loss of weight and loss of ultrapulse velocity. Microstructural analysis has shown that there is an acceptable degree of bonding between synthetic fibers and the geopolymer matrix.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çimento tüm dünyada inşaat sektörünün vazgeçilmez malzemesidir ve özellikle altyapı yatırımlarındaki artışla birlikte gelişmekte olan ülkelerde çimento tüketimi artmaktadır. Öte yandan, karbondioksitin atmosfere salınması ve sera gazı emisyonlarıyla ilgili olarak çimento üretimi ile yoğun olumsuz etkiler meydana gelmiştir. Portland çimentosunun miktarını azaltmak için çok çaba sarfedilmekte ve çevre dostu alternatif inorganik bağlayıcı malzemeler kullanılarak uygulama ve araştırma açısından istenilen seviyeye ulaşılmaya başlanmıştır.

Çimento ve betonun yüksek sıcaklıklara daha fazla dirençli hale getirilmesi sorunu günümüzde hayati bir ihtiyaç haline gelmiştir. Genel olarak, bu malzemeler için uygulanacak iki önemli alan vardır: (1) yangına dayanıklılığı artırılmış beton yapılar yapmak ve (2) seramik refrakter malzemeleri yerine duvarlar için yüksek sıcaklık donatısı kullanarak yanmaz beton yapmak.

Dünyanın dört bir yanındaki önemli ya da potansiyel olarak tehlikeli binalarda meydana gelen yangın felaketleri, tünellerin, yeraltı yapılarının, gökdelenlerin, stratejik nesnelerin vb. sorumlu yapılarda uygulanacak yeni yangına dayanıklı malzemelerin araştırılmasının hayati bir ihtiyaç olduğunu göstermiştir. Geniş yangın durumunda işlevsel özelliklerin kararlılığını garanti etmek gerekir. Bununla birlikte, GPÇ-tabanlı yapılar, yüksek sıcaklıkta mekanik mukavemetini kaybederek hasara neden olur. Bu durum tahliye ve kurtarma operasyonlarını engelleyebilmektedir.

Geleneksel Portland çimento esaslı beton, yüksek sıcaklıklarda betonun davranışını etkileyen diğer faktörler uygun şekilde seçildiğinde bile (örneğin, boyut, yük, nem, donatı, agrega türü, vb.) yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında yapısal olarak stabil kalamazlar. GPÇ-tabanlı malzemelerin yanmadan sonra başarısız olmasının temel

nedeni, dehidratasyon ve C-S-H jelin ve diğerk kristalin hidratların tahrip edilmesinin neden olduğu ısınma sırasında mikroyapısal elemanların dayanıksızlığıdır. Yanmadan sonraki mikroyapı fazları, başlangıçtaki hidratlanmış ürünlerle hiçbir ilgisi yoktur. Bu açıdan en tehlikeli faz kalsiyum hidroksittir; yanma sırasında kalsiyum okside dönüşür ve daha sonra atmosferin nemiyle müteakip soğutmadan sonra tekrar nemlendirilir; ciddi hacim genişlemesi ve bir matrisin neredeyse tamamen yok edilmesiyle sonuçlanır. Bu nedenle, GPÇ-tabanlı betonun 800-1000°C'de yanmadan sonra kalıcı mukavemeti normal şartlarda %20-30'u geçmez. Bu durumlardan dolayı geleneksel Portland çimentosuna alternatif ürün olarak geopolimer bu sorunların çözümünde fayda sağlar.

Geopolimerler, inorganik alüminosilikat polimer kompozitlerdir ve geleneksel betonlara çevresel olarak önemli bir alternatif yapı oluşturma potansiyeline sahiptirler [1, 2]. Geopolimerler, olası enerji ve karbondioksit tasarrufu ve çarpıcı mekanik ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle geleneksel Portland çimentosu yerine kullanılmaktadır [3, 4]. Üstün özellikleri sayesinde, geopolimerler atık arıtma alanlarında potansiyel olarak kullanılmaktadır. Geleneksel organik polimerlerden farklı olarak, geopolimerler düşük geçirgen, ısıya dayanıklı malzemelerdir ve Portland betonundan daha hızlı kürlenip düşük sıcaklıklarda üretilirler ve harçların uzun süreli büzülme performansını artırır [5].

Geopolimer teknolojisinde kullanılan ana puzolanik malzemelerden biri olarak tanımlanan metakaolin, kil mineralli kaolinitin hidroksillenmiş bir şeklidir [6]. Metakaolinin ana bileşenleri amorf Al_2O_3 ve SiO_2 'dir ve değerli bir katkı maddesi olarak, gözeneklilik, güçlü mekanik ve dayanıklılık özellikleri de dahil olmak üzere yüksek özgül yüzey alanı, daha az kirlilik nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Başlangıç reaksiyon süreci ve metakaolin tabanlı geopolimerin performansı esas olarak kullanılan metakaolin tipi, kimyasal çözelti miktarı ve konsantrasyonu ve geopolimerizasyon işleminin ilk aşamalarında izlenen kürlenme sisteminden etkilenmektedir [8-10]. Araştırmacılar tarafından geopolimerlerin mekanik ve dayanıklılık özellikleri ile ilgili olarak çalışma yapılmıştır [11-15]. Çimentolu matrisin yanı sıra geopolimerik matrislerde de ikame malzemesi olarak çok çeşitli

atık malzemeler kullanılmıştır. Bu atıklar arasında bor atıkları, inşaat alanında ve özellikle geopolimer teknolojisinde kullanılacak potansiyele sahip alternatif olarak kabul edilmektedir.

Bor, Türkiye'nin dünyanın bor cevheri kaynaklarının en büyüğü olarak %72'sine sahip olduğu ve 1.72 milyon tondan fazla bor mineral ve bileşiği üretildiği, Türkiye'nin en önemli cevherlerinden biridir [16]. Cam, deterjan ve seramik endüstrisi, enerji, tarım ve tıp gibi farklı alanlarda kullanılır. En önemli bor mineralleri kolemanit, uleksit ve tinkaldir. Kolemanit ($2\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), 4 ile 4.5 arasında bir sertliğe ve yaklaşık 2.4 gr/cm^3 'lük özgül ağırlığa sahip bir kalsiyum borat mineralidir. Saf kolemanit yaklaşık %51'lik bir B_2O_3 içeriğine sahiptir. Bu mineraller üretim yerlerinde yoğunlaşmaya tabi tutulur, daha sonra kolemanit, sodyum borat ve perborattan borik asit, üretilir. Birçok yan ürün hem yoğunlaşma bölgelerinde hem de borik asit ve boratların üretildiği tesislerde üretilir. Bu yan ürünler atık olarak kabul edilir ve çevre kirliliği yaratırlar. Bu atıklar, özellikle kolemanit cevheri atıkları, tesis alanlarına yakın atık havuzlarında biriktirilmekte, dolayısıyla sualtı kaynakları için kirlilik riski oluşturmaktadır. Bu atıkların neden olduğu kirliliği en aza indirmek için çimento ve beton üretimi gibi farklı süreçlerde değerlendirilirler. Boron atıklarının, özellikle kolomanit atıklarının, çimento katkıları olarak çimento üretiminde kullanıldığı bir dizi çalışma yapılmıştır [16, 17]. Kula ve ark. kolemanit atıklarının, soğuk taban külünün ve uçucu külün harçların özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. B_2O_3 içeriğinin, harçların mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu bildirmişlerdir [18]. Kolemanit atıklarını mineral katkı maddesi olarak kullanarak betonun mekanik özelliklerini incelemek için bir araştırma yapılmıştır. Bu atıkların beton üretiminde çimento ağırlığı ile %10'a kadar ikame edilebileceğini bildirilmiştir [19].

Diğer taraftan, liflerin geopolimer matris kompozitlere dahil edilmesi, mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirebilmektedir. Farklı araştırmacılar, cam, ahşap, bazalt, karbon, pamuk veya dokuma kumaş lifleri gibi geopolimer esaslı kompozitlerin üretiminde çeşitli tipte lifler kullanarak geniş çapta araştırma yapmışlardır [20-22]. Son zamanlarda, araştırma alanları, geopolimer kompozitlerin liflerin varlığında

performansını araştırmaya yönelmiştir. Ayrıca, polivinil alkol, polipropilen, polivinil asetat gibi çeşitli organik polimerlerin de geopolimerik matris içine lif olarak katılmasıyla ilgili çalışmalar yapılmıştır [23-25]. Dias ve Thaumaturgo, bazalt lifli geopolimer beton üzerinde kırılma tokluğu açısından bir çalışma yürütmüştür. Geopolimer matrisi ile geleneksel Portland çimento matrisi karşılaştırıldığında, yaptıkları çalışma, bazalt liflerinin kullanılmasının deformasyon ve enerji emilimi açısından betonların özelliklerini geliştirmede fayda sağladığını ortaya koymuştur [26]. Arunagiri ve ark. [27], bazalt lif katkılı geopolimer betonun mekanik özellikleri ile ilgili bir çalışma yürütmüştür. Bazalt lifin %2 oranında ilave edilmesiyle geopolimer betonda maksimum basınç dayanımını elde etmişlerdir. Bazalt liflerin çatlak durdurucu olarak işlev gördüklerini ve yapıların ani göçmelerini önlediklerini görmüşlerdir. Ayrıca, geopolimer beton içerisine optimum bir içeriğe sahip bazalt lifini katılmasıyla, çekme dayanımının ve çekme mukavemetinin geliştirebileceği bildirilmiştir.

Polivinil alkol (PVA) lifleri, özellikle alkali bir ortamda yüksek stabiliteleri ile yaygın olarak bilinirler. Son zamanlarda, bu lifleri incelemek için artan ilgi, bu liflerin geopolimer matris arasında güçlü bir bağ oluşturduğu göstermiştir [1]. Li ve ark. [28], ekstrüzyon ile üretilen lif takviyeli geopolimer kompozitleri araştırmışlar ve PVA liflerinin eklenmesinin, geopolimer matrisin sünekliliğinde belirgin bir artış ve artan lif içeriği ile iyi bir eğilme mukavemeti ve uygun tokluk sağlayabileceğini bildirmişlerdir. Sun ve ark. PVA lif takviyeli geopolimerlerin mikroyapısal özelliklerini incelemişlerdir. Bu liflerin geopolimer kompozitlerinin darbe tokluğunu geliştirdiği bildirilmiştir [29]. Zhang ve ark. bu liflerin geopolimerlerin dayanıklılığını pozitif yönde etkilediğini ve donma-çözülme döngülerine karşı iyi direnç sağladığını göstermişlerdir [24]. Bazı araştırmacılar tarafından, PVA liflerinin, geopolimer kompozitlere gerinim sertleşmesi sağlayarak katkıda bulunabileceği bildirilmiştir [30, 31]. Tanyildizi ve ark. yüksek sıcaklığa maruz kalmanın PVA lifi ile güçlendirilmiş geopolimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Artan lif içeriğinin, geopolimerlerin eğilme ve basınç dayanımını artırabileceğini ortaya koymuşlardır. Öte yandan, numuneler yüksek sıcaklıklara

maruz kaldığında, kontrol numunesine göre daha az dayanım kaybı oluştuğunu göstermişlerdir [31].

Poliamid liflerinin kullanılması, potansiyel bir araştırma alanını temsil etmekte ve beton kırılmasının azaltılmasında etkililik göstermektedir. Jeon ve ark. [32], makro poliamid lif takviyeli betonun mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Poliamid lif içeriği artırıldığında, betonun sertliğini ve eğilme davranışını önemli ölçüde artırmıştır. Spadea ve ark. [33], çimento harcı takviyesi olarak poliamid lifleri incelemek için bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Sertlik davranışını geliştirmek ve betonun enerji emilimini artırmak için poliamid lifleri betona dahil edilmiştir. Poliamid takviyeli harçların çekme mukavemetinin %35'e kadar arttığı ve poliamid takviyeli harçların tokluğunun, takviye edilmemiş bir malzemeye kıyasla on üç kat daha fazla olduğu çalışmalarla gösterilmiştir.

Elasto-plastik betonlar üretmek ve bu betonların eğilme tokluğunu, darbe dayanımını ve yorulma dayanımını artırmak ve betonların çatlak yayılımını azaltmak ve tünel açma, asfaltlama ve madencilik, döşeme ve prekast endüstrisinin yerinde uygulamaları için işçilik maliyetlerini azaltmak için poliolefin lifler kullanılır. Poliolefin liflerin kullanılması, bu tip betonarme yapıların mekanik davranışının kapsamlı çalışmalarına dayanmaktadır [34-37]. Alberti ve ark. düşük oranlarda çelik liflerle geliştirilmiş poliolefin lif takviyeli betonun özelliklerini incelemişlerdir. Poliolefin liflerin kullanılmasının mekanik özelliklerin iyileştirilmesine, uygun süneklik ve eğilme tokluğuna ulaşılmasına faydalı olduğunu bildirmişlerdir [34]. Han ve ark. [35] silis dumanı içeren çimento esaslı kompozitlerin mühendislik özellikleri üzerindeki poliolefin liflerin etkisini araştırmışlardır. Eğilme mukavemeti %13 oranında artmış ve çatlakların yayılmasında %70'lik bir azalma elde edilmiştir. Aynı zamanda, poliolefin lifli numunelerinin darbe dayanımı, çelik liflilerden iki kat daha büyüktür ve kontrol numunesininkinden on dört kez daha büyüktür. Deng ve ark. [38] betonda makro poliolefin lif takviyesinin özelliklerinin belirlenmesi için bir araştırma yapmışlar ve liflerin varlığının, lif içeriği arttığında betonun çatlama sonrası davranışını olumlu yönde etkilediği sonucuna varmışlardır.

Geleneksel betonların veya metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin üretiminde farklı sentetik lifler kullanılarak birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, hiçbir çalışmada geopolimer kompozitlere değişen miktarlarda poliamid ve poliolefin liflerin katılması değerlendirilmemiştir. Bu çalışmada farklı olarak aynı zamanda, metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin üretiminde bor atığının eklenmesini de incelenmiştir. Geopolimer kompozitlerin yoğunluk, su emme, basınç ve eğilme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve aşınma direnci test sonuçları karşılaştırılmış ve analizler için SEM yapılmıştır. Eğilme tokluğu faktörleri, uygulanan yüklere bağlı olarak enerji emiliminde lif kapasitesini araştırmak için de hesaplanmıştır. Ayrıca, bu çalışma aynı zamanda, bu liflerin özellikle tünel işlerinde kullanıldığı yerlerde yangın olasılığını göz önüne alarak, sentetik lif katkılı geopolimer kompozitlerin yüksek sıcaklık davranışlarına odaklanmaktadır.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Genel Bilgiler

Bu bölümde, metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin gelişimi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ayrıca literatür incelemesinde geopolimer teknolojisinin kısa bir tarihi ve özellikleri gözden geçirilmiştir.

2.2. Betonun Çevresel Özellikleri

20. yüzyılda, şehircilik hızla artmıştır. Dayanıklılık ve mukavemet özelliklerinden dolayı beton temel yapı malzemesi olarak kabul görmektedir. 2010 yılında, dünya genelinde üretilen çimento miktarı 3,3 milyar ton olarak gerçekleşmiş olup, bu rakam 2009 yılında üretilen miktara göre %7 oranında artmıştır [39]. Çimento üretimi büyük miktarda hammaddeye, enerjiye ve ısıya ihtiyaç duyar. Çimento üretimi atmosfere salınan toplam karbondioksit emisyonlarının yaklaşık %7'sini yayar ve bu durum dünyanın bu yüzyıl içinde karşılaştığı en ciddi sorunlardan biri olarak kabul edilir. Bir ton çimento üretmek için yaklaşık bir ton CO₂ salındığı bildirilmiştir [40]. Çimento üretiminden CO₂ salınımı, işlemin iki temel aşamasından meydana gelmektedir, birinci aşama fosil yakıt tüketiminin fırınları ısıtması ve emisyonların neredeyse %40'ını oluşturması ve ikinci aşama ise hammaddelerin 1500°C'den fazla ısıtıldığı kalsinasyondur [41].

Kömür veya fosil yakıtın yanmasından kaynaklanan azot oksit gibi diğer emisyonlar da sera gazlarına katkıda bulunur ve bir takım sağlık sorunlarına neden olur [42]. Buna ek olarak, çimento üretimi yılda milyonlarca ton atık ürün çimento fırın tozunu serbest bırakır ve bu da sağlığı olumsuz yönde etkiler [43].

Çimento endüstrisi büyük ve yoğun bir enerji ihtiyacı duymaktadır. Tüketilen enerjinin maliyeti, 1 ton çimento üretmek için tüm maliyetlerin yaklaşık %40'ını oluşturur. Termal enerji, elektrik enerjisine ve yakıta ihtiyaç duyar [44]. 2010 yılı GNR verilerine göre [45], 1 ton klinker üretmek için gereken Avrupa ortalama termal enerjisi 3733 MJ'dür, bir ton çimento üretmek için, elektrik ihtiyacı 90 ile 150 kWh arasında değişmiştir.

Ayrıca, geleneksel Portland çimentosu ile inşa edilen ve 50 yıldan fazla hizmet vermeye hazırlanan binalar için yapılarda olağan bozulma, özellikle yapıların korozif ortamlarda inşa edilmesi durumunda 20 ile 30 yıl sonra ortaya çıkmaktadır [46].

Son birkaç yılda küresel ısınmanın farkındalığı artmış, bu da küresel ısınmanın büyümesi üzerindeki karbondioksit emisyonunun etkisine dikkat çekmiştir. Çimento endüstrisinin zararlı etkileri alternatif ve çevre dostu beton üretimi ihtiyacı oluşturmuştur; Mehta [47], CO₂ emisyonunu azaltmaya yardımcı olmak için daha az enerji kullanarak doğal kaynak tüketimini azaltan çözümler önermiştir. Mehta, bu kısa vadeli çabaları “endüstriyel ekoloji” olarak sınıflandırmıştır. CO₂ emisyonlarının etkisinin uzun vadede azaltılmasına yönelik çabalar için, kalsinasyon işleminin çimento üretim süreci sırasında düşürülmesi McCaffrey tarafından önerilmiştir [48] çünkü kalsinasyon süreci çok büyük miktarda enerji tüketir ve çimento endüstrisinin süreçleri arasında CO₂ salınımını temsil eder, ayrıca çimento ile inşa edilen binaların azalmasını da sağlar.

2.3. Geopolimer

Geopolimer inorganik yeni bağlayıcı bir eko malzemedir. Geopolimer ilk kez 1978 yılında Davidovits tarafından çimentosuz bir malzeme olarak sunulmuştur. Geopolimer bağlayıcı sistemi, amorf alümino-silikat malzemelerin kimyasal çözeltilerle (potasyum hidroksit ve potasyum silikat veya sodyum hidroksit ve sodyum silikat karışımı olarak) aktive edilmesine dayanmaktadır, reaksiyon Si-O-Al-O bağları içeren bir yapıya sahip 3-D polimer zinciri üretir [49]. Geopolimerin, genel

Geopolimerizasyon reaksiyonu alkali ortam varlığında gerçekleşir. Proses üç farklı aşamadan oluşur ve başlangıç karışımı sırasında alkali çözelti katı malzemede (metakaolin, uçucu kül, cüruf, vb.) bulunan silikon ve alüminyum iyonlarını çözer. Yukarıdaki denklemlerde görüldüğü gibi, geopolimer oluşumu sırasında kimyasal reaksiyon sonucu su açığa çıkar. Serbest bırakılan su, geopolimerin iç yapısından buharlaşır, kullanılan sıcaklık ve kurutma işleminden dolayı kür fazı ile geopolimer yapısında aralarında bağlantı bulunmayan nano-gözeneklerin oluşumuna neden olur. Serbest bırakılan su sadece karışımın işlenebilirliğini artırabilir, ancak çimento hidrasyonundaki rolünden farklı olarak kimyasal reaksiyonda herhangi bir rol oynamaz [56].

Geopolimer yapısı genel olarak Si/Al molar oranına dayanır ve aşağıdaki gibi yinelenen bir birim olarak üç temel forma sahiptir [50]:

- Poli (sialat) Si/Al = 1, tekrarlayan birim olarak [-Si-O-Al-O-].
- Poli (sialat-silokso) Si/Al = 2, tekrarlayan birim olarak [-Si-O-Al-O-Si-O-].
- Poli (sialat-disilokso) Si/Al = 3, tekrarlayan birim olarak [-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-] ile.

2.3.2. Geopolimer uygulamaları

Geopolimerler, yangına dayanıklı lifler, seramikler ve betonlar gibi birçok alanda kullanılabilir (Tablo 2.1.). Davidovits, Si:Al oranına bağlı olarak geopolimerin özelliklerini ve uygulamalarını belirlemiştir. Düşük bir Si/Al oranı (1, 2 veya 3), rijit bağları olan üç boyutlu bir ağı başlatır. Yüksek bir Si/Al oranı, 15'den bile yüksek, geopolimer üzerinde lineer polimerik karakter verir [50].

Tablo 2.1. Geopolimer malzemelerin uygulanması [50]

Si/Al molar oranı	Uygulama
1	Tuğlalar, seramikler, yangından korunma
2	Düşük CO ₂ 'li çimento, beton, zehirli atık kapsülleme
3	Yüksek sıcaklık dayanımlı kompozit malzemeler, dökümhane malzemeleri, camelyaf kompozitler
>3	Endüstri için sızdırmazlık ürünleri
20<Si: Al<35	Yangına ve ısıya dayanıklı lifli kompozitler

2.4. Geopolimer Bileşenleri

2.4.1. Hammaddeler

Geopolimer üretmek için, kaynak malzemeler, amorf bir formda silikat (Si) ve Alüminat (Al) partiküllerinin bulunduğu alkali çözümlü alüminosilikat malzemeler olmalıdır. Birçok mineral ve yan ürün malzemesi; metakaolin [50], F sınıfı uçucu kül, doğal mineraller, kalsine edilmiş mineral ve kalsine edilmemiş malzemelerin birleşimi, uçucu kül birleşimi ve granüle yüksek fırın cürufu ve metakaolin birleşimi kaynak malzemesi olarak test edilmiştir.

Metakaolin, kil kaolinitin dehidroksillenmiş formu olan bir puzolanik malzemedir. Geopolimerde metakaolin kullanılmasının avantajı Si/Al oranının kontrol altına alınabilmesine, beyaz rengine ve alkali çözeltisinde yüksek çözünme oranına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, geopolimerde kaynak malzeme

olarak metakaolin kullanılması pahalıdır çünkü 500°C - 700°C civarında bir sıcaklıkta kalsine edilmesi gerekir.

Ayrıca, Davidovits [50], güçlü alkali çözeltisi, su ve alüminyum katyonu ile alüminasilikat oksitten oluşan bir tepkime karışımına belirli miktarda öğütülmüş yüksek fırın cürufu ilave edilerek yüksek erken dayanımlı bir geopolimer elde etmiştir. Cüruf eklenmesiyle, erken sertleşme oluşur ve yaklaşık 1 saat sonra numuneler kalıptan çıkarma durumuna gelebilmiştir. Kalsiyum bileşiklerinin eklenmesinin iki ana etkisi mevcuttur, birinci etki C-S-H veya / ve C-A-S-H oluşması ve aktivasyonu iyileştirmesidir, ikincisi ise bir yük dengeleyici katyon olarak hareket eden bir kalsiyum katyonu (Ca^{2+}) etkisi vardır [57].

Uçucu kül, kömür yanma işleminden elde edilen yan ürün mineralidir, bu nedenle üretim maliyeti açısından bir ayrıcalığa sahiptir. Düşük kalsiyumlu uçucu kül (ASTM'ye göre F sınıfı) Si/Al oranı = 2 olan geopolimer üretmek için kullanılmıştır.

2.4.2. Alkali sıvılar

Geopolimer üretmek için en çok kullanılan çözeltiler, sodyum hidroksit (NaOH) ile sodyum silikat ($NaSi_2O_3$) karışımı veya potasyum hidroksit (KOH) ile potasyum silikat (KSi_2O_3) karışımıdır [50]. Alkali çözeltinin rolü, bağlayıcı malzemeyi aktive etmektir. Reaksiyon oranı, alkali sıvı içinde çözünür silikat varlığında artar, dolayısıyla sodyum silikatın sodyum hidroksite ilavesi sadece çözeltinin maliyetini düşürmez, aynı zamanda aktivasyonu da hızlandırır. Düşük konsantrasyonlu bir aktivatör olarak sadece sodyum hidroksit kullanılması durumunda, OH^- iyonların miktarında azalma ile beraber Si^{4+} ve Al^{3+} 'nin bağlayıcı malzemedan tamamen ayrılmasına ve Na^+ 'daki azalma ile beraber ağır polimerizasyonunun tamamlanamamasına neden olur. Bunlar, bağlayıcı malzemenin reaksiyona girmemiş kısımlarının oluşmasına ve dolayısıyla mukavemet azalmasına neden olmuştur [57].

2.5. Geopolimer Özellikleri

Geopolimer sistemi dört bileşene dayanmaktadır:

- 1- Alkalide çözünebilir alüminosilikat içeren hammaddeler
- 2- Alkali çözültisi olan aktivatör, çözünme ortamı sağlar.
- 3- Katkı maddeleri geopolimer performansını optimize eder.
- 4- Agregalar ve dolgu maddeleri

Bu bölümde önceki çalışmaların bir revizyonu yapılmış, geopolimerin spesifik özelliklerini geliştirmek için farklı katkı maddeleri kullanılmıştır.

Zivica ve ark. [58], taze harç üzerine uygulanan sıkıştırma basıncı ile (tek eksenli basınç dayanımı 300 MPa), basınç dayanımı ve gözeneklilik üzerine düşük bir su / metakaolin (0.08) oranı kullanarak bir araştırma yürütmüştür. Bu birleşimin gözenek yapısının gelişimini hızlandırdığı fark edilmiştir. Elde edilen geopolimer çok yoğun, nano-gözenekli yapıya yakın homojen ve 1 günlük numune için basınç dayanımında yüksek dayanıma sahip olmuştur.

Ferone ve ark. [59] $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ oranının metakaolin tabanlı geopolimer harçların mekanik özellikleri ve mikro yapısı üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yapmıştır. Çeşitli molar oranına ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) sahip dört geopolimer karışımı hazırlamıştır. Karışımların kür süresi, oda sıcaklığında %100 bağıl nem ile yedi gündür. Si/Al =1.75 oranı, karışımların mekanik özelliklerini iyileştirmek ve büzülme azaltmak arasında bir denge sağlayan oran olduğu bulunmuştur. Yüksek Si/Al oranına sahip karışımların, suyun buharlaşması sonucunda oluşan yüksek kapiler su emmelere bağlı olarak kuruma büzülmesi sorununa sahip olma olasılığı daha yüksektir. Daha düşük Si/Al oranlarına sahip numunelerin yapısında ise daha büyük boyutta gözenekler mevcuttur.

Gao ve ark. [60] farklı katı-sıvı oranı (0.97, 1.03, 1.10 ve 1.19) açısından basınç dayanımı üzerinde farklı yüzdelerle (%0, %1, %2 ve %3) nano- SiO_2 eklenmesinin etkisi üzerine bir araştırma yapmıştır. Kür işlemi için, 24 saat boyunca 80°C sıcaklıkta fırında harçlar tutulmuş ve daha sonra mekanik özellikler ve mikroyapı

performansı 1, 7, 14, 28 ve 60 gün sonunda araştırılmıştır. En yüksek dayanım, NS (Nano-SiO₂) =%1 ve katı/sıvı=1.03 iken elde edilmiştir. Katı/sıvı oranı düşük olduğunda sıvı içeriği katı olandan daha yüksek olup alkali çözeltisi ile reaksiyona giren parçacıklar arasındaki temas engellenir, ve böylece alüminosilikatın çözünmesini yavaşlatır, diğer taraftan, artan katı/sıvı oranı ile, reaksiyona girmemiş parçacıklar kalır ve polimerizasyon işlemi tamamlanamaz ve bu da basınç dayanımını azaltır.

Kür koşullarının metakaolin tabanlı geopolimerin eğilme ve basınç dayanımları ve mikroyapıları üzerindeki etkileri Chen ve ark. tarafından incelenmiştir [61]. Numuneler farklı sıcaklıklar (20°C, 40°C, 60°C, 80°C ve 100°C) ve farklı kür süreleri (24 saat, 72 saat ve 168 saat) ile kür edilmiş ve ilk 12 saatte %50±5'e eşit bir bağıl nem uygulanmıştır. Sonuçlar, en iyi basınç dayanımının, 60°C'de 168 saat süreyle kür edilen numunelerde olduğunu göstermiş, çünkü kür sıcaklığının artırılması, alüminosilikatın çözünmesini hızlandırmış ve bu da jelin oluşumunu hızlandırmıştır, ancak yüksek kür sıcaklığı, geopolimerizasyon reaksiyonunu tamamlamak için gerekli nemde bir kayıp oluşmasına neden olmuştur.

Ayrıca, Rovnanik [62], 1, 3, 7 ve 28 gün sonundaki metakaolin tabanlı geopolimer numunelerinin mekanik özellikleri üzerinde sıcaklık ve kür süresi etkisini araştırmıştır. Sodyum silikatın silikat modülü 1.39'dır. Numuneler, 4 saat boyunca farklı sıcaklıklarda (10°C, 20°C, 40°C, 60°C ve 80°C) kür edilmiş ve daha sonra oda sıcaklığında (20°C) %45 nem ile saklanmıştır. Yüksek kür sıcaklığının, reaksiyonun erken yaşlarında bile, yapının oluşumunu hızlandırdığı bulunmuştur. Ancak hızlı oturma kısıtlaması, karışımın kompakt bir kıvama sahip olmasını engellemiştir. Tersine, düşük sıcaklıktaki kür edilmiş numunelerde dayanım gelişmesinde gecikme oluşmuş; hedef dayanımı 28 günde kazanmıştır. Bu sonucun nedeni, erken yaşlarda geopolimerizasyon ürünlerindeki artışa bağlı olarak basınç dayanımının sıcaklık ile birlikte artmasıdır. Bununla birlikte, geç yaşlarda, geopolimerizasyon ürünlerinin kalitesi baskın kriterdir. Düşük sıcaklıkta geopolimer yavaş yavaş gelişir ve daha sonra porozite ve sıkıştırma açısından kalitesi daha iyi olur.

Cürufun, mekanik ve mikroyapısal özellikler üzerindeki etkisi Soleimani ve ark. tarafından incelenmiştir [63]. Çalışma metakaolin ile fosfor cürufu farklı ağırlık yüzdesi ile (% 10-100) ikame edilerek gerçekleştirilmiştir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün molar oranı 0.8 ve katı oranı (sıvı/katı) = 0.53 tür ve kür oda sıcaklığında yapılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, cürufun metakaolin yerine en iyi ikame oranı ağırlıkça %40'tır ve 28 gündeki basınç mukavemetindeki artış %14.5'e ulaşmıştır. Hem geopolimer jelin hem de C-A-S-H jelin birlikte bulunması, mekanik mukavemette artışa yol açmıştır, ancak çalışma aynı zamanda, 7 gün içinde C-S-H'nin çökmesinin ve oluşan geopolimerin jelin düşük miktarının, basınç dayanımında bir azalmaya neden olduğu da gözlemlenmiştir.

Bernal ve ark. [64] metakaolin/cüruf tabanlı geopolimerin termal karakterizasyonunu araştırmışlardır. Çalışma, farklı bir Si/Al molar oranı ile farklı cüruf/(cüruf + metakaolin) oranlarını kullanmış ve kür, 24 saat boyunca %90'dan fazla bağıl nemde 60°C 'de yapılmıştır. Numuneler yüksek sıcaklıklara (200 , 400 , 600 ve 1000°C) maruz bırakılmış ve ısısal etkilenmenin ardından kalan basınç dayanımı ölçülmüştür. Sonuçlar, katkısız metakaolin bağlayıcısına kıyasla katkılı Ca-zengin ürünlerinde yapısal değişikliklerin yapılması için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulabildiğini göstermiştir, ancak katkısız sistem, 1000°C 'ye ulaşan bir sıcaklığa maruz kaldıktan sonra daha yüksek kalıcı basınç dayanımı göstermiştir çünkü 1000°C 'de geopolimer jelin bir sonucu olan alumina silikat camı, kalsiyumun C-S-H jeli oluşumundan kaynaklanan geopolimer jel ile karıştırılması ile azaltılmıştır.

Behera ve ark. [65], yüksek sıcaklığa (200°C , 400°C ve 800°C) maruz kaldıklarında bazalt mikrofibril geopolimer kompozitlerin özelliklerini incelemişlerdir. Üç farklı bazalt mikrofibril oranı geopolimer karışıma ilave edilmiş (ağırlıkça %5, %10 ve %15) ve kür 28 gün boyunca bağıl nem (70 ± 10) ile ortam sıcaklığında (20°C) yapılmıştır. Bazalt mikrofibrillerle takciye edilmiş geopolimerin basınç dayanımı, lifsiz geopolimere göre daha yüksek olmuştur. Lifli numunelerin dayanımındaki bazalt mikrofibrillerin etkisiyle gelişme, dolayısıyla dolgu macununda daha yoğun mikro yapı oluşmuş, bununla birlikte, süresiz gözeneklere ve 200°C 'de serbest suyun buharlaşmasından dolayı geopolimerin dehidratasyon büzülmesine bağlı

olarak, sıcaklığın 200°C'ye kadar artmasıyla dayanım artmıştır. Çalışmada, bazalt mikrofibril katkılı geopolimerlerin termal kaplamalar açısından yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun olabileceği ileri sürülmüştür.

Rill ve ark. [66], doğranmış bazalt lifin potasyum tabanlı geopolimerin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisi üzerine bir çalışma yapmışlardır. Geopolimer farklı oranlarda bazalt lifiyle üretilmiş (%1, %3, %5, %7 ve %10) ve daha sonra harçlar 24 saat 50°C'de fırında sabit bir sıcaklıkta kür edilmiştir. Doğranmış bazalt lifin, 1 saat boyunca 500°C'ye maruz kalırken dehidratasyon üzerine geopolimerin çatlamasının geciktirilmesine katkıda bulunduğu, ayrıca lifin ağırlıkça %1 olarak bile eklenmesinin küçük olmasına rağmen, göze çarpan bir iyileşme sağladığı bulunmuştur.

Polivinil alkol lifi ile kür sıcaklığının metakaolin tabanlı geopolimer üzerindeki etkisi Ekaputri ve ark. tarafından araştırılmıştır [67]. Lifler, hamur hacminin bir oranı (%0.3, %0.6 ve %1) olarak ilave edilmiş ve kür, 24 saat boyunca üç farklı sıcaklıkta (40°C, 60°C, ve 80°C) gerçekleştirilmiş ve referans numunesi ise oda sıcaklığında kür edilmiştir. Çalışmaya göre, %1 lifli ve 80°C'de kür edilen numuneler, geopolimerizasyon reaksiyonunun hızlanmasından dolayı en yüksek basınç dayanımını göstermiştir. Aynı numune, aynı zamanda lifin eğilme mukavemetini geliştirmede daha fazla katkı sağladığı için en yüksek eğilme mukavemeti değerini sergilemiştir. PVA lif, hamurun dayanımını artıran toplam gözeneklerin azaltılmasına katkıda bulunmuştur. Çalışma, geopolimerin sünekliliğini artırmak için hacimce %0.6'ya kadar lif kullanılmasını önermiştir çünkü tavsiye edilen orandan daha fazla ilave edilmesi, taze harcın sıkıştırma sorununa neden olmaktadır.

Zhang ve ark. [68] metakaolin ile uçucu külü kısmi olarak değiştirerek geopolimer üretmiş ve yüksek sıcaklık altında eğilme ve basınç mukavemetini gözlemlemek için doğranmış karbon fiber eklemiştir. Metakaolin yerine uçucu kül beş farklı oranda (%0, %20, %50, %75 ve %100) kullanılmış ve dört farklı kütle içeriği (%0, %0,5, %1 ve %2) ile doğranmış karbon fiber bağlayıcıya katılmış ve kür koşulu olarak 7 gün boyunca %95 nem elde etmek için 22°C'de bir depoda tutulmuştur. Çalışma

sonucunda karbon fiberin sıcaklık aralığı boyunca yüksek sıcaklık altında çatlak mekanizması üzerinde gözlem yapıldığında metakaolin tabanlı geopolimerin eğilme mukavemetini olumlu etkilediği sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, 500°C'ye kadar olan sıcaklık artışı ile eğilme dayanımı üzerinde iyileşmeler azalmıştır. %50 metakaolin ve %50 uçucu kül ile yapılan geopolimer, %2 oranında karbon lifin eklenmesiyle, hem ortam sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra, karışımın yangına dayanıklılık uygulamalar için uygun hale getirilmesi sonucu, eğilme ve basınç mukavemeti açısından olumlu sonuçlar göstermiştir.

Aponte ve ark. [69], eklenen TiO_2 partikülleri ile metakaolin tabanlı geopolimerin fiziksel-mekanik özellikleri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, üç farklı sıvı/katı oranı (0.35, 0.40 ve 0.45) ve bağlayıcı ağırlığının iki farklı titanyum yüzdesi (%5 ve %10) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan alkali çözelti, potasyum hidroksit (KOH) ve potasyum silikatın (KSi_2O_3) bir karışımı olup, 2.5'e eşit bir SiO_2/Al_2O_3 molar oranı sahip ve numuneler 48 saat 60°C'de kür edilmiştir. Çalışma sonucunda, sıvı içeriğini artırma, karışımlardaki geçirgen gözenekleri artırmış ve bu da geopolimerin performansını düşürmüş, diğer taraftan TiO_2 partiküllerinin eklendiğinde sıvı/katı = 0.35 karışımındaki gözenek hacmini azalttığı sonucuna varılmıştır. TiO_2 'nin (%5 ve %10) düşük sıvı/katı mukavemet oranlarına eklenmesiyle basınç mukavemeti yükseltmiş, TiO_2 partiküllerinin küçük boyutu sayesinde reaksiyon ürünlerinin oluşumunu artırmıştır.

Lahoti ve ark. [70], Si/Al oranının metakaolin tabanlı geopolimerin yüksek sıcaklıklara maruz kalma gücüne olan etkisini incelemişlerdir. Sonuçlara göre, 900°C'ye ulaşan bir sıcaklığa ısıtılması durumunda basınç dayanımında bir düşüş görülmüştür. Çalışmaya göre, basınç mukavemetinde başlangıçta bir azalmanın, daha sonra sıcaklık 300°C olduğunda Si/Al oranının artmasıyla bir artışa dönüştüğü gözlenmiştir. Bu duruma göre, Si/Al oranı 1.5'ten küçük olan numunelerde, mukavemetin baskın faktörü, termal büzülmenin çatlaklarıdır. Molar oranı >1.5 olan karışımlarda yoğunlaştırma matrisi, numuneye kalıcı mukavemet sağlar. 900°C'de tüm numuneler zararlı çatlaklara sahip olmuş ve sadece 1.75'e eşit Si/Al oranı ile karışım, mikro-çatlakların sabitlenmesini ve karışımların iç yapısının yoğunlaşmasını

sağlayan yüksek silis/alümin oranına sahip numunelerin viskoz sinterlenmesi nedeniyle 6 MPa'ya eşit en iyi mukavemete sahip olmuştur.

Zhang ve ark. [71] farklı oranlarda reçinelerle metakaolin / granüle yüksek fırın cürufu tabanlı geopolimerin performans ve hidrasyon mekanizması üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir (%1, %5, %10 ve %15). Geopolimer harçlar, %99 bağıl nem ile 20°C'de kür kutusunda kür edilmiştir. Reçinelerin %1 olarak eklenmesi eğilme ve basınç mukavemeti açısından en yüksek sonuçları vermiştir, çünkü reçineler su buharlaşmasını geciktirerek mikro çatlakları doldurma yeteneğine sahiptirler ayrıca çatlakların büyümesini engeller ve gevrek geopolimer matrisin kırılma tokluğunu artırır.

Villaquiran ve ark. [72], potasyum hidroksit ile farklı silis kaynaklarının ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = 2.5$ sabit oranlı potasyum silikat, pirinç kabuğu külü ve silis dumanı) bir karışımı olan alkali aktivatör ile aktive edilen metakaolin tabanlı geopolimerin termal değerlendirmesini rapor etmişlerdir Basınç dayanımı (300°C ve 1200°C) arasındaki farklı yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ölçülmüş ve numuneler %90 bağıl nem ile 20 saat boyunca 75°C'de kür edilmiştir. Sonuçlar, potasyum silikatın yerine %50 oranında ikame olarak pirinç kabuğu külü kullanılması en iyi termomekanik performans ve 1200°C'ye maruz kaldıktan sonra kalıcı basınç mukavemetinin %44'ü koruması nedeniyle tavsiye edilmiştir.

Lifli malzemelerin arzu edilen fiziksel ve mekanik özellikleri, kristal fazların homojen ve ince dağılımına atfedilir. Bu istenen mikroyapı, TiO_2 , ZrO_2 veya P_2O_5 gibi bir çekirdeklendirici ekleyerek elde edilebilir. Bununla birlikte, bazalt kayaları, erime işlemi sırasında Fe_3O_4 gibi doğal bir çekirdeklendiriciye gerek duymaz ama üretir, bu nedenle benzer mikroyapıyı elde etmek için çekirdeklendiricinin gerekli olduğu diğer liflere göre avantajlar sağlar [73, 74]. Kong ve ark. [75], yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra metakaolin ve uçucu kül ile yapılan geopolimerlerin karşılaştırmalı performansını araştırmıştır. Metakaolin geopolimer kompozitin, 800°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra dayanım kaybına uğradığını

bildirmişlerdir. Deneysel test sonuçları, metakaolin ile sentezlenen numunelerde 300°C'de %34'lik bir mukavemet düşüşü göstermiştir [75].

Almashhadani ve ark. lif takviyeli uçucu kül tabanlı geopolimer kompozitlerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini incelemiştir [1]. PVA lif katkısının, kontrol karışımına kıyasla geopolimer numunesinin eğilme dayanımını 28 günde %39.84 oranında geliştirdiğini göstermişlerdir. Natali ve ark. çeşitli lifler içeren metakaolin tabanlı lif takviyeli geopolimerlerin eğilme davranışlarını incelemiştir. Tüm lifler geopolimerlerin eğilme mukavemetinde gelişme göstermiştir. En dikkate değer sonuç olarak PVA lif takviyeli geopolimerler, çatlama sonrası süneklikte önemli iyileşme ile birlikte, eğilme mukavemetinde yaklaşık %62'lik bir artış göstermiştir [76].

Amuthakkannan ve ark. kısa bazalt lif takviyeli polimer matris kompozitlerinin mekanik özellikleri üzerine lif uzunluğu ve lif içeriğinin etkisini araştırmak için bir araştırma gerçekleştirmiştir. İncelemeler sonucunda, lif içeriği arttıkça eğilme mukavemetinin anlamlı olarak arttığı bildirilmiştir [21]. Dias ve Thaumaturgo, bazalt liflerle güçlendirilmiş geopolimer betonların eğilme dayanım özelliklerini incelemiştir. Lif içeriğinin her artışında aynı zamanda eğilme mukavemetinde bir artış olmuş, %1.0'lık bir hacim oranı olarak bazalt liflerin eklendiğinde geopolimerlerin eğilme mukavemetinin lifli olmayan numunelere kıyasla %23.80 oranında arttığını bildirmişlerdir [26].

Bir çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz polivinil alkol lifi içeren geopolimer betonun mekanik özellikleri araştırılmıştır. Geopolimer betonlar 20°C, 400°C, 600°C ve 800°C'ye maruz bırakılmışlardır. PVA lif, uçucu külün kütlelerinin %0, %1 ve %2 oranında kullanılmıştır. 20°C'ye maruz bırakılan %1'lik bir oran olarak PVA katkılı numunenin eğilme mukavemeti, kontrol numunesininkinden %28 daha fazla olmuştur. 400°C'de, aynı lif miktarındaki PVA katkılı numunelerin eğilme mukavemeti, kontrol numunesininkinden %4 daha fazla çıkmıştır. Kontrol numunesine kıyasla eğilme mukavemeti azalması, %2 oranında PVA lif içeriğine sahip numune için 600°C'de %48, 800°C'de %69 olmuştur [31]. Bu bulgular mevcut araştırmanın sonuçları doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Kabay [77], bazalt lifli betonların aşınma direnci ve kırılma enerjisi ile ilgili bir çalışma yürütmüştür. Bu çalışma ile bazalt liflerin dahil edilmesinin, aşınma direnci açısından betonlara önemli katkılar sağladığı bildirilmiştir. Bazalt lifleri ayrıca, betonun aşınmasında %2 ile %18 arasında azalma sergilemiştir. Lif içeriği ve lif uzunluğundaki artış da aşınmaya karşı direncin artmasına katkıda bulunmuştur.

2.6. Literatür İncelemesinin Özeti

Geopolimer, Fransız bilim adamı “Davidovits” tarafından sağlamlığı, sertliği ve diğer mekanik özellikleri nedeniyle geleneksel çimento yerine yeni bağlayıcı olabilecek alternatif ve çevre dostu bir malzeme olarak sunulmuştur. Geopolimer üretimi daha az enerji gerektirir ve neredeyse %80-90 daha az CO₂ yayar. Geopolimerin önemli özelliklerinden biri erken yaş mukavemeti olup, karıştırmadan sonraki ilk 4 saat içinde basınç dayanımı nihai hedefinin %70'ine ulaşır.

Literatüre dayanarak, basınç mukavemeti, daha yüksek bir alkali çözeltisi konsantrasyonu, kütlece daha yüksek aktivatör çözeltisi/bağlayıcı oranı, daha yüksek kür sıcaklığı ve daha uzun kür süresi kullanılarak artar. Geopolimerin bir diğer önemli özelliği malzemenin yangına maruz kaldığında çatlama olmadan büyük uyum sağlayan, yüksek ısı direncine sahip olmasıdır.

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Genel Bilgi

Bu bölümde, malzemelerin kimyasal bileşimi, karışım oranları, geopolimer üretim süreci ve kür koşulları hakkında bilgi sunulmuştur.

3.2. Malzemeler

Metakaolin tabanlı geopolimer harçlar metakaolin, kolemanit, cüruf, alkali çözeltiler, kum kullanılarak üretilmiş ve ayrıca bazalt, polivinil alkol, poliamid ve poliolefin lifleri eğilme mukavemetini artırmak için kullanılmıştır.

3.2.1. Metakaolin (MK)

Bu araştırmada kullanılan metakaolin, Kaolin Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A.Ş. (İstanbul, Türkiye) şirketinden elde edilmiştir. Metakaolin (Şekil 3.1.), $1359 \text{ MgCa(OH)}_2/\text{g}'\text{lük}$ puzolanik endeksine ve 2.52 gr/cm^3 'lük özgül ağırlığa sahiptir. Metakaolin bileşeninin kimyasal analizi ve fiziksel özellikleri, Tablo 3.1.-3.2.'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Metakaolinin elde edilen SEM görüntülerinin farklı oranda büyütülmüş halleri Şekil 3.2.-3.3.'te verilmiştir.

Tablo 3.1. Metakaolinin kimyasal bileşenlerinin analizi

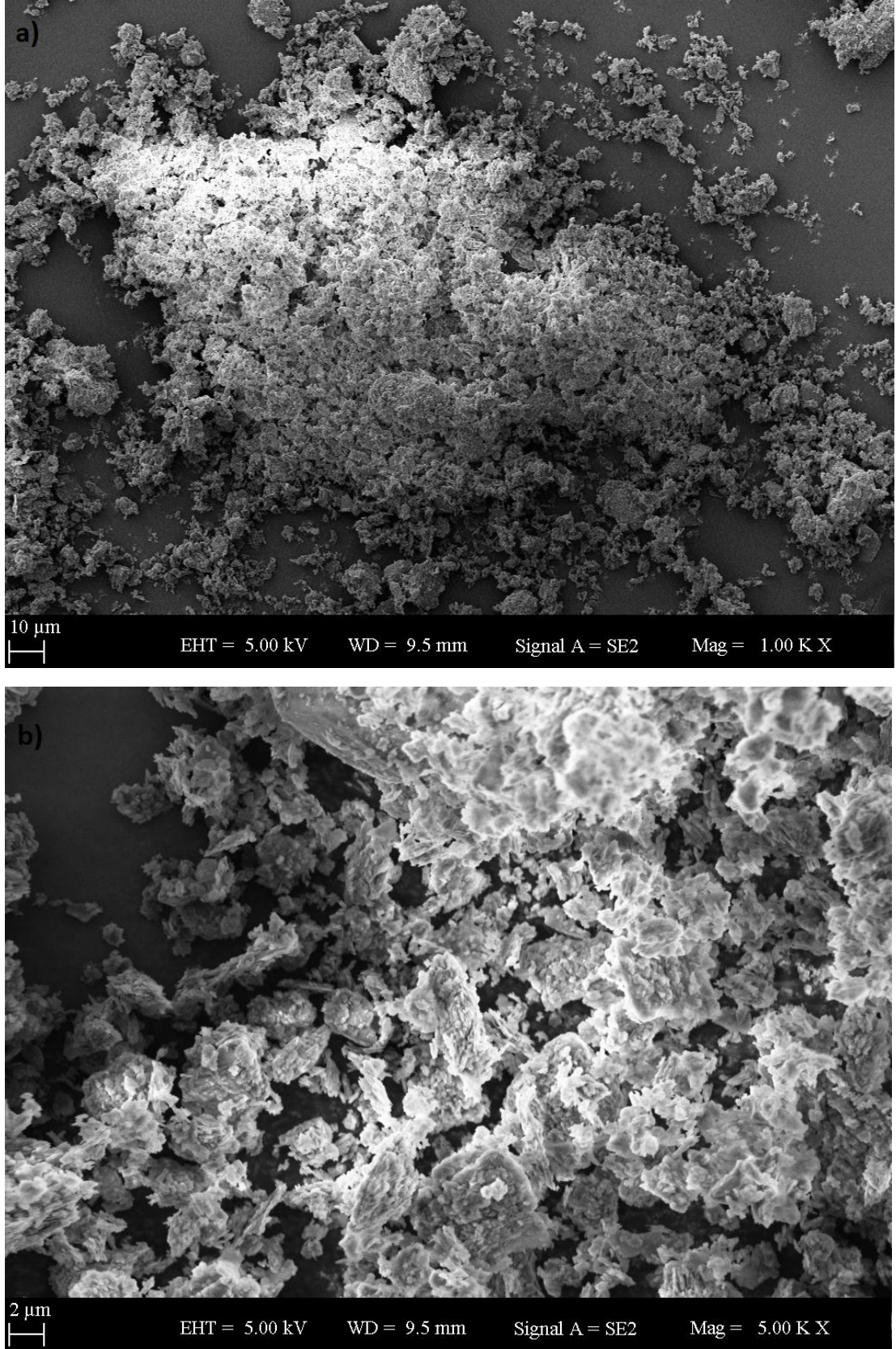
Bileşenler, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Kızdırma Kaybı
Metakaolin	56,10	40,25	0,85	0,55	0,19	0,16	0,55	0,24	-	1,11

Tablo 3.2. Metakaolinin fiziksel özellikleri

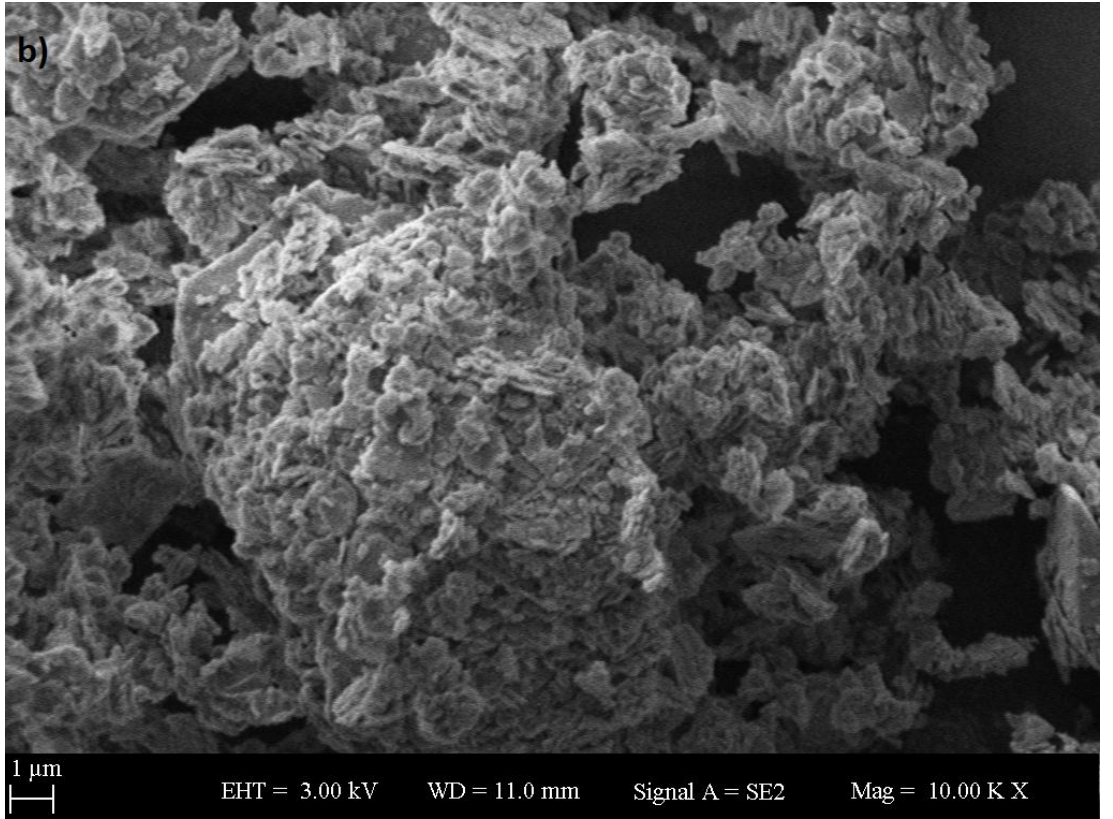
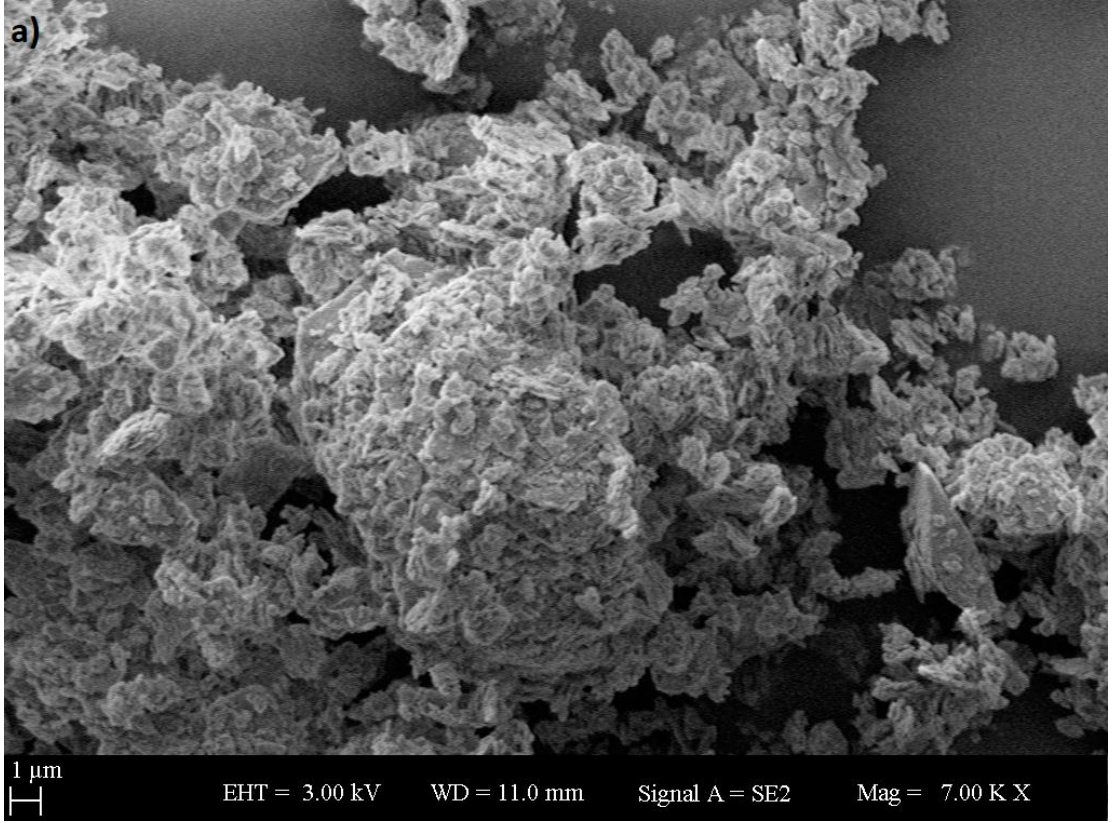
No	Özellikler	Test sonuçları
1	Metakaolinin özgül ağırlığı	2,52
2	İncelik, yüzde 45 μm elek üzerinden geçen	%99,3
3	İncelik, yüzde 20 μm elek üzerinden geçen	%96,9



Şekil 3.1. Metakaolin



Şekil 3.2. Metakaolin numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş



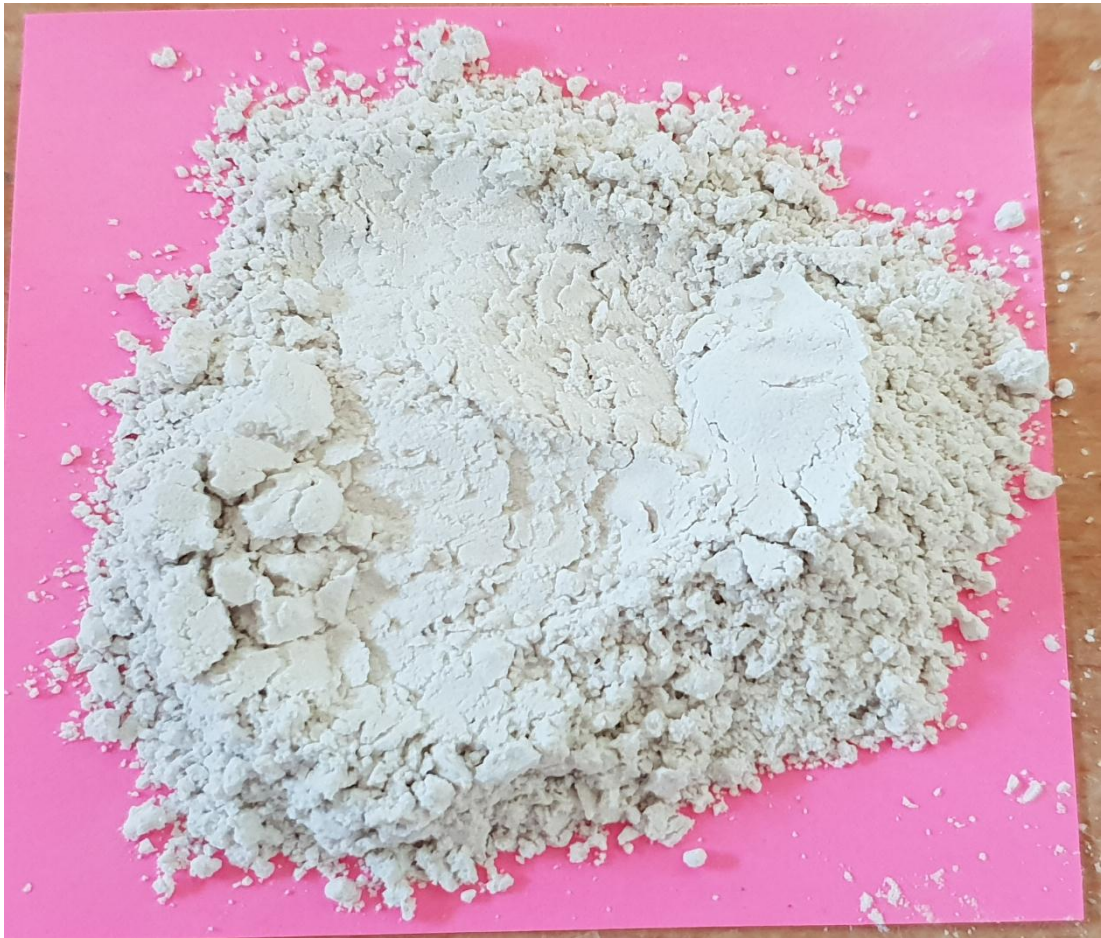
Şekil 3.3. Metakaolin numunesinin SEM görüntüleri: a) 7000 kez büyütülmüş b) 10000 kez büyütülmüş

3.2.2. Kolemanit (K)

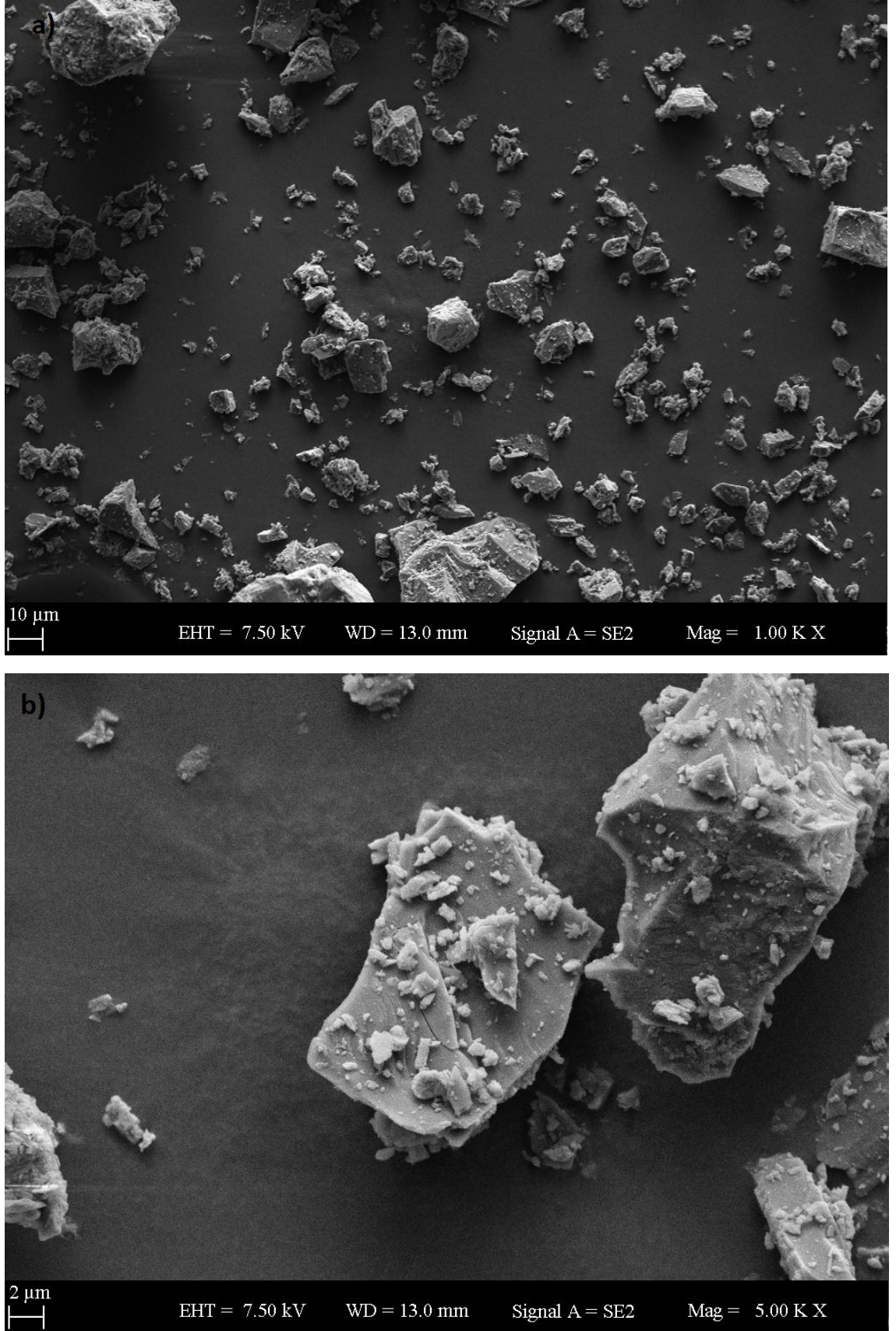
Kolemanit (Şekil 3.4.), Eti Maden Bigadiç Bor işletmesinden elde edilmiştir. Özgül ağırlığı 2.42 gr/cm^3 'tür ve kolemanitin kimyasal analizi Tablo 3.3.'te gösterilmiştir. Kolemanitin elde edilen SEM görüntülerinin farklı oranda büyütülmüş halleri Şekil 3.5.-3.6.'da verilmiştir.

Tablo 3.3. Kolemanit numunesinin kimyasal analizi

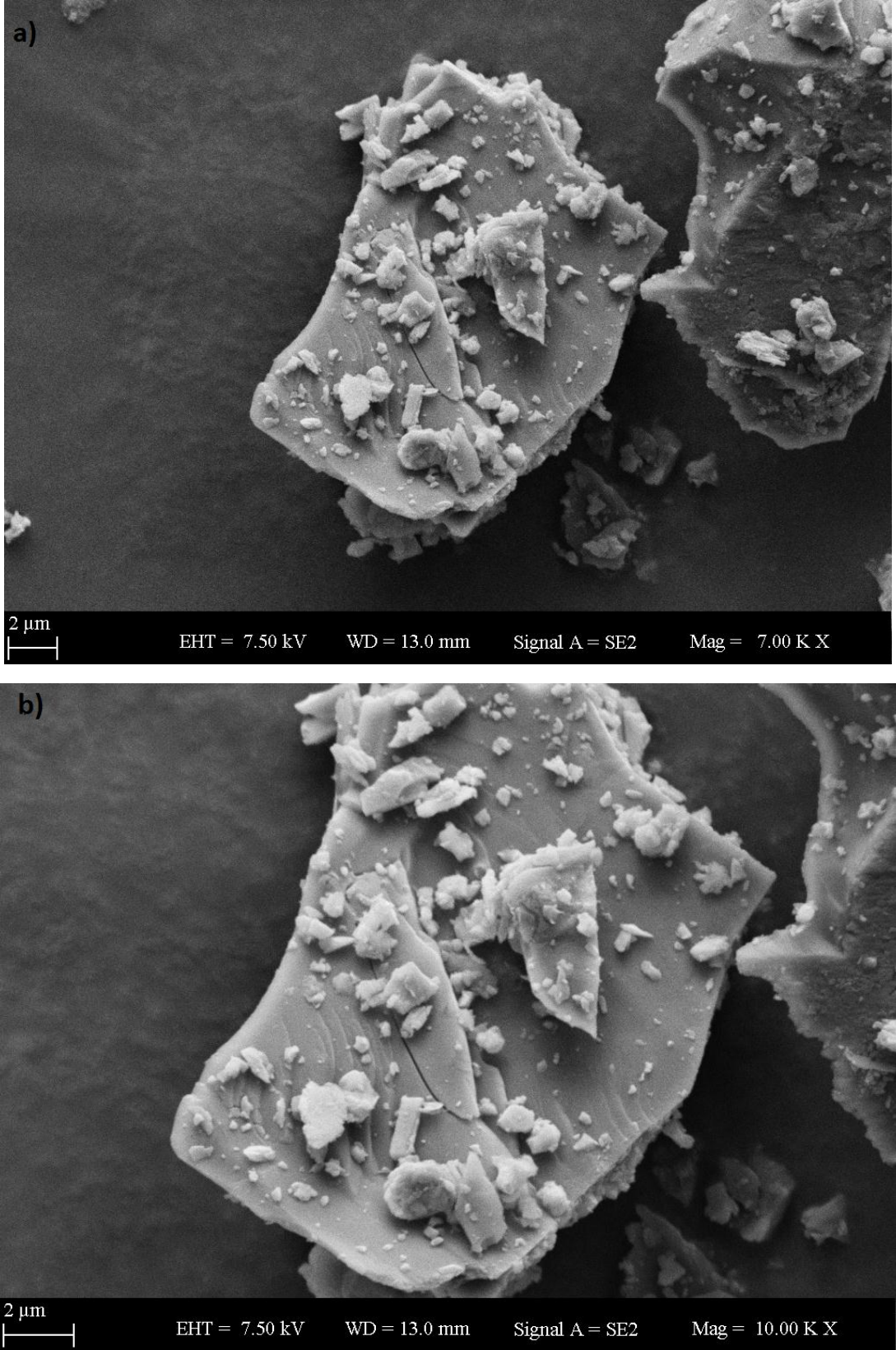
Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Kızdırma Kaybı
%	5,00	0,40	0,08	-	27,00	3,00	-	0,50	40,00	25,00



Şekil 3.4. Kolemanit



Şekil 3.5. Kolemanit numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş



Şekil 3.6. Kolemanit numunesinin SEM görüntüleri: a) 7000 kez büyütülmüş b) 10000 kez büyütülmüş

3.2.3. Granüle yüksek fırın cürufu (GYFC)

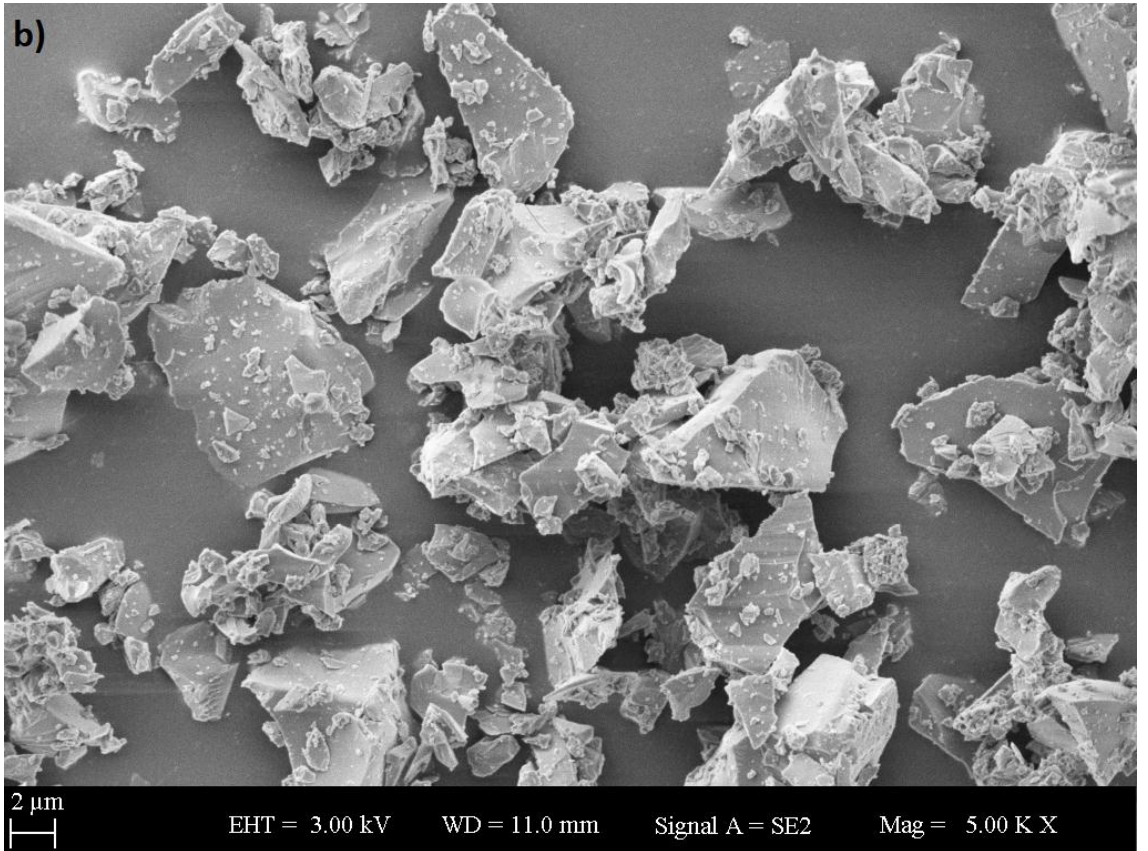
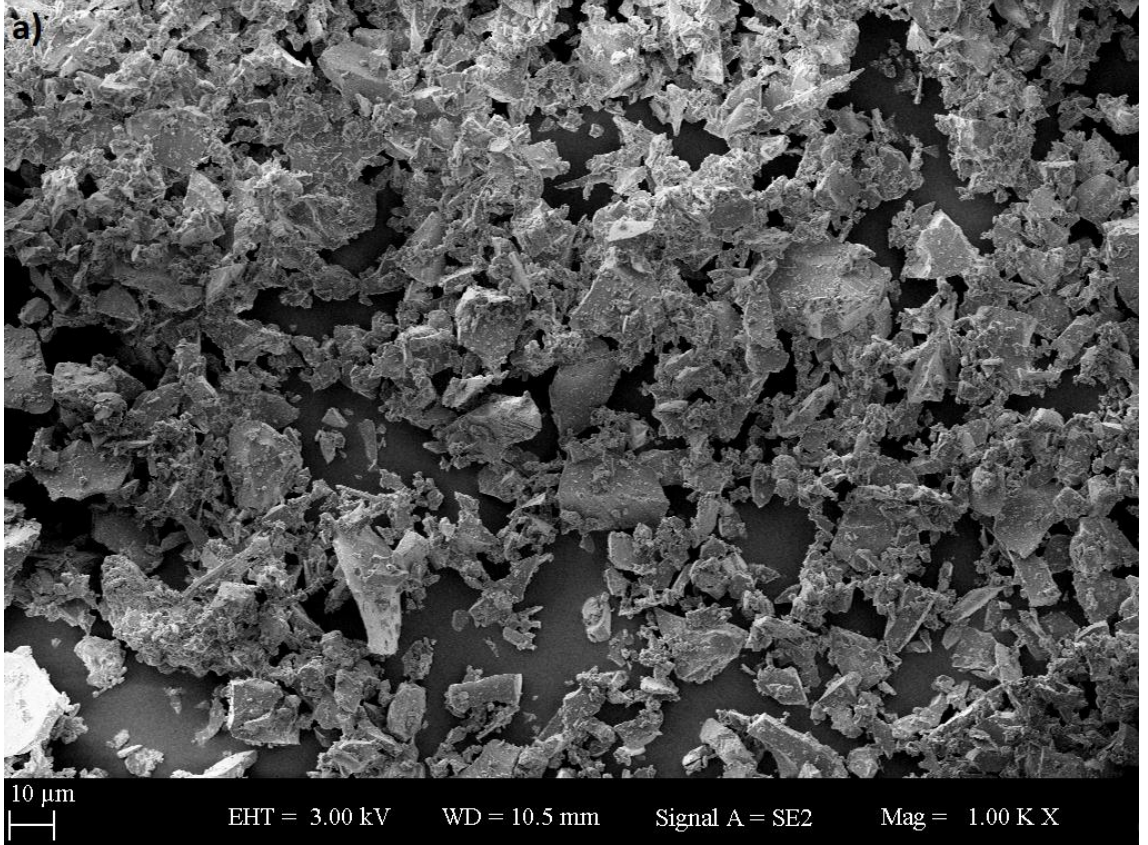
Cüruf (Şekil 3.7.), geopolimer üretim süreci içinde sabit bir miktarda (60 gr) kullanılmıştır. Cürufun özgül ağırlığı 2.91 gr/cm^3 olup ve kimyasal bileşimi Tablo 3.4.'te gösterilmiştir. Cürufun elde edilen SEM görüntülerinin farklı oranda büyütülmüş halleri Şekil 3.8.-3.9.'da verilmiştir.

Tablo 3.4. Granüle yüksek fırın cürufu numunesinin kimyasal bileşimi

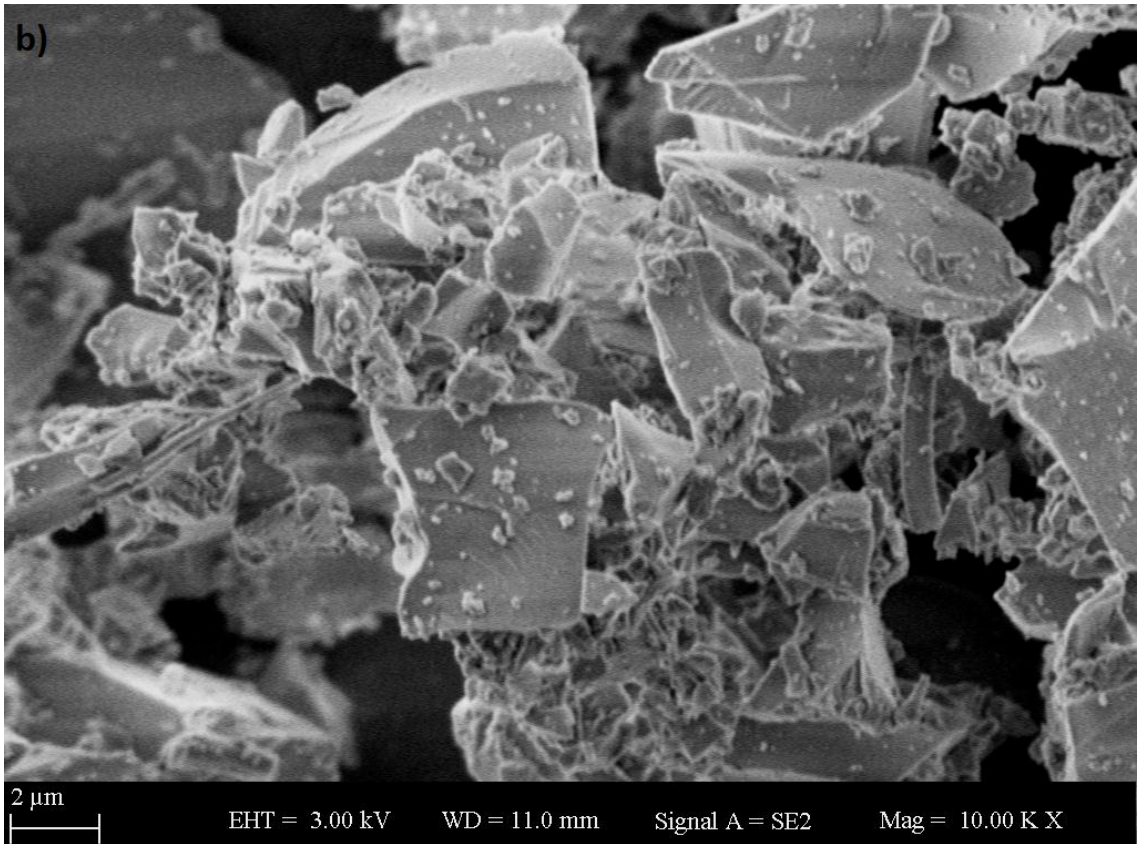
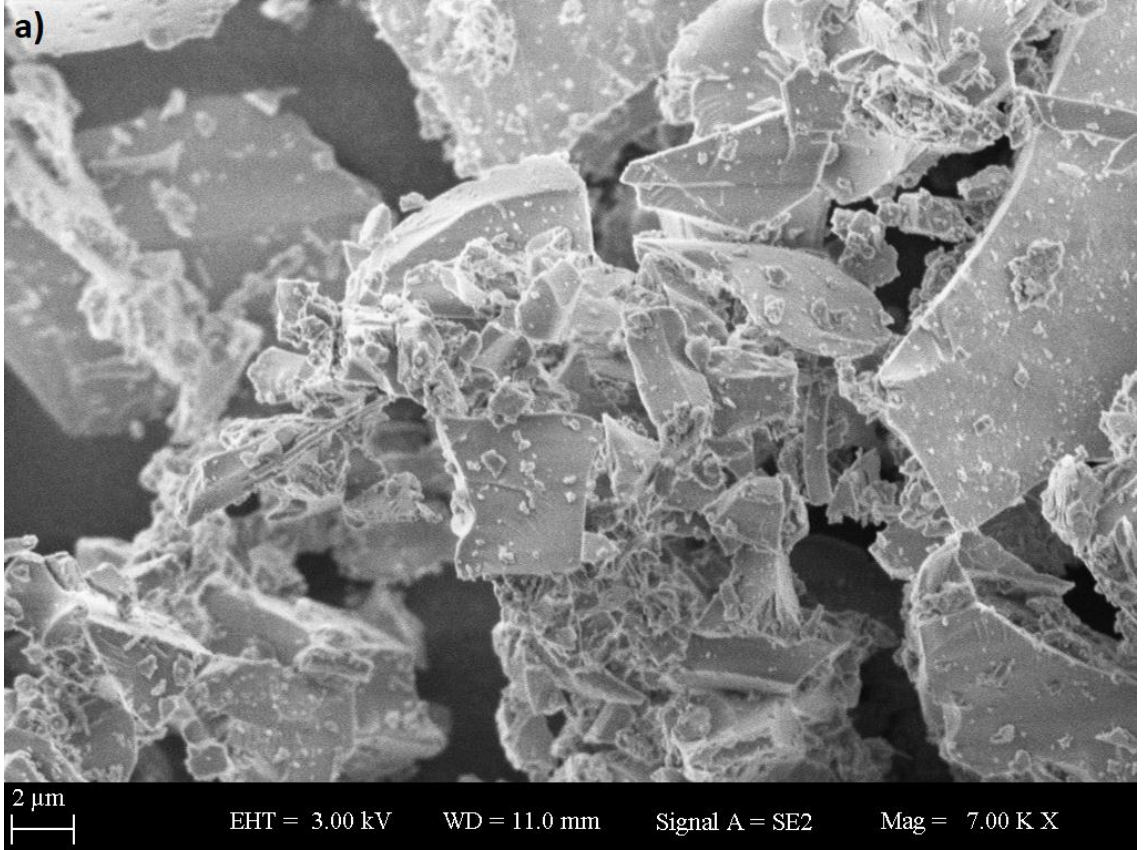
Bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	B ₂ O ₃	Kızdırma Kaybı
%	40,60	12,83	1,37	0,75	36,08	6,87	0,68	0,79	-	0,03



Şekil 3.7. GYFC numunesi



Şekil 3.8. Cüruf numunesinin SEM görüntüleri: a) 1000 kez büyütülmüş b) 5000 kez büyütülmüş



Şekil 3.9. Cüruf numunesinin SEM görüntüleri: a) 7000 kez büyütülmüş b) 10000 kez büyütülmüş

3.2.4. Standart rilem kumu

Bu çalışmada TS EN 196-1 ve Rilem Cembureau standardına karşılık gelen standart kum kullanılmıştır (Şekil 3.10.). Tane boyutu dağılımı ve standart limit değerleri eleme ile tane boyutu analizi ile belirlenmiş ve Kumun elek analizi Tablo 3.5.'te sunulmuştur.

Tablo 3.5. Kumun granülometrisi ve standart sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0.08	0.16	0.5	1.0	1.6	2.0
Kalan (%)	99	87	72	34	6	0
Sınır (%)	99±1	87±5	67±5	33±5	7±5	0



Şekil 3.10. Standart rilem kumu

3.2.5. Aktivatör çözeltileri

Aktivasyon işleminde kullanılan alkali çözelti, sodyum hidroksit çözeltisi ve sodyum silikat çözeltileri karıştırılarak hazırlanmıştır. Merck firmasından alınan NaOH çözeltisi 12M'lik konsantrasyonla damıtılmış su içinde NaOH parçacıklarının (% 99 saflıkta) eritilmesi ile hazırlanmıştır (Şekil 3.11.). NaSi_2O_3 çözeltisi, $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}=3.29$ molar oranına sahip olup Merck firmasından temin edilmiştir ($\text{Na}_2\text{O} = \%8.2$, $\text{SiO}_2=\%27.0$). Tez çalışmasında, sodyum silikat çözeltisi/sodyum hidroksit çözeltisi oranı 2 olarak karışım yapılmıştır. Sodyum hidroksitin (Şekil 3.12.) ve sodyum silikatın (Şekil 3.13.) kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 3.6.-3.7.'de verilmiştir.

Tablo 3.6. Sodyum hidroksitin özellikleri

NaOH	Na_2CO_3	Cl	SO_4	Al	Fe
99,1	0,3	$\leq 0,01$	$\leq 0,01$	$\leq 0,002$	$\leq 0,002$

Tablo 3.7. Sodyum silikatın özellikleri

Na_2O (%)	SiO_2 (%)	Yoğunluk (gr/ml) (20°C)	Fe (%)	Ağır metaller (Pb gibi) (%)
8,2	27,0	1,360	$\leq 0,005$	$\leq 0,005$



Şekil 3.11. Sodyum hidroksit kimyasal çözeltisinin hazırlanması

3.2.6. Kullanılan lifler

Bu çalışmada poliolefin lifi, bazalt lifi (Şekil 3.14.), modifiye poliamid lifi ve polivinil alkol lifi (Şekil 3.15.) kullanılmış olup ayrıntıları Tablo 3.8.'de sunulmaktadır. Liflerin özellikle eğilme dayanımları üzerine etkisi incelenmiş, yüksek sıcaklık ve aşınma direnci deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.8. Kullanılan liflerin özellikleri

Lif Tipi	Uzunluk (mm)	Çap (μm)	Özgül Ağırlık	Çekme (Mpa)	Dayanımı
Poliolefin	10	63	0.90	275	
Bazalt	12	20	2,73	4100	
Modifiye Poliamid	10	55	1,14	900	
PVA	8	39	1,3	1620	



Şekil 3.14. Polivinil alkol lifi



Şekil 3.15. Bazalt lifi

3.3. Tez Kapsamında Yapılan Deneysel Çalışmalar

Tez kapsamında basınç dayanımı için 50mm'lik küp numuneler ve eğilme dayanımı için 40 mmx40 mmx160 mm prizma numuneler üretilmiştir. Üretilen geopolimer karışımlarının ultrases geçiş hızı, boşluk oranı, birim hacim ağırlık, su emme testleri yapılmıştır. Ayrıca aşınma direnci ve yüksek sıcaklık direnci testleri yapılmıştır. Numunelerin SEM analizleri de yapılmıştır.

3.3.1. Basınç dayanımı testi

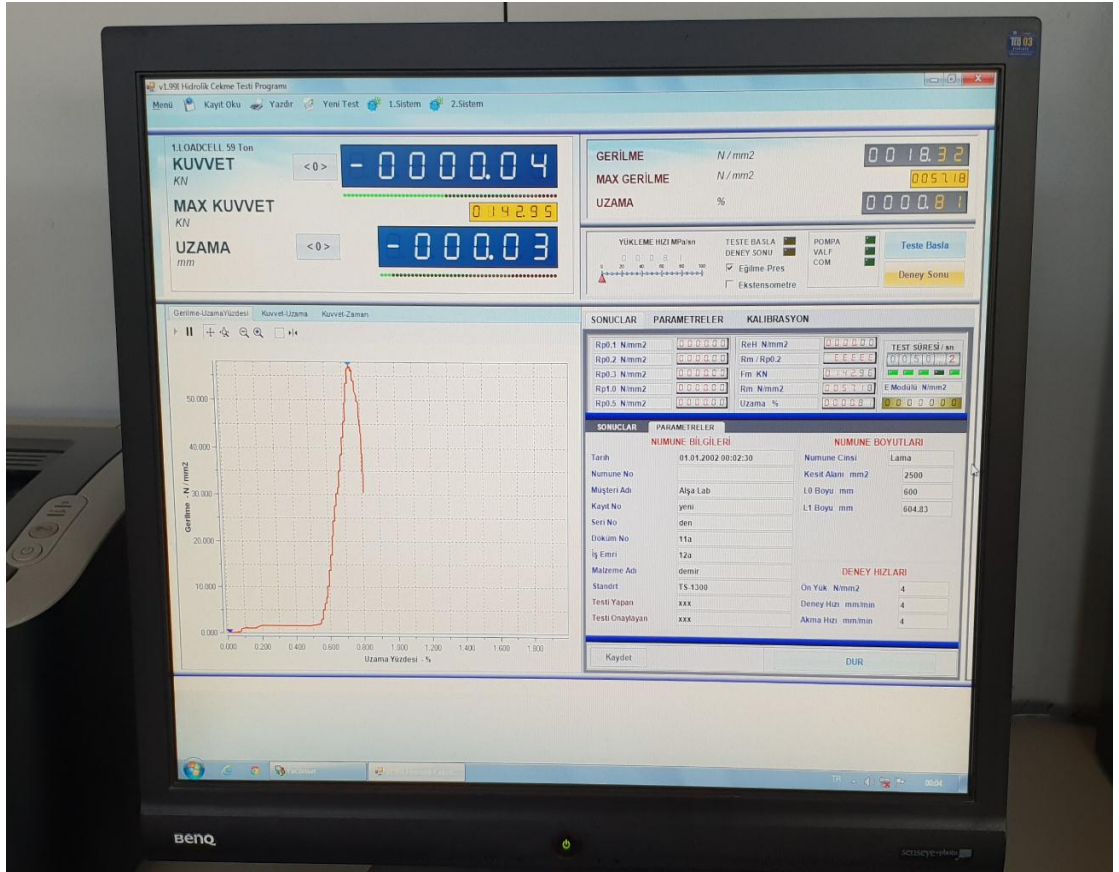
Basınç dayanımı testi ASTM C 109'a [78] göre 3., 7. ve 28. günlerde küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Her karışım için basınç dayanımı testinde üç küp numune kullanılmış ve üç test sonucunun ortalaması alınmıştır. Şekil 3.16.-3.17.'de gösterildiği gibi basınç mukavemet deneyi gerçekleştirilmiştir. Standart özellikleri

uyarınca bir ± 0.1 mm yer değiştirme ve ± 0.2 mm doğruluk ile 35 ton yükleme kapasiteli test makinesi kullanılmıştır.

ASTM standartlarına göre basınc dayanımı sonucu hesaplanırken, aşağıdaki eşitlik (Denklem 3.1) basınc dayanımı hesaplanmasını göstermektedir:

$$\text{Basınc Dayanımı} = P/A \quad (3.1)$$

Basınc mukavemeti MPa cinsinden llr, P kN cinsinden test edilen numunenin maksimum yüküdür ve A numune yüzeyinin alanıdır.



şekil 3.16. Basınc testi ekran görüntüsü



Şekil 3.17. Basınç dayanımı testinin küp numunelerde uygulanması

3.3.2. Eğilme dayanımı testi

Eğilme mukavemeti testi ASTM C 348'e [79] göre standart üç noktalı-eğilme testi kullanılarak 3., 7. ve 28. gün sonunda, prizma numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her karışım için eğilme dayanımı testinde üç prizma numune kullanılmış ve üç test sonucunun ortalaması alınmıştır. Şekil 3.18.'de gösterildiği gibi eğilme mukavemet deneyi gerçekleştirilmiştir. Standart özellikleri uyarınca bir $\pm\%1$ mm yer değiştirme ve $\pm\%0.2$ mm doğruluk ile 35 ton yükleme kapasiteli test makinesi kullanılmıştır.

ASTM teknik özelliklerine göre, eğilme dayanımı, aşağıdaki eşitliğe (Denklem 3.2) göre tespit edilmiştir:

$$\text{Eğilme Dayanımı} = 0.0028 P \quad (3.2)$$

Eğilme mukavemeti MPa cinsinden ölçülür ve PkN cinsinden test edilen numunenin maksimum yüküdür.



Şekil 3.18. Eğilme dayanımı testinin prizma numulere uygulanması

3.3.3. Ultrasonik ses hızı testi

Genel olarak, ultrasonik ses hızı testi, üretilen matrisin homojenliğini kontrol etmek ve olası çatlak ve kusurların varlığını tespit etmek amacıyla yapılır. Bu çalışmada, ultrasonik ses hızı üretilen numuneler için çalışılan parametrelerle ve incelenmiş kategorilerle matrisin performansını değerlendirmek için gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.19.-3.20.'de ultrasonik ses hızı testi gösterilmektedir.



Şekil 3.19. Ultrasonik ses hızı testi ekran görüntüsü



Şekil 3.20. Ultrasonik ses hızı testi cihazı

3.3.4. Boşluk oranı, su emme ve birim hacim ağırlık deneyleri

Bu üç test numunenin mikroyapılarını değerlendirmek için kullanılmıştır. Birim ağırlığı, boşluk oranı ve su emmeyi hesaplamak için numuneler, 48 saat 105°C’de bir elektrikli fırında kurutulup etüv kurusu ağırlığı (kuru ağırlık) tespit edilmiştir. Etüv kurusu ağırlığı belirlendikten sonra 48 saat 21 ± 2 °C’de su içinde tutulup çıkarıldıktan sonra yüzeyi kurutulup doygun kuru yüzey ağırlığı (ıslak ağırlık) tespit edilmiştir. Arşimed yöntemiyle (Şekil 3.21.) su içindeki ağırlığı (Arşimed ağırlık) belirlenmiştir. Boşluk oranı, su emme ve birim hacim ağırlık sonuçları aşağıdaki eşitliklere (Denklem 3.3-3.5) göre hesaplanmıştır.

$$\text{Birim ağırlık (gr / cm}^3\text{)} = \text{kuru ağırlık} / (\text{kuru ağırlık} - \text{Arşimed ağırlığı}) \quad (3.3)$$

$$\text{Boşluk or. (\%)} = [(\text{ıslak ağırlık} - \text{kuru ağırlık}) / (\text{ıslak ağırlık} - \text{Arşimed ağırlığı})] \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Su emme oranı (\%)} = [(\text{ıslak ağırlık} - \text{kuru ağırlık}) / \text{kuru ağırlık}] \times 100 \quad (3.5)$$



Şekil 3.21. Arşimed deney düzeneği

3.3.5. Eğilme tokluğu faktörü

Eğilme tokluğu faktörleri (σ_b), bir INSTRON makinesi kullanılarak tek nokta eğilme testi ile bulunmuştur. Eğilme tokluğu parametresi, yük eğilme eğrisi altındaki hesaplanan alan ile belirlenen numunenin kırılmasından sonra absorbe edebildiği enerji miktarı ile ifade edilebilir. Bu çalışmada, eğilme tokluğu aşağıdaki eşitliğe (Denklem 3.6) göre hesaplanmıştır.

$$\sigma_b = \frac{T_b \cdot L}{\delta_{tb} \cdot b \cdot h^2} \quad (3.6)$$

Burada T_b , 1/150 değerindeki eğilme tokluğu, δ_{tb} 1/150 değerindeki yerdeğiştirme miktarı, L numune uzunluğu ve b ve h numune enkesit boyutlarıdır.

3.3.6. Aşınma direnci testi

Aşınma direncinin belirlenmesi 71 ± 1.5 mm küp numunelerinde (Şekil 3.22.) EN 1338'e [80] göre Böhme aşındırma aleti (Şekil 3.23.) kullanarak yapılmıştır. Testten önce, numuneler ilk önce 24 saat 105 ± 5 °C sıcaklıkta sabit ağırlığa gelinceye kurutulmuştur. Bu standartlara uygun olarak, numuneler 750 mm çaplı döner çelik diskinde yerleştirilmiş ve numuneler daha sonra 294 ± 3 N sabit bir yük altında ve 30 devir/dakika dönme hızıyla 22 devir için aşınmaya maruz bırakılmıştır.

Test adımları için numuneler yerleştirilmeden önce, disk üzerine 20 ± 0.5 g standart aşındırıcı suni korundum tozu (Şekil 3.24.) serpilmiştir. Daha sonra numuneye yük uygulanmış ve belirtilen prosedür, her bir devir sonunda düşey eksen yönünde saat yönünde 90° döndürülmüştür. Böylece diğer yüzeyler de 22 devire maruz bırakılarak toplam 4 periyot tamamlanır (Şekil 3.25.). Her periyot sonunda korundum tozu yenilenir. Toplam 16 periyot sonunda aşınma nedeniyle ağırlık kaybı ve mm biriminden boy azalması değişimi hesaplanmıştır.



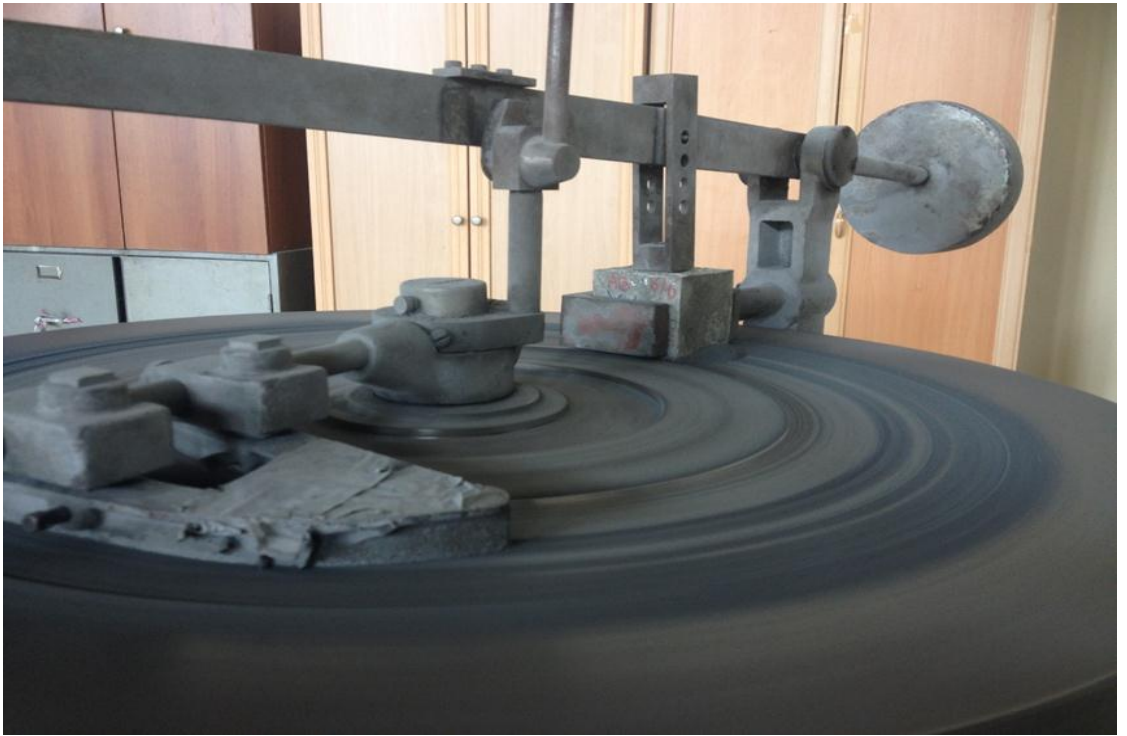
Şekil 3.22. 71±1.5 mm küp numuneler



Şekil 3.23. Böhme aşındırma aleti



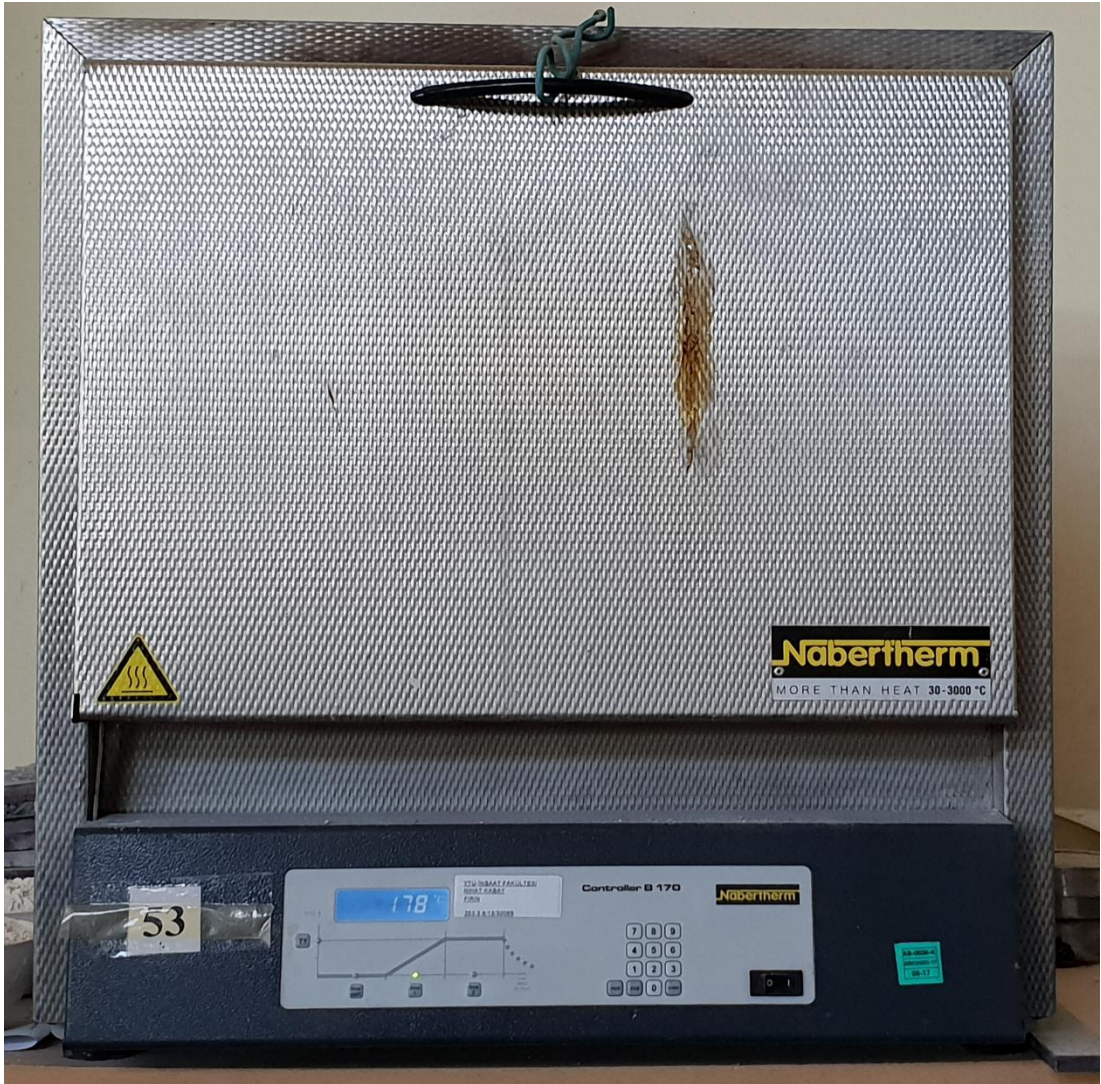
Şekil 3.24. Korondum tozu



Şekil 3.25. Korondum tozu kullanılarak 71 ± 1.5 mm küp numunelerin hareketi

3.3.7. Yüksek sıcaklık direnci testi

28. günden sonra, kontrol numunesi ve lifli numuneler, yüksek sıcaklık fırınına (Şekil 3.26.) yerleştirilmiş ve sıcaklığın 1°C/dak bir artış hızıyla istenen sıcaklıklara yükseltildiği ve 3 saat boyunca maksimum sıcaklıkta tutulduğu yüksek sıcaklık direnci deneyine maruz bırakılmıştır (Şekil 3.27.). Deneyden önce 24 saat süresince numuneler 105±5 °C sıcaklıkta etüvde tutulmuştur. Daha sonra, numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Test numuneleri, 300°C, 600°C ve 900°C'ye maruz bırakıldıktan sonra basınç ve eğilme mukavemeti deneyine tabi tutulmuştur; Ayrıca ultrasonik ses hızı ve ağırlık kaybı numuneler için araştırılmıştır.



Şekil 3.26. Fırın

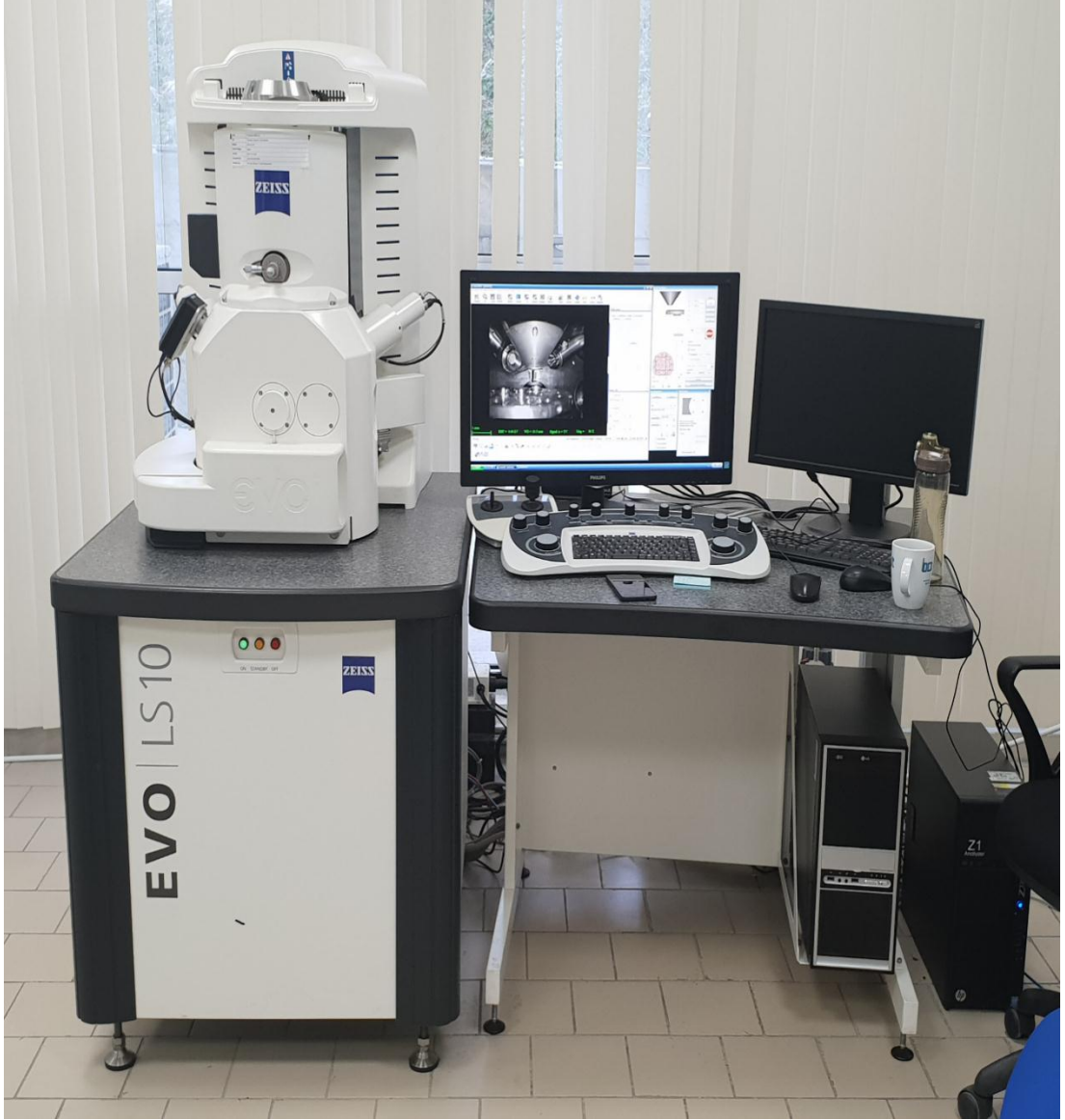


Şekil 3.27. Fırına konulan 10K numuneler

3.3.8. SEM analizi

SEM analizi YTU Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde yapılmıştır (Şekil 3.28.). Tez çalışmasında geopolimer numunelerin, SEM analizleri yüksek sıcaklık deneyi öncesi ve sonrası yapılmıştır. Geopolimer numuneler analiz öncesi püskürtme cihazı vasıtasıyla kaplatılmıştır (Şekil 3.29.). 15 dakika civarı kaplama tamamlandıktan sonra analizin çalışma prensibi, ışığın geleneksel

mikroskoplardan farklı olarak elektronlarla değiştirilmesine dayanmaktadır. Elementel analiz ve inceleme her bir numune için sırasıyla üç dakika civarı ve bir saat sürmüştür.



Şekil 3.28. SEM cihazı



Şekil 3.29. SEM kaplama cihazı

3.4. Karışım Özellikleri

Bu çalışmada, geopolimer uygulamasına ilişkin geopolimer performans kriterleri olarak metakaolin tabanlı geopolimerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı seçilmiştir. Bu çalışmada geopolimerin performansını kontrol eden ve etkileyen parametreler, kolemanit ile ikame metakaolin oranı ve poliolefin lifinin, bazalt lifinin, modifiye poliamid lifinin ve polivinil alkol lifinin farklı oranlarda eklenmesidir. Bu çalışmada incelenen karışımlar Tablo 3.9.'da detaylandırılmıştır.

Tablo 3.9. Geopolimer karışım oranları (gr)

Metakaolin	Standart kum	Cüruf	NaOH (12M)	Na ₂ SiO ₃
450	1125	60	150	300

3.4.1. Alkali çözeltilerin hazırlanması

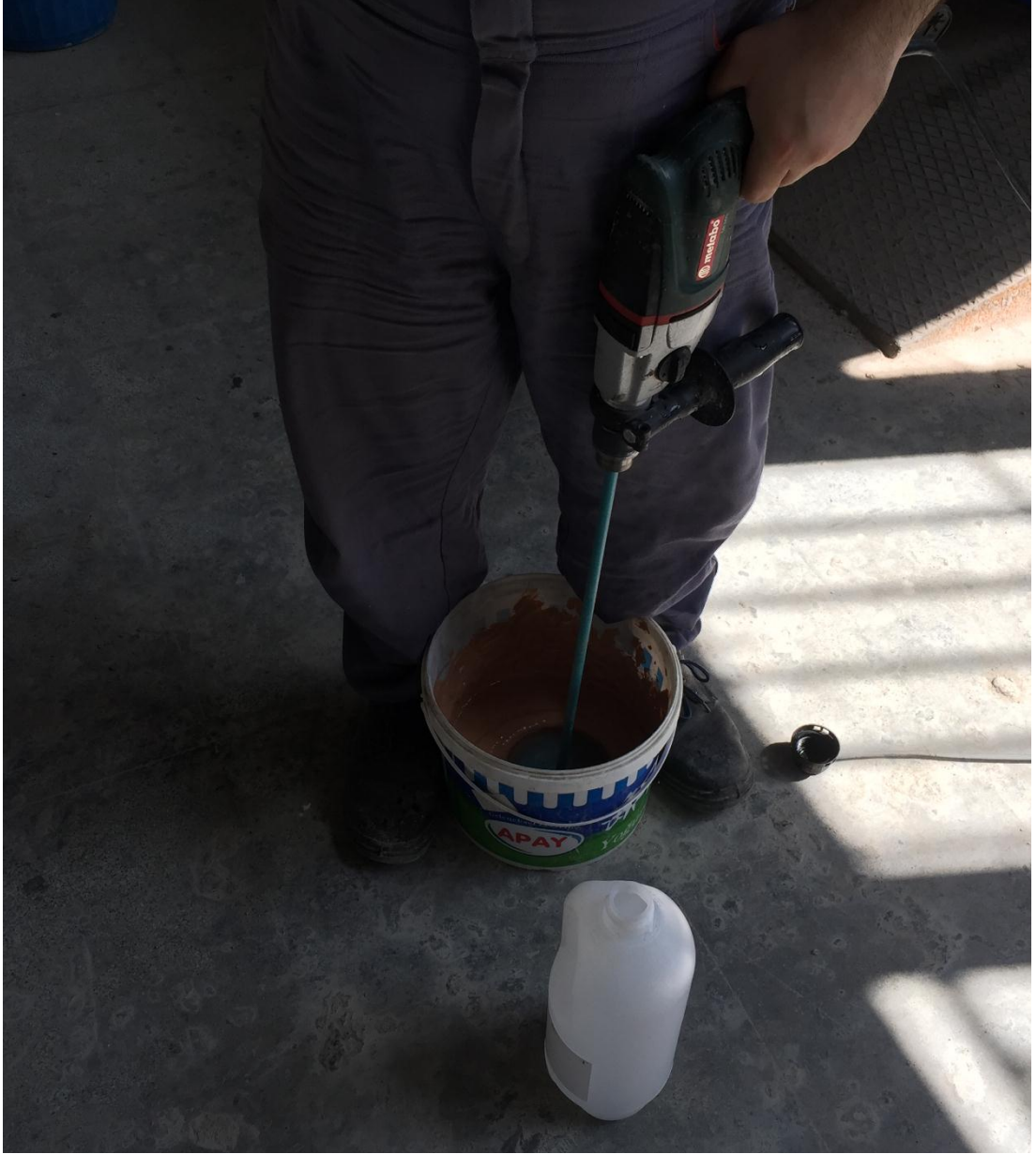
Aktivatör çözeltisini hazırlamak için sodyum hidroksit peletleri bir gün önce damıtılmış suda çözündürülmüş, oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. NaOH çözeltisinin konsantrasyonu, molarite cinsinden ifade edilir. Bu araştırmada kullanılan NaOH çözeltisinin molaritesi 12M olmuştur (1 litre su başına $12 \times 40 = 480$ gram NaOH katı miktarı). Alkali çözeltisinin hazırlanması, NaSi_2O_3 çözeltisinin NaOH çözeltisi ile kütle olarak 2'ye eşit bir oranla karıştırılmasıyla, geopolimer üretim gününde yapılmıştır.

3.4.2. Taze geopolimer üretimi

Üretim süreci birçok aşamaya sahiptir, başlangıçta metakaolin matkap karıştırıcı kullanılarak alkali çözeltiyle karıştırılmış, daha sonra kolemanit ve cüruf karışıma ilave edilmiş ve daha sonra kum eklenmiş ve homojen karışım elde edilene kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Sulu harç, 50 x 50 x 50 mm'lik küp kalıplara, 40 x 40 x 160 mm prizmatik kalıplara (Şekil 3.30.) dökülmüştür. Matkap karıştırıcı (Şekil 3.31.) ile karışım yapıp kalıplara döküldükten sonra vibrasyon masası (Şekil 3.32.), sürüklenmiş havayı serbest bırakmak için döküm sırasında kullanılmıştır.



Şekil 3.30. 50 x 50 x 50 mm küp ve 40 x 40 x 160 mm prizma kalıplar



Şekil 3.31. Matkap karıştırıcı

Karıştırma işleminin ayrıntılı bir açıklaması olarak, metakaolin ilk olarak alkali çözeltilerle karıştırılmış ve daha sonra oda sıcaklığında sertleşmesini sağlamak için tüm karışımlara 60 g cüruf eklenmiştir. Son olarak, oluşan hamur, geopolimer harcı ya da kompozit üretmek için kum ile karıştırılır.



Şekil 3.32. Vibrasyon masası

3.4.3. Karışımların kür yöntemi

Karıştırma işleminden sonra, numuneler 2 saat süreyle sertleşmeye bırakılmış, daha sonra kalıptan çıkarılmış ve oda sıcaklığında [23 ± 2 °C] ve [% 50 ± 4] bağıl nemde 24 saat boyunca sertleşmeye bırakılmıştır. 60°C'de 72 saat süreyle ısı ile sertleştirilmesinden önce, numuneler, geopolimerizasyon işlemi sırasında su buharlaşmasını önlemek için yanmaz fırın poşetlerine konulmuştur (Şekil 3.33.).

Sertleştikten sonra, numuneler plastik torbalardan çıkarılmış ve kapalı plastik kutulara konulmuştur (Şekil 3.34.). Numuneler bu çalışmanın amaçlanan testleri için 3, 7 ve 28 günlük yaşlara kadar saklanmıştır.



Şekil 3.33. Yanmaz fırın poşetli numunelerinin fırına konulması



Şekil 3.34. Numunelerin plastik saklama kutularına konulması

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Ön Karışımlar

Tez çalışması öncesinde yapılan deneme çalışmalarına göre, kolemanit atıkları %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında ilave edilerek ana malzeme olan metakaolin ile ikame yapılmıştır (Şekil 4.1.-4.3.). Ön karışımların sonuçlarına göre basınç ve eğilme mukavemeti sonuçlarını gösteren Tablo 4.1., %90 metakaolin+%10 kolemanit ile karışımın her iki test açısından en iyi performansı verdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar ışığında, söz konusu karışım, mevcut çalışmanın kontrol karışımı olarak belirlenmiştir ve toplam 13 geopolimer harç karışımı oluşturmak üzere sentetik liflerle birlikte kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Metakaolin tabanlı geopolimerlerin kolemanit atığı içeren ön karışımlarının test sonuçları

Karışımlar	28. gün basınç dayanımı (MPa)	28. gün eğilme dayanımı (MPa)
%100 Metakaolin	61,37	10,83
%90 Metakaolin + %10 Kolemanit	62,59	11,75
%80 Metakaolin + %20 Kolemanit	47,45	10,98
%70 Metakaolin + %30 Kolemanit	43,21	9,51
%60 Metakaolin + %40 Kolemanit	33,46	9,12

Kontrol karışımı olarak %10 kolemanit ikameli metakaolin tabanlı geopolimer harç numunesi alınmıştır. Sentetik lifler, her lif türü için %0.4, %0.8 ve %1.2'lik bir hacim oranı olarak geopolimer harçlara eklenmiştir. Karışımlar, kontrol karışımı için kontrol, poliolefin için PL, bazalt için B, modifiye poliamid için PA ve polivinil alkol lifi için PVA kısaltmaları ile gösterilmiş, lif kısaltmalarından sonra hacim oranları verilmiştir. Yapılan testler kapsamında, farklı liflerin benzer oranlarının geopolimer kompozitlerinin davranışları üzerindeki etkisini incelemek için daha önceki laboratuvar deneylerine uygun olarak lif hacim oranları seçilmiştir.



Şekil 4.1. MK geopolimer numuneler



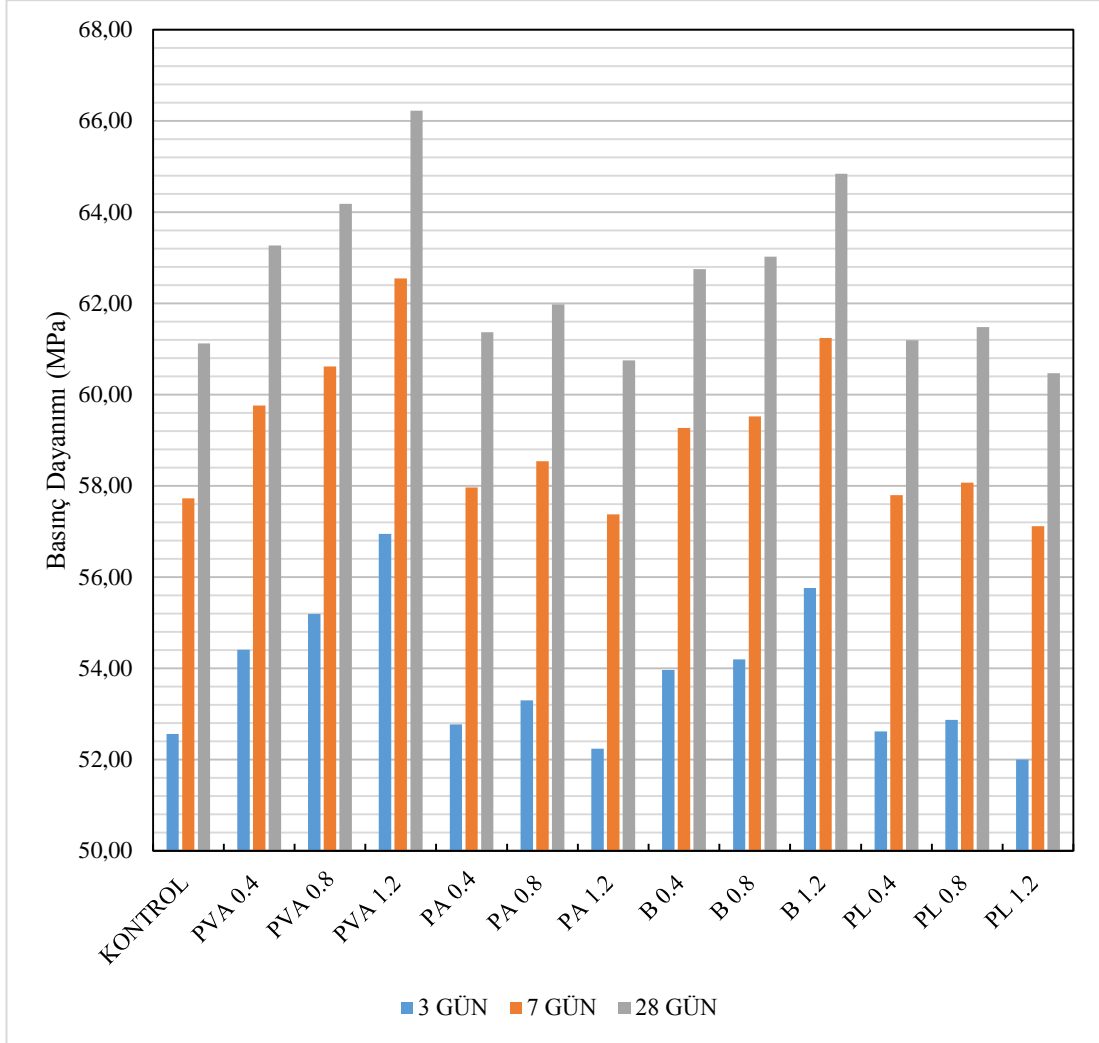
Şekil 4.2. 10K ve 20K geopolimer numuneler



Şekil 4.3. 30K ve 40K geopolimer numuneler

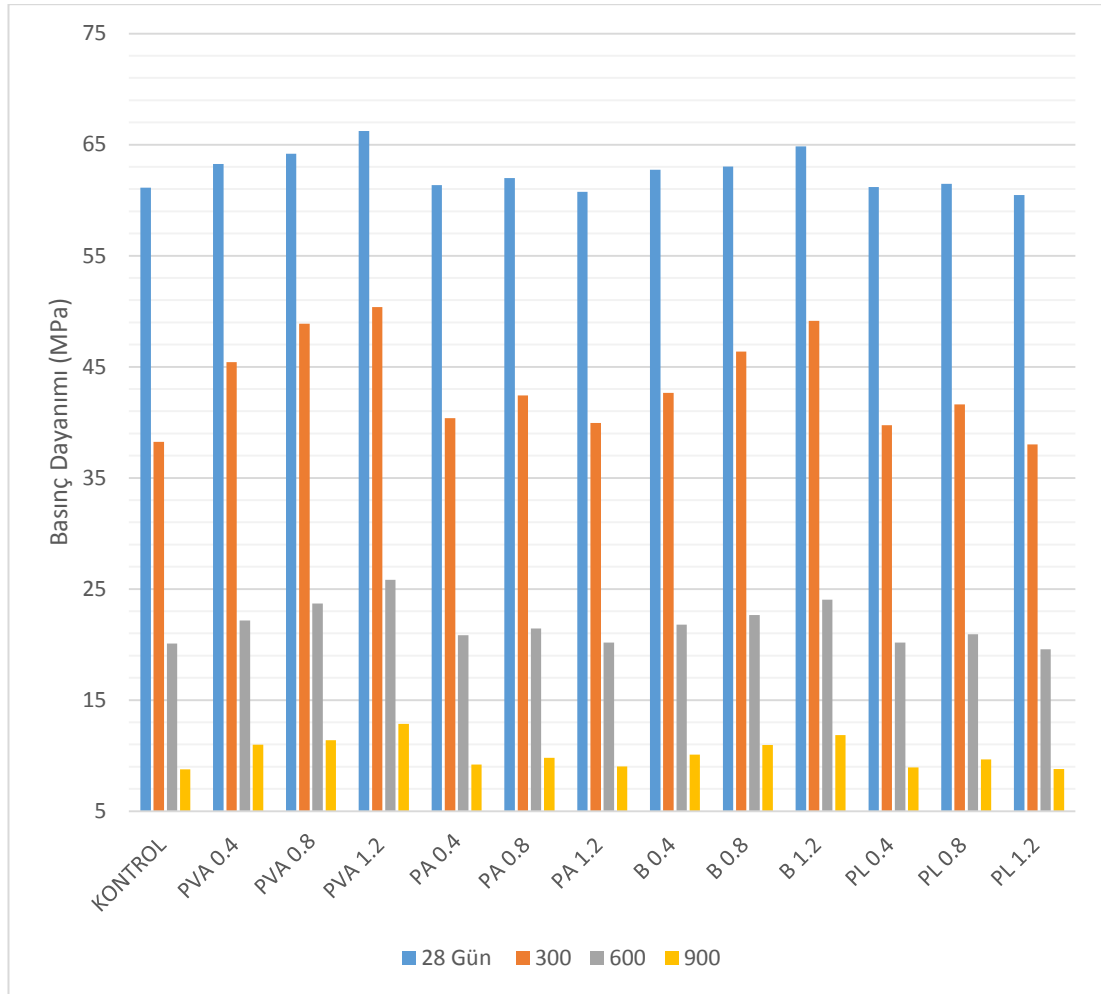
4.2. Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış ve Bırakılmamış Geopolimerlerin Mukavemet Özellikleri

Yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan önce ve sonra üretilen harçların mukavemet özellikleri Şekil 4.4.–4.7.'de gösterilmiştir. Sıcaklık etkisi olmadan önce basınç dayanımı sonuçları, tüm karışımların basınç mukavemetinde geçen süreyle beraber bir artış oluştuğunu ortaya koymaktadır. Artış oranları %4.75 (PL 1.2) ve %14.71 (PVA 1.2) arasında değişmektedir. Ayrıca, hem lif içeriğinin artması hem de karışımların yaş büyümesinin numunelerin basınç dayanımı sonuçları üzerinde olumlu bir etkisi olduğu ve bu sonuçların önceki bulgularla uyumlu olduğu dikkat çekicidir.



Şekil 4.4. Kolemanit atığı katkıli metakaolin tabanlı geopolimerlerin basınç dayanımı test sonuçları

PVA lif takviyeli numuneler, hem kontrol numunesi hem de diğer lif tipleriyle takviye edilen numunelerle karşılaştırıldığında, en yüksek artış oranlarını göstererek (sırasıyla %9.60, %11.17 ve %14.71) en iyi 28 günlük sonuçları göstermiştir. Ayrıca, bazalt lif takviyeli numuneler, geopolimerik matrise bazalt liflerinin eklenmesinin olumlu bir etkisini göstererek kontrol numunesi ve diğer numunelere göre belirli bir gelişme modeli sergilemiştir. Öte yandan, poliamid ve poliolefin lif takviyeli numuneler, PVA ve bazalt numunelerine kıyasla daha zayıf performans göstermesine rağmen, kontrol numunesine kıyasla sonuçları daha iyi çıkmıştır.



Şekil 4.5. Yüksek sıcaklık etkisinde kolemanit atığı katkılı numunelerin basınç dayanımı test sonuçları

Şekil 4.5., yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin basınç dayanım testi sonuçlarını, 28. gündeki yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan elde edilen sonuçlarla karşılaştırmıştır. Geopolimer kompozitlerde özellikle 600-900 °C sıcaklık aralığında ciddi bir basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. Basınç dayanımı kaybı, kontrol karışımı için %37.40 – %85.66 aralığında, PVA karışımları için %23.82 - %82.64 aralığında, PA karışımları için %31.54 - %85.15 aralığında, B karışımları için %24.21 - %83.90 aralığında ve PL karışımları için %32.28 - %85.44 aralığında olmuştur (Tablo 4.2.).

Tablo 4.2. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin basınç dayanımı kaybı

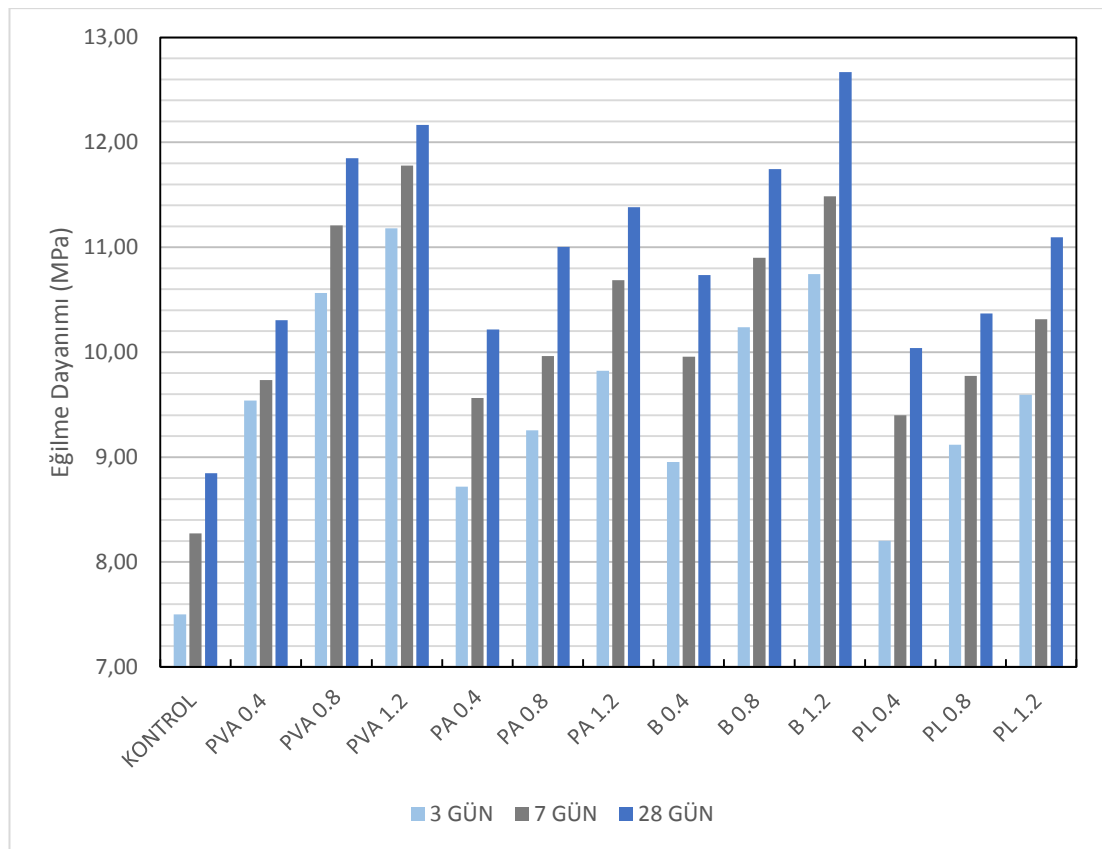
	300 ° C	600 ° C	900 ° C
KONTROL	%37,40	%67,11	%85,67
PVA 0.4	%28,23	%64,98	%82,65
PVA 0.8	%23,82	%63,07	%82,24
PVA 1.2	%23,91	%60,99	%80,58
PA 0.4	%34,20	%66,03	%85,03
PA 0.8	%31,54	%65,41	%84,20
PA 1.2	%34,26	%66,80	%85,15
B 0.4	%32,00	%65,26	%83,90
B 0.8	%26,40	%64,06	%82,62
B 1.2	%24,21	%62,92	%81,74
PL 0.4	%35,05	%67,00	%85,37
PL 0.8	%32,29	%65,97	%84,30
PL 1.2	%37,13	%67,65	%85,45

PVA1.2 karışımı, 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kontrol karışımından sırasıyla %36.11, %9.11 ve %5.93 oranında daha iyi performans gerçekleştirmiştir. PA1.2 karışımı da 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kontrol karışımından sırasıyla %8.41, %4.70 ve %6.01 oranında daha iyi performans gerçekleştirmiştir. Ayrıca B1.2 karışımı sırasıyla 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kontrol karışımından sırasıyla %35.26, %6.24 ve %4.58 oranında ve PL1.2 karışımı %4.58, ve %0.7, %0.8 ve %0.2 oranında daha iyi performans göstermiştir.

Test sonuçları genellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan önceki numunelere benzer bir eğilim göstermiştir. PVA ve özellikle bazalt lif takviyeli numunelerinde, poliamid ve poliolefin numunelerinden daha düşük bir dayanım kaybı olmuştur. Ayrıca lifler, artan lif oranlarıyla dayanım kaybı oranlarına göre karşılaştırıldığında, PVA ve bazalt lif takviyeli numuneler, kontrol numunesi ve diğer lif tipleriyle takviye edilen numuneler açısından daha sistematik performans göstermiştir. Böyle bir durumdan sonra, poliamid lifleri tamamen erimiş ve hacimsel kararlılığını

kaybetmiş, poliolefin lifleri ise kısmen erimiştir. Bunun nedeni, PVA ve bazalt lifleri ise şekillerini korumuş ve mekanik bütünlüğünü kaybetmemiştir.

Lifli malzemelerin arzu edilen fiziksel ve mekanik özellikleri, kristal fazların homojen ve ince dağılımına atfedilir. Bu istenen mikroyapı, TiO_2 , ZrO_2 veya P_2O_5 gibi bir çekirdeklendirici ekleyerek elde edilebilir. Bununla birlikte, bazalt kayaları, erime işlemi sırasında Fe_3O_4 gibi doğal bir çekirdeklendiriciye gerek duymaz ama üretir, bu nedenle benzer mikroyapıyı elde etmek için çekirdeklendiricinin gerekli olduğu diğer liflere göre avantajlar sağlar.

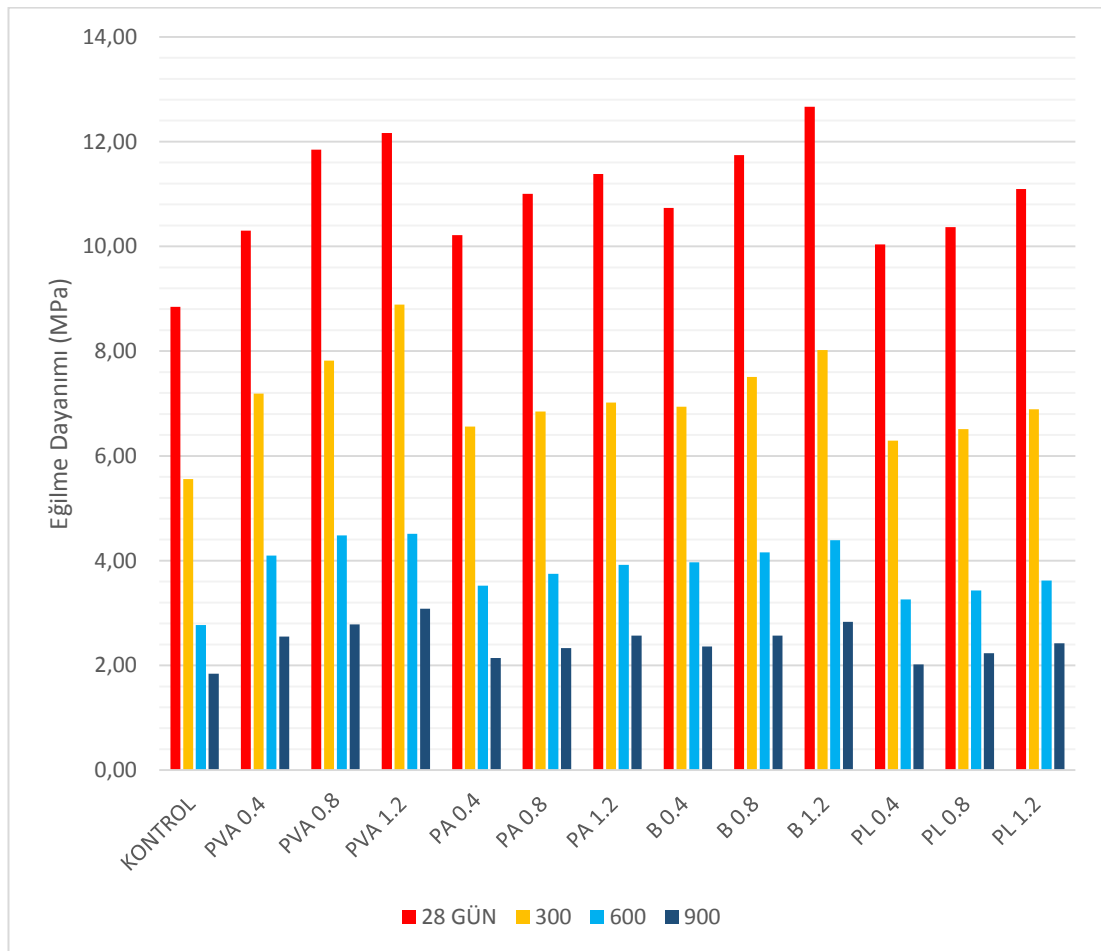


Şekil 4.6. Kolemanit atığı katkılı metakaolin tabanlı geopolimerlerin eğilme dayanımı test sonuçları

Şekil 4.6.'da gösterilen numunelerin eğilme mukavemet sonuçları genellikle basınç dayanımı sonuçlarına benzer bir artış eğilimi göstermiştir. Artan lif içeriği ve yaş büyümesi ile dayanımda bir gelişme olmuştur. Geopolimer kompozitlerini güçlendirmek için %1.2'lik bir hacim oranı olarak PVA eklenmesi, kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında sırasıyla 3 günde %32.91, 7 günde %29.75 ve 28 günde %27.28 oranında eğilme mukavemetini artırmıştır. %1.2'lik bir hacim oranı

olarak modifiye poliamid lifi eklenmesi, geopolimerlerin eğilme mukavemetini 3 günde %23.62, 7 günde %22.57 ve 28 günde %22.28 oranında artırmıştır.

B1.2 lif takviyeli harç numunesi, kontrol numunesine göre sırasıyla 3 günde %30.19, 7 günde %27.95 ve 28 günde %30.17 oranında başarı yüzdesi sergilemiştir. Ayrıca, PL1.2 lif takviyeli geopolimer harç numunesi, kontrol numunesine göre sırasıyla 3 günde %21.81, 7 günde %19.77 ve 28 günde %20.27 oranında eğilme mukavemetini artırmıştır. PVA ve bazalt liflerinin geopolimerik matris ile iyi bağlanma özellikleri, PA ve PL liflerinden daha yüksek elastik modülleriyle birlikte daha iyi yapısal performansa yol açar. Bu bulgular önceki araştırma sonuçlarıyla uyumlu çıkmıştır.



Şekil 4.7. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kolemanit atığı katkılı numunelerin eğilme dayanımı sonuçları

Şekil 4.7., yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin eğilme dayanım testi sonuçlarını, 28. günde yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan elde edilen sonuçlarla

karşılaştırmıştır. Sıcaklık maruziyetinden sonra numunelerin eğilme mukavemeti sonuçları, tüm karışımların kontrol numunesine kıyasla önemli bir iyileşme sergilediğini göstermektedir. PVA ve bazalt lifli numuneler, düşük mukavemet kaybı oranları göstererek diğer numunelere göre daha iyi bir performans sergilemiştir. Tablo 4.3.'ten görülebileceği gibi, geopolimer kompozitlerde özellikle 600-900 °C sıcaklık aralığında ciddi bir basınç dayanımı kaybı gözlenmiştir. Eğilme dayanımı kaybı, kontrol karışımı için %37.14 – %79.19 aralığında, PVA karışımları için %26.91- %76.53 aralığında, PA karışımları için %35.78 - %79.05 aralığında, B karışımları için %35.34 - %78.11 aralığında ve PL karışımları için %37.21 - %79.87 aralığında olmuştur.

Tablo 4.3. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin eğilme dayanımı kaybı

	300 °C	600 °C	900 °C
KONTROL	0,371418	0,68684	0,79198
PVA 0.4	0,302153	0,602062	0,752502
PVA 0.8	0,339954	0,621866	0,765354
PVA 1.2	0,269159	0,629236	0,746795
PA 0.4	0,357896	0,655456	0,790533
PA 0.8	0,377361	0,659139	0,788212
PA 1.2	0,383196	0,655574	0,774190
B 0.4	0,353479	0,630160	0,780146
B 0.8	0,360553	0,645793	0,781175
B 1.2	0,366907	0,653457	0,776602
PL 0.4	0,373399	0,675243	0,798770
PL 0.8	0,372152	0,669198	0,784931
PL 1.2	0,379017	0,673736	0,781890

Sentetik lifler arasında PVA1.2 karışımı, 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kontrol karışımından sırasıyla %27.53, %8.38 ve %5.70 oranında daha iyi performans gerçekleştirmiştir. PA1.2 karışımı da 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kontrol karışımından sırasıyla %3.17, %4.55 ve %2.24 oranında daha iyi performans gerçekleştirmiştir. Ayrıca B1.2 karışımı sırasıyla 300°C, 600°C ve 900°C'de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında kontrol karışımından sırasıyla %1,21, %4.86 ve %1.94 oranında ve PL1.2 karışımı %0,07, %1.89 ve %1.27 oranında daha iyi performans göstermiştir. PVA lifleri ile takviye edilen karışımlar, numuneler yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında

eğilme dayanımı test sonuçlarına göre lifler arasında en iyi performansı gerçekleştirmiştir.

Hem basınç hem de eğilme dayanımı sonuçlarının, incelenen yüksek sıcaklıkların tamamında artan lif içeriği ile arttığı görülmüştür. Bu durum, sentetik liflerin genel olarak sonuçta elde edilen harçların mukavemet davranışında belirli bir iyileşme sağladığı anlamına gelir. Geopolimer kompozitlerinin basınç ve eğilme mukavemetleri, 600°C–900°C sıcaklık aralığında geopolimer matrisinin dehidrasyonu, yüksek sıcaklıktan kaynaklanan liflerin erimesi ve serbest su buharlaşmasının ısıl reaksiyon mekanizması nedeniyle önemli ölçüde azalmıştır.

4.3. Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılmış ve Bırakılmamış Geopolimerlerin Ultrasonik Ses Hızı Testi Özellikleri

Ultrasonik ses hızı testi, sentetik liflerin farklı tip ve farklı içerik oranları ile geopolimerik matrisin sürekliliği üzerindeki etkisini incelemek için gerçekleştirilmiştir. Araştırılan karışımların test sonuçları Tablo 4.4.'te gösterilmiştir. Aynı karışım için hem farklı yaşlarda hem de aynı lif türü için artan lif içeriğinde belirli bir büyüme oranı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.4. Ultrasonik ses hızı testi sonuçları (m/sn)

	3 Gün	7 Gün	28 Gün
KONTROL	3559	3588	3622
PVA 0.4	3612	3632	3655
PVA 0.8	3644	3651	3682
PVA 1.2	3654	3667	3705
PA 0.4	3578	3611	3635
PA 0.8	3591	3624	3650
PA 1.2	3554	3602	3630
B 0.4	3604	3623	3649
B 0.8	3629	3638	3671
B 1.2	3648	3652	3684
PL 0.4	3566	3602	3630
PL 0.8	3582	3610	3644
PL 1.2	3548	3598	3626

Buna ek olarak, elde edilen karışımların sonuçları birbirine yakın çıkmış ve bu da liflerin, matrisin kompaktlığını ve homojenliğini etkilemediğine dair bir işaret vermiştir. Sonuçlara göre, aynı seri için artmış lif içeriğinin yanı sıra artan yaşlarda hafif bir artış görülmüştür.

Tablo 4.5. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin ultrasonik ses hızı testi sonuçları (m/sn)

	300 °C	600 °C	900 °C
KONTROL	1918	1015	815
PVA 0.4	2024	1072	885
PVA 0.8	2045	1092	910
PVA 1.2	2089	1115	935
PA 0.4	1968	1023	845
PA 0.8	1997	1042	868
PA 1.2	1940	1018	832
B 0.4	2012	1057	865
B 0.8	2040	1073	892
B 1.2	2063	1089	914
PL 0.4	1943	1020	833
PL 0.8	1967	1034	841
PL 1.2	1910	1010	818

Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra karışımların sonuçları, PVA ve bazalt lif takviyeli numunelerin diğer numunelere göre biraz daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır (Tablo 4.5.). Sıcaklık arttıkça, tüm numuneler benzer davranış sergilemiş ve dikkate değer değişiklikler göstermiş, örneğin ultrasonik ses hızı değerlerinde 300°C'ye kadar büyük düşüşler olmuştur. Tablo 4.6.'da görülebileceği gibi, geopolimer numuneleri, ultrasonik ses hızı test sonuçlarına göre 300°C'lik sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ciddi bir düşüş sergilemiştir. Sonuçlar, geopolimerlerin katı matrisinin 300°C'ye maruz kalmanın ardından önemli hasara uğradığını ve aynı zamanda bu durumun basınç ve eğilme mukavemeti değerlerinin kaybıyla da tutarlı olduğunu göstermiştir. Daha yüksek sıcaklık etkisi altında daha geniş çatlakların oluşumu ve 300°C'nin üzerinde liflerin erimesi nedeniyle geopolimer matris kompozitlerinde boşluk oluşması nedeniyle ultrasonik ses hızı

dalgalarının yayılma süresi gecikmiş ve bu durum daha düşük ultrasonik ses hızı değerlerine neden olmuştur.

Tablo 4.6. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer kompozitlerin ultrasonik ses hızı kaybı

	300 °C	600 °C	900 °C
KONTROL	%47,05	%71,98	%77,50
PVA 0.4	%44,62	%70,67	%75,79
PVA 0.8	%44,46	%70,34	%75,29
PVA 1.2	%43,62	%69,91	%74,76
PA 0.4	%45,86	%71,86	%76,75
PA 0.8	%45,29	%71,45	%76,22
PA 1.2	%46,56	%71,96	%77,08
B 0.4	%44,86	%71,03	%76,29
B 0.8	%44,43	%70,77	%75,70
B 1.2	%44,00	%70,44	%75,19
PL 0.4	%46,47	%71,90	%77,05
PL 0.8	%46,02	%71,62	%76,92
PL 1.2	%47,32	%72,15	%77,44

4.4. Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonra Ağırlık Kaybı

Yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra ağırlık kaybı yüzdeleri Tablo 4.7.'de verilmiştir. Genel olarak, tüm karışımlar kontrol numunesine göre daha az ağırlık kaybı göstermiştir. Bu durum, araştırılan liflerin kullanılmasının kontrol karışımında önemli bir iyileşme gösterdiği anlamına gelir. Ayrıca, artan lif içeriğinin de yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında üretilen harçların performansını artırmak için yararlı bir faktör olduğu bulunmuştur.

Tablo 4.7. Yüksek sıcaklıklar nedeniyle ağırlık kaybı (%)

	300°C	600 °C	900 °C
KONTROL	2,53	4,60	5,46
PVA 0.4	2,08	3,96	4,76
PVA 0.8	2,04	3,78	4,64
PVA 1.2	1,88	3,70	4,55
PA 0.4	2,38	4,14	5,14
PA 0.8	2,26	4,02	5,02
PA 1.2	2,13	3,95	4,90
B 0.4	2,19	4,02	4,83
B 0.8	2,12	3,89	4,75
B 1.2	1,97	3,81	4,66
PL 0.4	2,40	4,25	5,23
PL 0.8	2,28	4,17	5,12
PL 1.2	2,21	4,04	5,07

PVA ve bazalt lif takviyeli numuneler, incelenen tüm sıcaklıklarda daha az ağırlık kaybı yüzdesi göstermiştir. Poliamid ve poliolefin lif numuneleri, PVA ve bazalt lifli numunelere göre daha zayıf bir performans göstermesine rağmen, Tablo 4.8.'de görüldüğü gibi kontrol numunesine kıyasla belirli bir büyüme oranı sergilemiştir.

Tablo 4.8. Sentetik liflerin kontrol karışımına göre daha az ağırlık kaybı göstermesi açısından performansı

	300 °C	600 °C	900 °C
PVA 0.4	0,177866	0,13913	0,128205
PVA 0.8	0,193676	0,178261	0,150183
PVA 1.2	0,256917	0,195652	0,166667
PA 0.4	0,059289	0,100000	0,058608
PA 0.8	0,106719	0,126087	0,080586
PA 1.2	0,158103	0,141304	0,102564
B 0.4	0,134387	0,126087	0,115385
B 0.8	0,162055	0,154348	0,130037
B 1.2	0,221344	0,171739	0,146520
PL 0.4	0,051383	0,076087	0,042125
PL 0.8	0,098814	0,093478	0,062271
PL 1.2	0,126482	0,121739	0,071429

Sıcaklık arttıkça geopolimer kompozitlerde dehidrasyon reaksiyonu meydana gelir ve geopolimer kompozitlerin içindeki nem, numunenin yüzeyine doğru yönelir ve bu durum mikroyapının iç hasarına ve sonuçta geopolimerlerin ağırlık kaybı açısından bozulmasına neden olur. Geopolimer kompozitlerinde elde edilen 600°C'den önceki büyük ağırlık kaybı, hem serbest suyun hem de yoğunlaşmış hidroksil gruplarının buharlaşmasıyla su kaybından kaynaklanmıştır. Ayrıca, lifler ve matris arasındaki arayüz reaksiyonundan dolayı 600°C'nin üzerinde bir başka hızlı ağırlık kaybı aşaması da oluşmuştur. Geopolimer kompozitlerin 900°C'de ısı işleme tabi tutulması durumunda, liflerin kuvvetlendirici etkisi büyük ölçüde ayrılmıştır. Bu durum, ciddi lif bozulması ve çok güçlü lif/matris arayüz bağlanma dayanımından kaynaklanır. Bu nedenle, geopolimer kompozit, önemli ölçüde azalmış mekanik özellikler ve çok gevrek bir şekilde kırılma göstermiştir.

4.5. Boşluk Oranı, Su Emme ve Birim Hacim Ağırlık Sonuçları

Sentetik liflerin geopolimerik matrisin fiziksel davranışı üzerindeki etkisini anlamak için, birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı parametreleri Tablo 4.9.'da verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 4.9. İncelenen karışımların fiziksel özellikleri

	Birim ağırlık (gr/cm ³)	Su emme (%)	Boşluk oranı (%)
KONTROL	2,42	9,14	16,93
PVA 0.4	2,40	8,74	16,02
PVA 0.8	2,40	8,61	15,54
PVA 1.2	2,39	8,48	15,02
PA 0.4	2,38	9,02	16,56
PA 0.8	2,37	8,99	16,45
PA 1.2	2,39	9,65	17,09
B 0.4	2,39	8,96	16,35
B 0.8	2,40	8,81	15,94
B 1.2	2,38	8,63	15,65
PL 0.4	2,43	9,45	17,38
PL 0.8	2,42	9,74	17,67
PL 1.2	2,40	10,07	17,95

Genel bir gözlem olarak, liflerin varlığının su emme açısından hafif bir gelişme gösterdiği sonucuna varılabilir. Lif takviyesi, liflerin kendilerinin su emme kabiliyeti nedeniyle su emilimini azaltmaya yardımcı olur. Böylece, liflerin varlığı matris tarafından emilen su miktarını azaltır. Ayrıca, PVA ve bazalt lifli numuneler, diğer incelenen özelliklere benzer şekilde, artan lif içeriği ile yükseltilmiş bir azalma oranı sağlayarak diğer araştırılan özelliklere benzer şekilde davranmıştır. PVA lif numuneleri, %4.38 ile %7.22 arasında azalma oranları sağlarken bazalt lifler ise %1.97 ile %5.58 arasında azalma oranları oluşturmuştur.

Boşluk oranı karakteristiği için benzer sonuç oluşmuştur. Bazalt lif için azalma oranı %3.43 ile %7.56 arasında değişirken, PVA numuneleri için azalma oranı %5.38 ile %11.28 arasında değişmiştir. Poliamid lif takviyeli numuneler, her iki parametrede de %0.8 lif içeriğine kadar belirli bir gelişme göstermiştir. Bununla birlikte, %1.2 lif içeriğinde su emme ve boşluk oranında bir artış fark edilmiştir. Bu, daha yüksek oranlarda kullanıldığında araştırılan parametreleri artıran poliamid liflerinin doğası ile açıklanabilir. Poliolefin lifler, incelenen özelliklerle ilgili olarak zayıf bir şekilde davranmıştır. Ayrıca, su emme ve boşluk oranı artan lif içeriği ile artmıştır.

4.6. Eğilme Tokluğu Faktörü Sonuçları

Dış yüklere maruz kaldığında sentetik liflerin bir harç numunesinin enerji emilimi derecesi üzerindeki etkisini incelemek için eğilme tokluğu faktörü testi yapılmıştır. Tokluk parametreleri sonuçları sırasıyla Tablo 4.10. ve Şekil 4.8.'de verilmiştir. Eğilme tokluğu faktörü Denklem 3.6 ve Şekil 4.9.'da gösterilen yük sapma eğrilerinin altındaki alanlar kullanılarak hesaplanmıştır. Tokluk parametreleri ile ilgili olarak sentetik liflerin varlığı artan lif içeriği ile artan önemli bir büyüme oranı vermiştir.

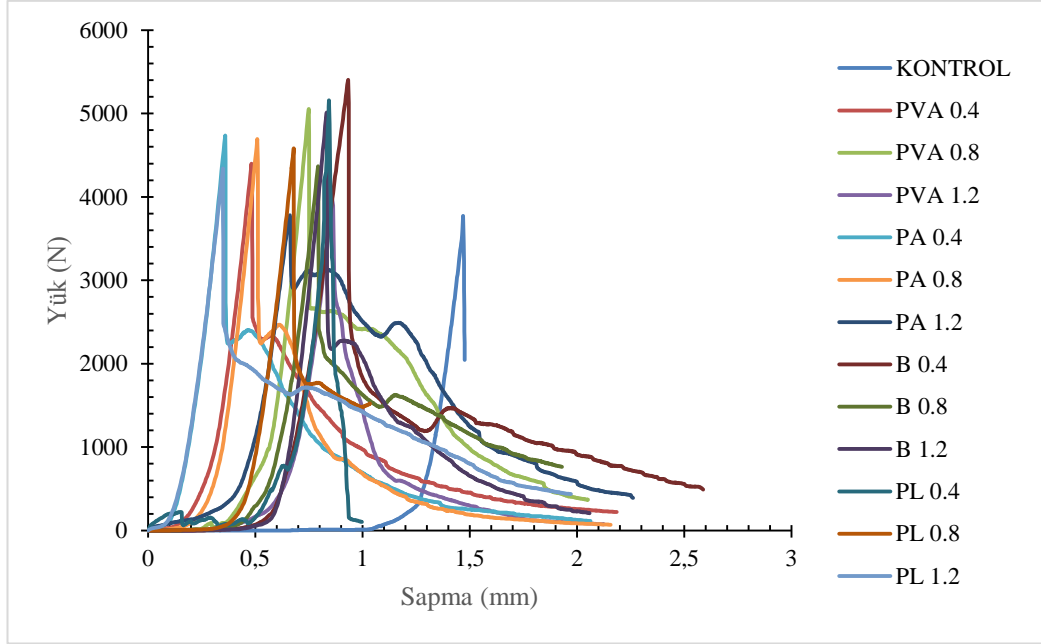
Tablo 4.10. Yapılan karışımların eğilme tokluğu özellikleri

Karışımlar	Nihai yük	Nihai dayanım	Açıklık ortası sapma	Eğilme tokluğu faktörü
KONTROL	3774	8,68	0,29	0,77
PVA 0.4	4396	10,11	0,71	1,91
PVA 0.8	5055	11,63	1,19	2,79
PVA 1.2	5190	11,94	1,37	3,97
PA 0.4	4359	10,03	0,43	0,79
PA 0.8	4594	10,57	0,61	1,21
PA 1.2	4856	11,17	0,94	1,84
B 0.4	4580	10,53	0,59	1,96
B 0.8	5011	11,53	0,78	2,44
B 1.2	5200	11,96	1,27	2,98
PL 0.4	4340	9,98	0,38	0,82
PL 0.8	4583	10,54	0,54	1,12
PL 1.2	5157	11,86	0,89	1,76

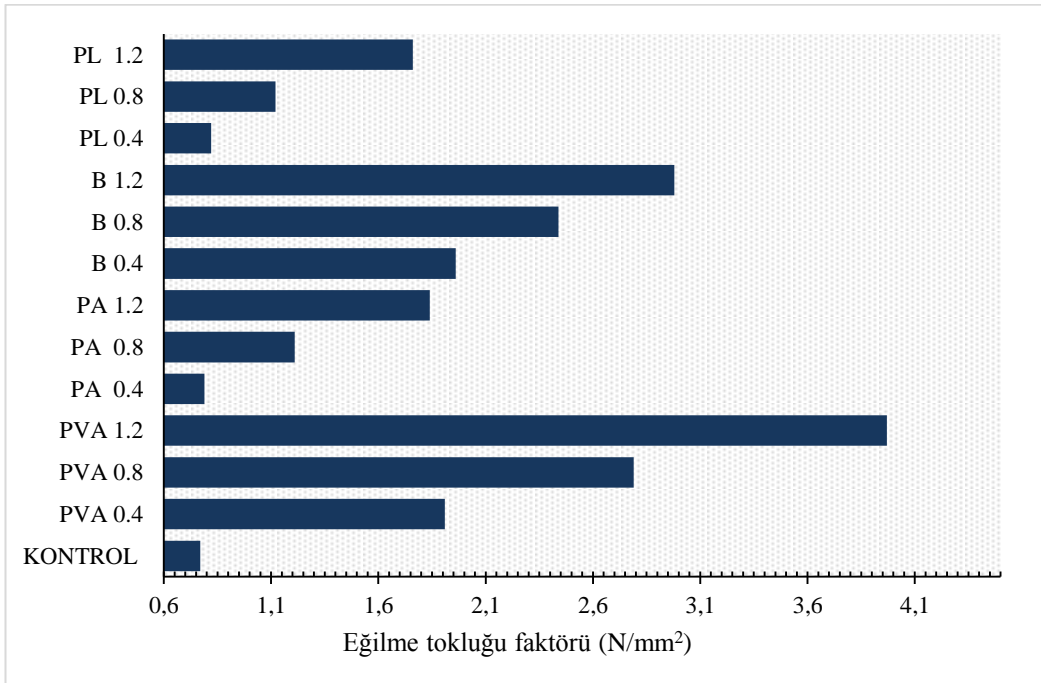
İncelenen karışımların tümü, kontrol numunesine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. PVA lif, nihai yük, açıklık ortası sapması ve eğilme tokluğu faktörü açısından en iyi sonuçları göstermiştir. PVA büyüme oranları, nihai yük açısından %16,48 ile %37,52 arasında, açıklık ortası sapması yönünden ise %144.83 ve %372.41 arasında ve eğilme tokluğu faktörü açısından %148.05 ve %415.58 arasında değişmiştir. Bazalt lifleri ayrıca kontrol numunesi ve diğer lif katkılı numunelere kıyasla belirli bir gelişme göstermiştir. Büyüme oranı, nihai yük açısından %21,36'dan %37.78'e, açıklık ortası sapması yönünden ise %103.45'ten %337.93'e ve eğilme tokluğu faktörü açısından % 154.55'ten % 287.01'e kadar artmıştır.

Poliamid ve poliolefin lif takviyeli numuneler, diğer liflere kıyasla daha düşük bir büyüme eğilimi sağlamıştır. Artan lif içeriği ile büyüme oranları önemli ölçüde artmıştır. Poliamid liflerin büyüme oranları nihai yük açısından %15,5'ten %28.67'ye, açıklık ortası sapması yönünden %48.28'den %224.14'e ve eğilme tokluğu faktörü açısından %2.60'dan %138.96'ya artarken, poliolefin lifleri nihai yük açısından %15.00'ten % 36.65'e, açıklık ortası sapması yönünden %31.03'ten

%206.90'a ve eğilme tokluğu faktörü açısından değişen %6.49'dan %128.57'ye bir büyüme göstermiştir.



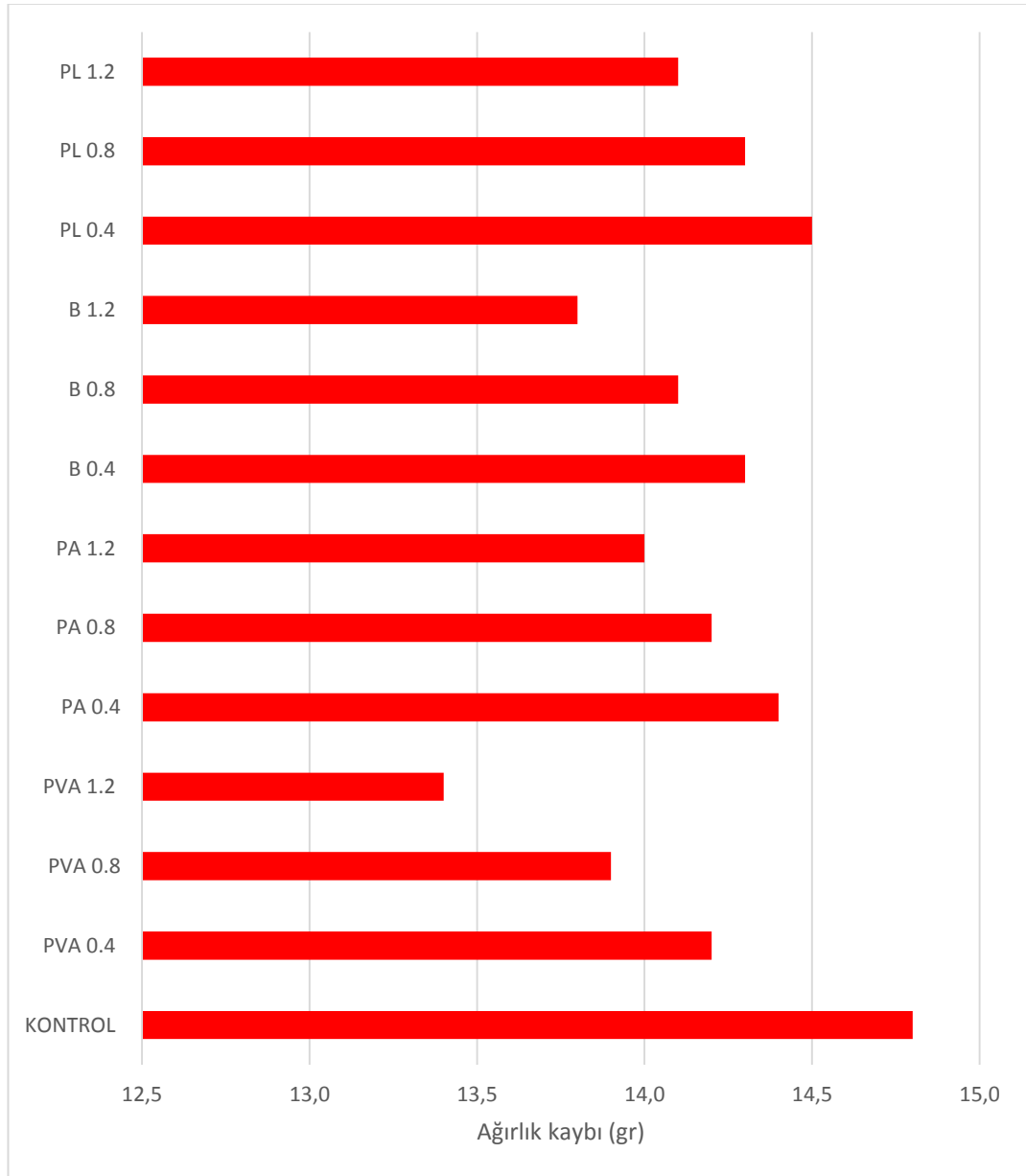
Şekil 4.8. Metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin yük-sapma eğrileri



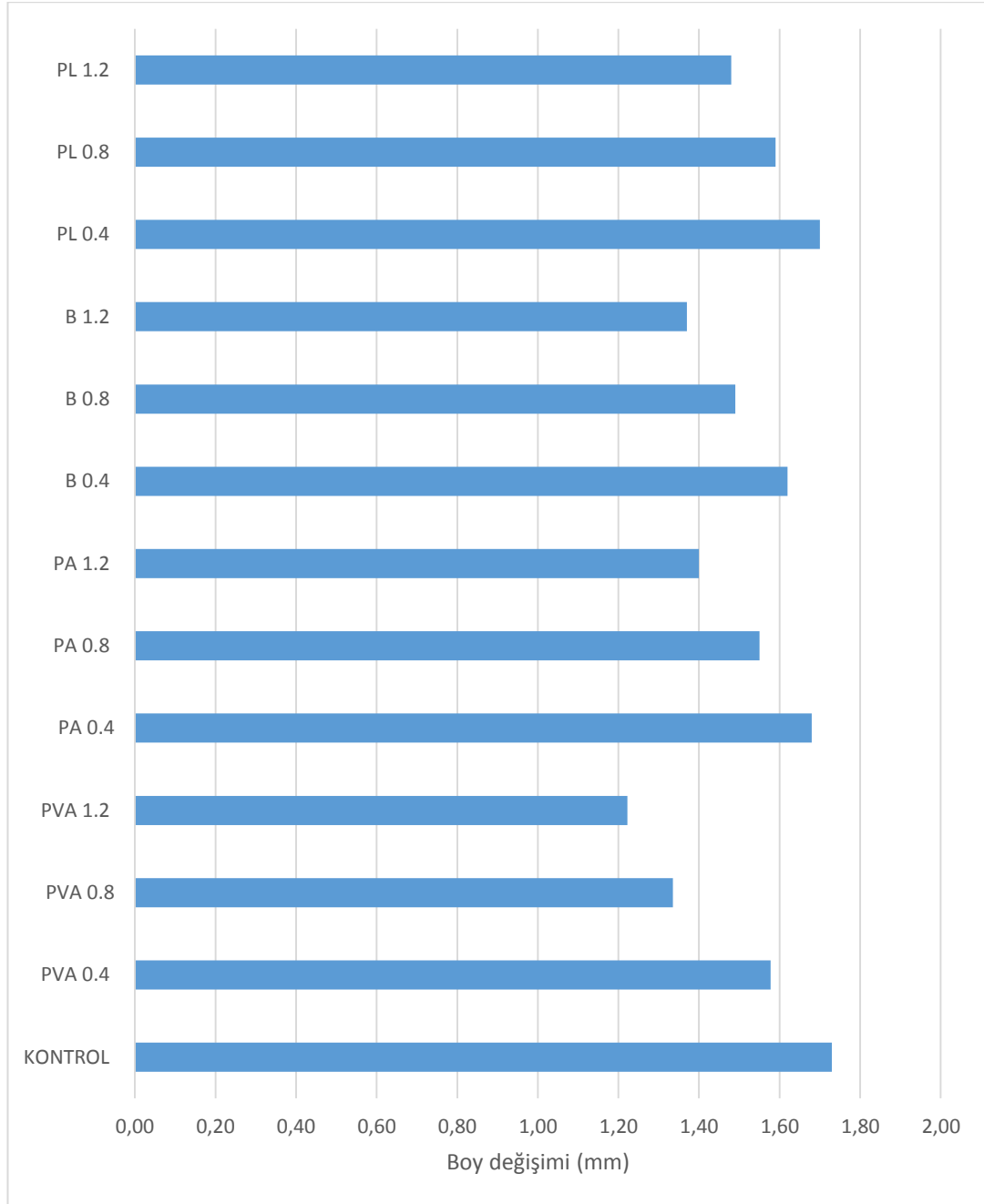
Şekil 4.9. Araştırılan karışımların eğilme tokluğu faktörleri

4.7. Aşınma Direnci Testi Sonuçları

Boy değişimi ve ağırlık kaybı için sonuçlar Şekil 4.10.-4.11.'de verilmiştir. Genel olarak incelenen karışımların tümünde, 2 mm'den daha az bir boy değişimi ve 15 gr'dan daha az bir ağırlık kaybı olmuştur. Artan lif içeriği, hem boy değişiminde hem de ağırlık kaybında hafif bir iyileşme sağlamıştır. Bu durum, liflerin varlığının, aşınmaya daha fazla direnç gösteren ve dolayısıyla daha az boy değişimi ve daha az ağırlık kaybı üreten bir tabaka oluşturması gerçeğiyle ilgilidir.



Şekil 4.10. Metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin ağırlık kaybı miktarı

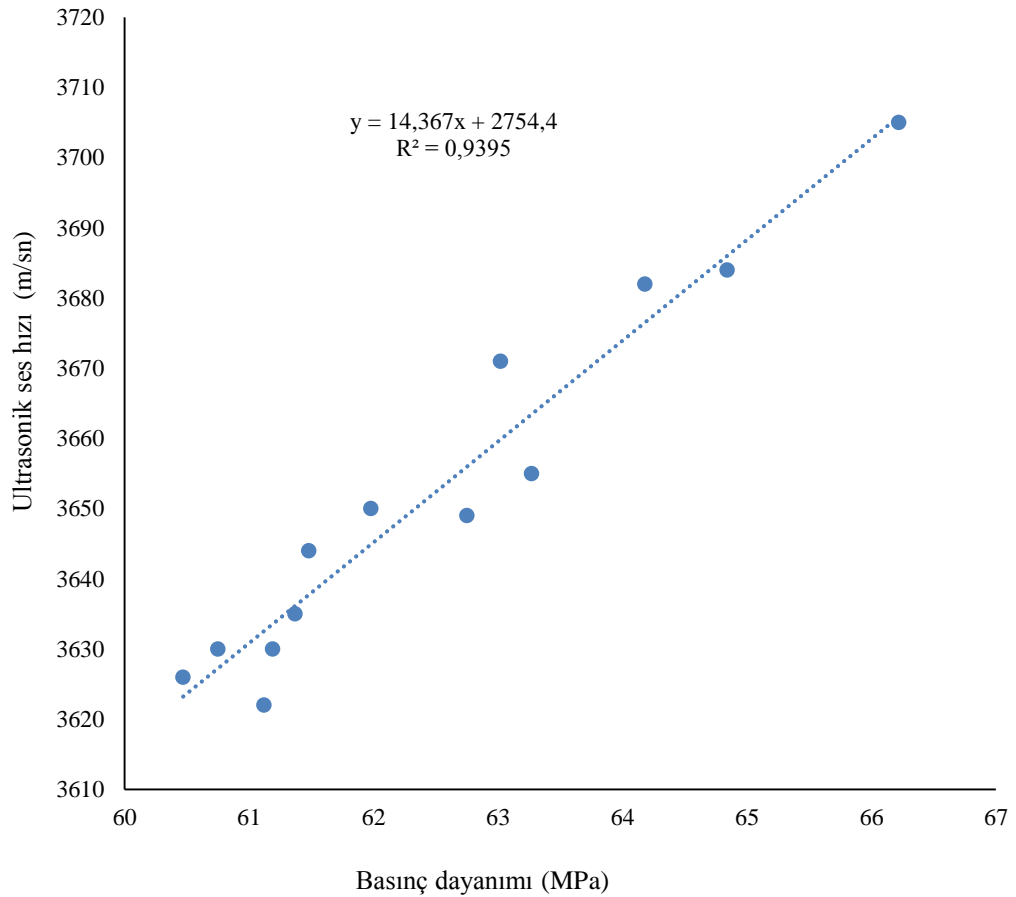


şekil 4.11. Metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlerin boy değişimi miktarı

PVA ve bazalt lif takviyeli numunelerde, nispeten daha düşük boy değişimi ve ağırlık kaybı değerleri oluşmuştur. Poliamid ve poliolefin lifli numuneler PVA ve bazalt lifli numunelerle kıyaslandığında daha zayıf bir performans göstermesine rağmen, bu liflerin varlığı, hem boy değişimi hem de ağırlık kaybına ilişkin kontrol numunesine göre belirli bir gelişme göstermesinde etkili olmuştur.

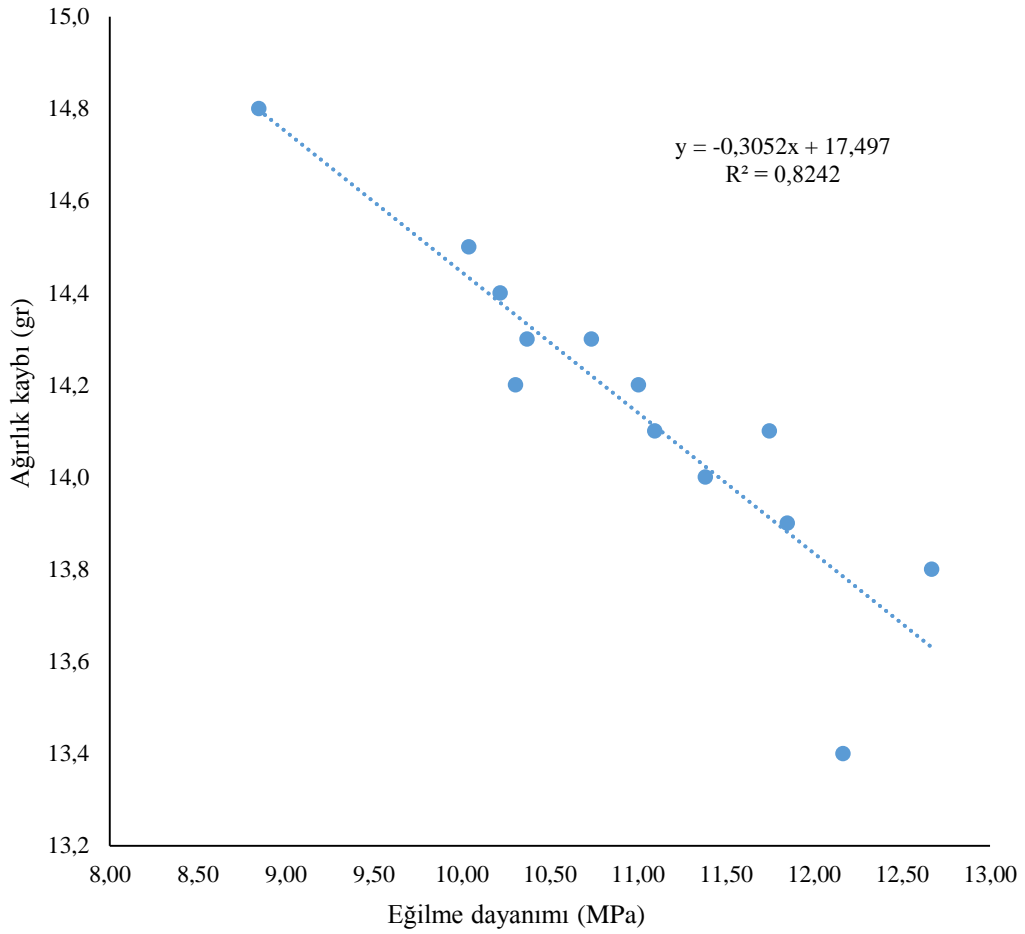
4.8. Araştırılan Bazı Özellikler Arasında Korelasyon

İncelenen bazı parametreler arasındaki korelasyon derecesini belirlemek için bir çalışmada bulunulmuştur. Basınç dayanımı sonuçlarıyla, basınç davranışı ile ultrasonik dalga akışı arasındaki korelasyon oranını incelemek için ultrasonik ses hızı testi sonuçları arasında korelasyon yapılmıştır.



Şekil 4.12. Ultrasonik ses hızı ile basınç dayanımı arasındaki korelasyon

Korelasyon grafiği (Şekil 4.12.) ve korelasyon faktörü ($R^2 = 93.95$) dikkate alındığında her ikisi de iyi derecede bir korelasyon göstermektedir. Ayrıca aşınmaya bağlı eğilme dayanımı sonuçları ile ağırlık kaybı test sonuçları arasında korelasyon ilişkisi tespit edilmiştir. Grafik incelendiğinde tatmin edici sonuçlar görülmüştür (Şekil 4.13.). Ayrıca korelasyon faktörünün değeri ($R^2 = 0.82$) elde edilen sonuçlar arasındaki kabul edilebilir korelasyon derecesi olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.13. Eğilme dayanımı ile ağırlık kaybı arasındaki korelasyon

4.9. Görsel İnceleme

Şekil 4.14.-4.16., yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra araştırılan karışım numunelerini göstermektedir. Şekil 4.14.'te, 300°C'ye maruz kaldıktan sonra numuneler görülmektedir. Şekil 4.14.'ten görülebileceği gibi, numunelerin dış yüzeyi üzerinde önemli değişiklikler olmamıştır ve bu numuneler, bu sıcaklıkta incelenen özelliklerin değişim oranlarıyla uyumlu olarak net bir renk değişimi geçirmemiştir. Bununla birlikte, 600 °C'den sonra (Şekil 4.15.), sıcaklığın etkisi numunelerde daha net olmaya başlamıştır. Numunelerin yüzeyi bu sıcaklığa maruz kaldıktan sonra daha kaba olma eğilimindedir. 900 °C'de, küçük çatlaklar daha net hale gelmiş ve numune kırılabilir olmuştur (Şekil 4.16.). Bu durum, geopolimer sistemi oluşturan ana zincirlerin yıkımıyla ilgilidir.



Şekil 4.14. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer numunelerin görsel incelenmesi (300°C)



Şekil 4.15. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer numunelerin görsel incelenmesi (600°C)



Şekil 4.16. Yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer numunelerin görsel incelenmesi (900°C)

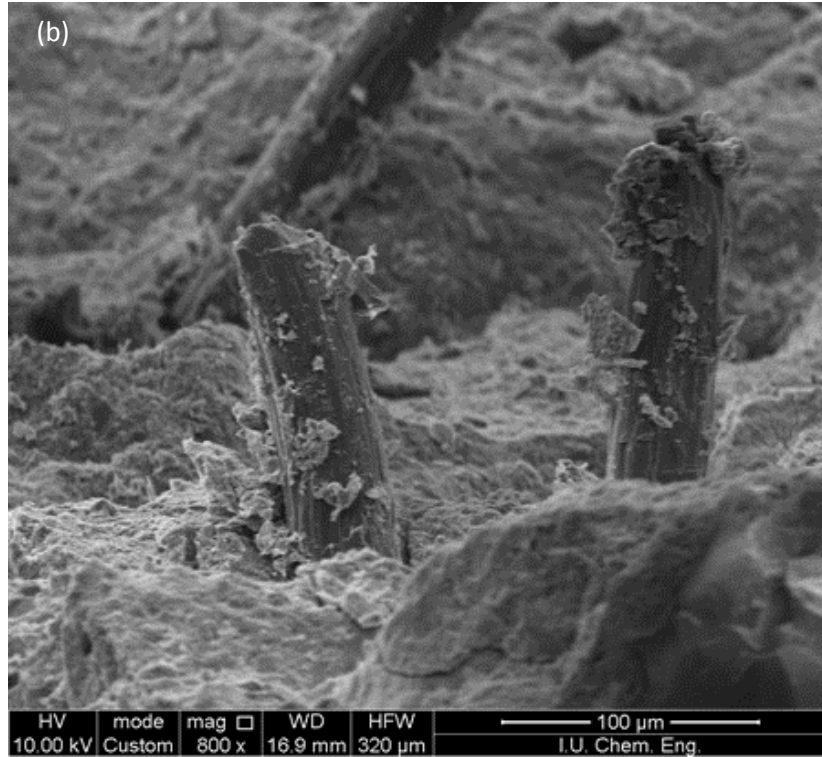
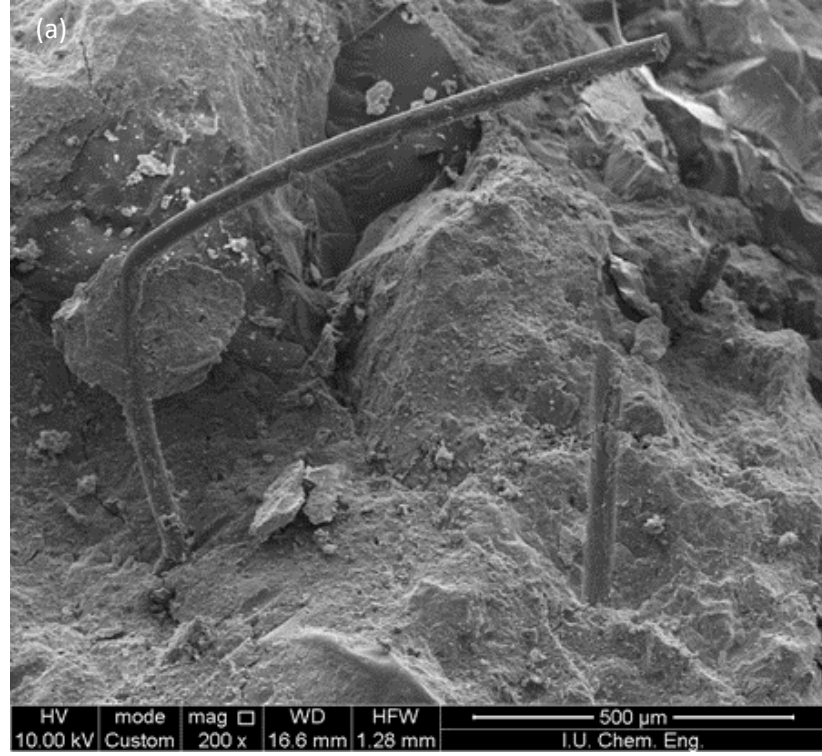
4.10. SEM Analizi

Geopolimerik matris ile kullanılan sentetik lifler arasındaki bağlanma derecesi hakkında bir fikir edinebilmek için, ısı işlem öncesi ve sonrası PVA, bazalt ve poliolefin lif takviyeli numuneler için taramalı elektron mikroskobu (SEM) gerçekleştirilmiştir. Genel olarak, lif ve matris arasında kabul edilebilir bir bağlanma derecesi gözlemlenmiş, liflerin varlığı, üretilen kompozitlerin mikroyapısını kimyasal olarak etkilememiştir.

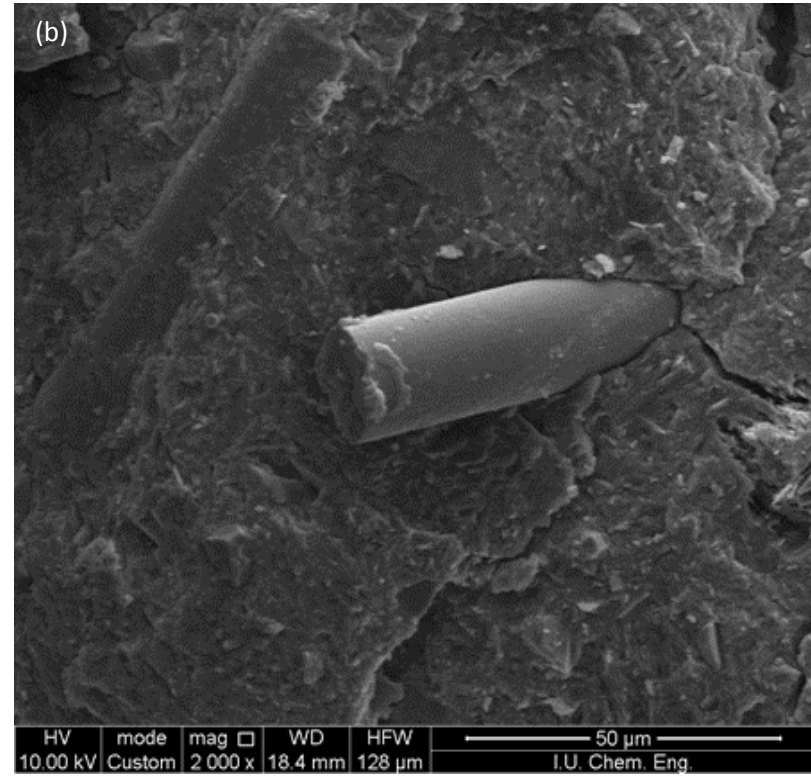
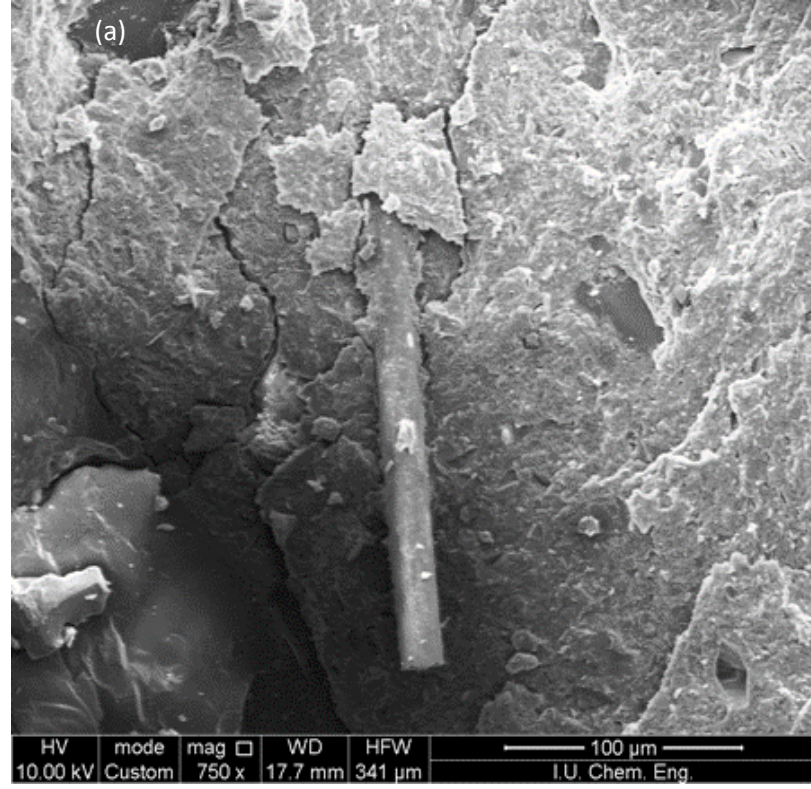
PVA liflerin mikrograflarını temsil eden Şekil 4.17., lifler ve matris arasında belirli bir derecede bağ oluşturur, bu tür bağlar PVA numunelerinin sağladığı özelliklerle ilgilidir. Bulgular, ayrıca PVA lif takviyeli geopolimer numunelerine ilişkin gözlemlerle de uyumludur. Şekil 4.18., bazalt lif takviyeli geopolimer numunelerinin mikrograflarını göstermektedir, aynı zamanda iyi bir arayüzey yapışması derecesini ortaya çıkarmaktadır.

Poliolefin liflerinin mikrografları, Şekil 4.19.'da gösterilmektedir, geopolimerik matris, liflerle gözle görülür bir arayüz bağı sağlamıştır. Isı etkisine maruz kaldıktan sonra numunelerin mikrografları ile ilgili olarak, lifler, Şekil 4.20.-4.21.'de gösterildiği gibi, 600°C sıcaklıktan sonra mukavemet bakımından kayda değer kaybı açıklayan tamamen erime eğiliminde olmuştur.

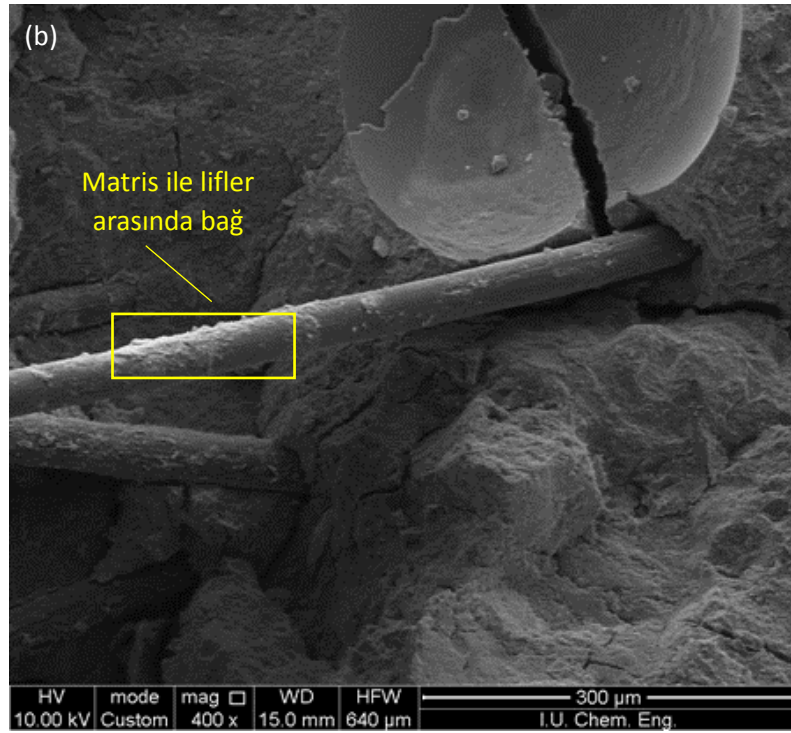
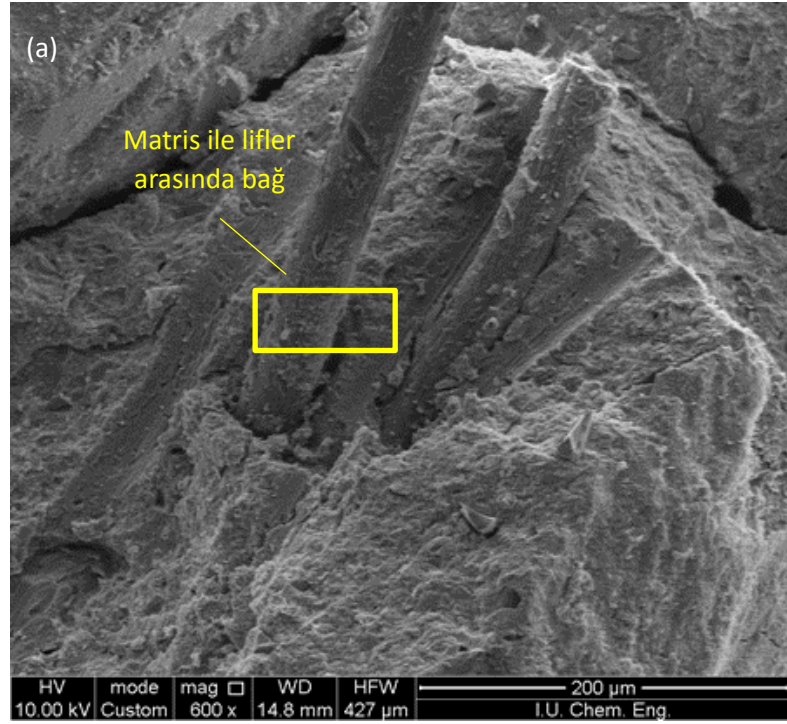
Ayrıca, geopolimerik ağın viskoz sinterlenmesi gerçekleşir ve yüksek sıcaklık etkisine bağlı olarak ortaya çıkan termal büzülmenin ana nedenini temsil eder. Bu etki, yükselen sıcaklıkla daha belirgin hale gelir ve bu nedenle, numuneleri Şekil 4.22.-4.23.'te gösterildiği gibi göçmeye daha eğilimli hale getiren daha az gözenekler oluşumuna neden olur.



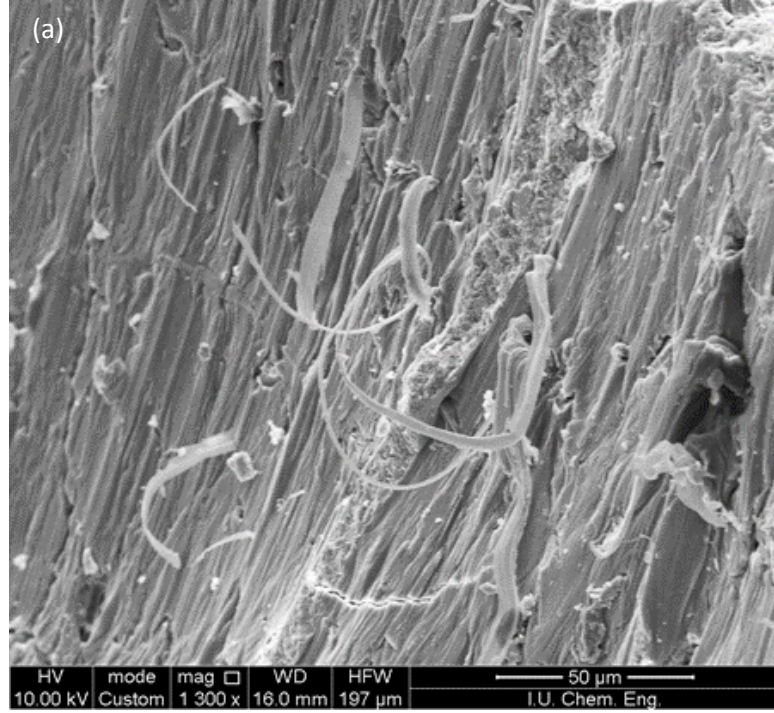
Şekil 4.17. Yüksek sıcaklığa maruz kalmamış PVA lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b)



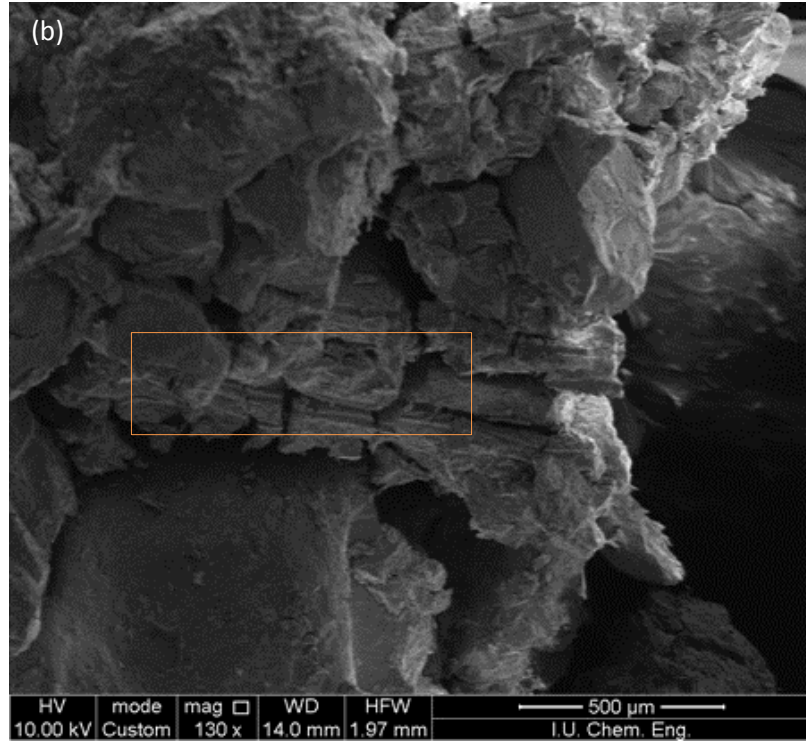
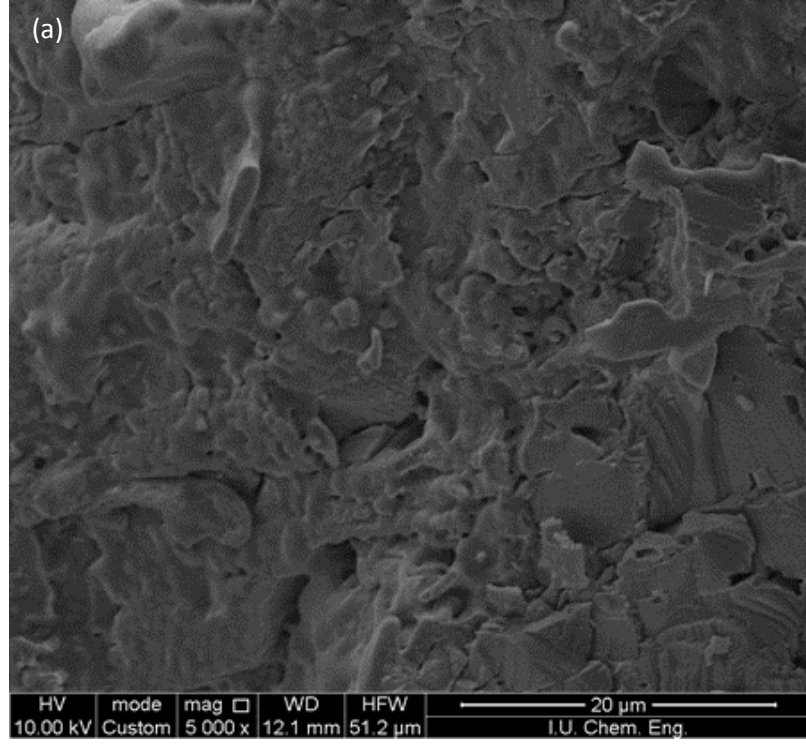
Şekil 4.18. Yüksek sıcaklığa maruz kalmamış bazalt lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b)



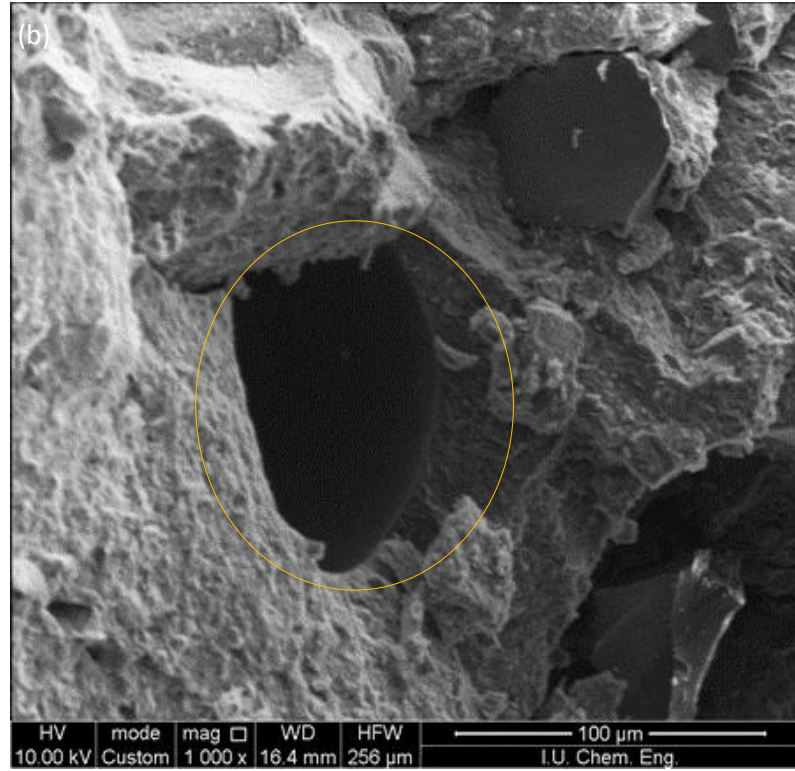
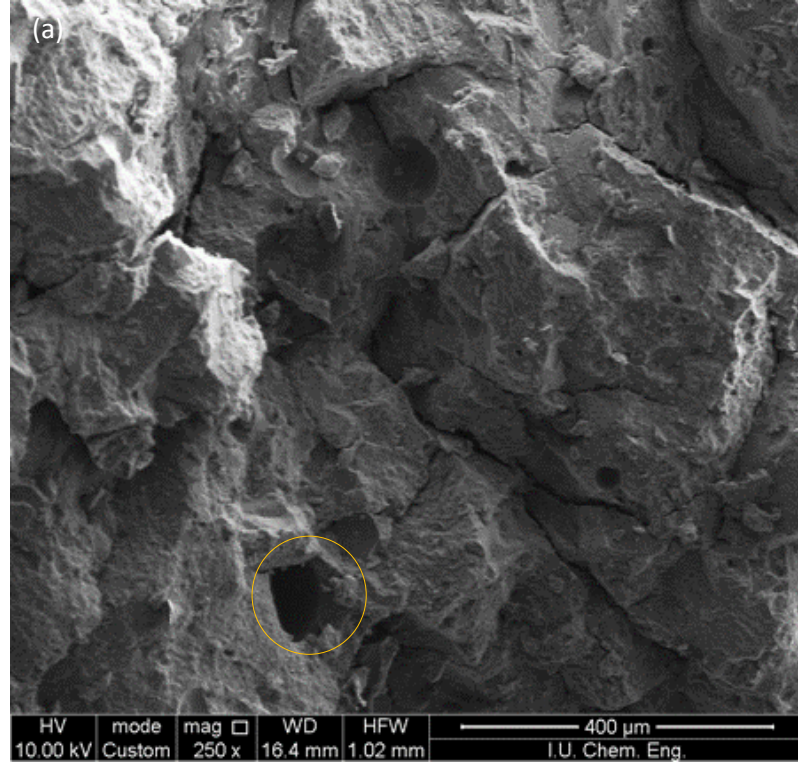
Şekil 4.19. Yüksek sıcaklığa maruz kalmamış poliolefin lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b)



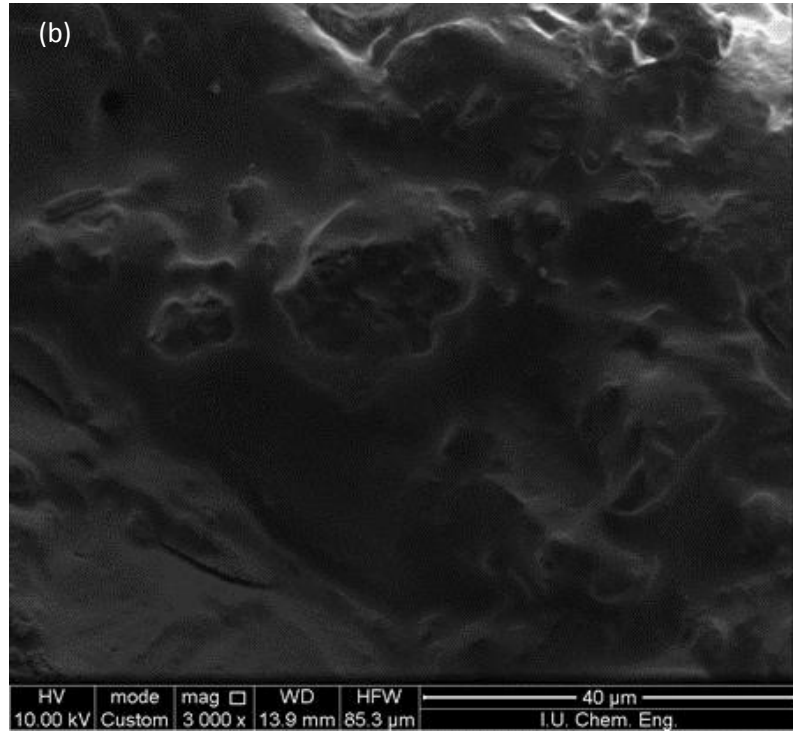
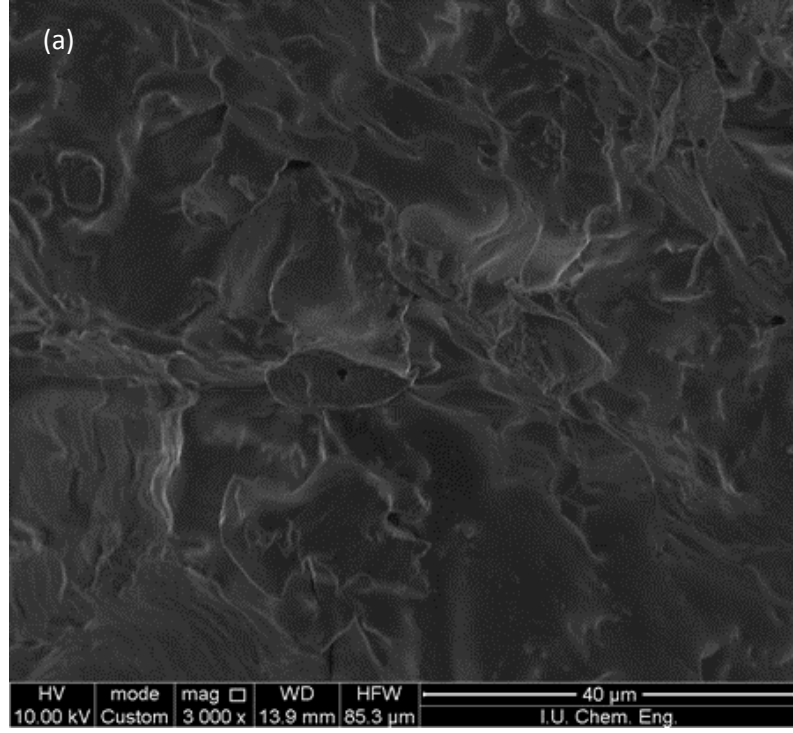
Şekil 4.20. 300°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış PVA lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b)



Şekil 4.21. 900°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış PVA lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b)



Şekil 4.22. 300°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış poliolefin lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b)



Şekil 4.23. 900°C yüksek sıcaklığa maruz kalmış poliolefin lifli numunelerin SEM görüntüleri (a) ve (b)

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma, kolemanit atığı ikame edilerek üretilen metakaolin tabanlı geopolimer kompozitlere sentetik liflerin takviye edilmesiyle oluşturulan kapsamlı bir deneysel programı özetlemektedir.

Deneysel sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- a. Karışımların artan lif içeriği ve yaş büyümesi, basınç dayanımı sonuçları üzerinde olumlu bir etki oluşturmuştur. PVA lif takviyeli numuneler, en yüksek iyileşme oranlarını elde ederek en iyi 28 günlük test sonuçlarını göstermiştir.
- b. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, PVA ve özellikle bazalt lif takviyeli numuneler, poliamid ve poliolefin numunelerinden daha düşük bir mukavemet azalması göstermiştir. Geopolimer kompozitlerini güçlendirmek için %1.2'lik bir hacim fraksiyonu oranı olarak PVA eklenmesi, kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında sırasıyla 3 günde %32.91, 7 günde %29.75 ve 27 günde %27.28 oranında eğilme mukavemetini arttırmıştır.
- c. Geopolimer kompozitlerin basınç ve eğilme dayanımları 600°C - 900°C sıcaklık aralığında önemli ölçüde azalmıştır. Sıcaklık arttıkça, tüm numuneler benzer davranış sergilemiş ve dikkate değer değişiklikler göstermiş, örneğin ultrasonik ses hızı değerlerinde 300°C 'ye kadar büyük düşüşler olmuştur.
- d. Isıl işlemde sonra ağırlık kaybı açısından, artan lif içeriğinin, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında üretilen harçların performansını artırmak için yararlı bir faktör olduğu bulunmuştur.

- e. Aşınma testi sonuçlarına göre, artan lif içeriği hem boy değişimlerinde hem de ağırlık kaybında hafif bir iyileşme sağlamıştır.

Geopolimer kompozitlerinde kolemanit atıkları %10 orana kadar kullanılabilir. Yapılan çalışmalarda, bor minerallerinin etkisi altında çimentolu sistemde çimento parçacıkları çevresinde koruyucu bir tabaka oluştuğu ve bu tabaka etkisiyle çimento parçacıkları ve su temasının önlenildiği tespit edilmiştir. Bu etki çimentolu malzemelerin hidrasyon mekanizmasını doğrudan etkiler. Bor katkı maddelerinin çimento esaslı kompozitlerin mukavemet özelliklerini arttırdığı da gözlemlenmiştir. Literatür incelendiğinde, kolemanit için artan dayanım açısından kritik bir eşik oranının olduğu görülebilir. % 10'dan fazla kolemanit kullanılmasıyla, sistemde kararsız bor bileşiklerine neden olan bazı anyon ve kationların, reaksiyon ile çimento aktivasyon mekanizmasına müdahale ettiği düşünülmektedir. Bu durum nedeniyle azalmanın görüldüğü düşünülmektedir. Daha spesifik olmak gerekirse, %10'a kadar kullanılan kolemanitin koruyucu bir tabaka ve boşluklar için dolgu maddesi olarak performansı, geopolimerik matrisin kırılma ve nispeten geçirgen bir matris olduğu gerçeğine dayanarak sonuçtaki matrisin mikroyapısına belirli bir iyileşme sağlar.

600°C'den sonra, basınç ve eğilme dayanımlarında önemli bir düşüş olmuştur. Geopolimer kompozitlerinin dayanımları, ısı reaksiyon mekanizması nedeniyle suyun ve serbest suyun buharlaşması sonucu oluşan geopolimer matrisinin dehidrasyonu ve yüksek sıcaklık nedeniyle liflerin erimesi ile 600°C ile 900°C arasındaki bir sıcaklık aralığında önemli ölçüde azaltılmıştır. Geopolimer harç numunesi için, yüksek sıcaklık etkisinde eğilme dayanımındaki düşüşün, basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bunun nedeni, eğilme mukavemetinin, çatlakların yayılması ve yüksek sıcaklıklarda gözenekli yapıların büyümesi gibi iç mikroyapı kusurlarının gelişmesine karşı daha duyarlı olmasıdır.

Tüm numuneler, yüksek sıcaklık etkisinde benzer davranış göstermiş ve 300°C 'den sonra ultrases geçiş hızı değerlerinde anlamlı bir düşüş gözlenmiştir. Gözlem sonucunda, katı geopolimerik matriste 300°C etkisinden sonra ciddi hasarların meydana geldiği ve bu durumun basınç ve eğilme dayanımı sonuçlarının kaybı ile

tutarlı olduğu tespit edilmiştir. Ek olarak, daha yüksek sıcaklık etkileriyle mikro çatlakların oluşumu artmış ve kompozitlerin yoğunluğu azalmıştır. Böylece ultrasonik hız dalgalarının yayılma süresi uzamış ve daha düşük ultrases geçiş hızı değerleri oluşmuştur. Ayrıca matris kompozitlerinde liflerin 300°C'nin üstünde erimesi ve mikroskopik kanalları terk etmesi nedeniyle daha düşük UPV değerleri oluşmuştur.

Geopolimerin katı matrisi, yüksek sıcaklık etkisinden sonra ciddi bir hasara uğrar ve artan sıcaklıklar, çatlakların genişlemesini arttırır ve matris boşluklarının oluşumu nedeniyle basınç dayanımı kaybını arttırır. Sıcaklık arttıkça, bir dehidrasyon reaksiyonu meydana gelir ve matristeki nem numune yüzeyine doğru hareket eder ve kaçar, bu durum mikro yapının iç hasarına ve sonuç olarak geopolimer kompozitinde ağırlık kaybına yol açar.

Görsel inceleme için fotoğraflar yüksek sıcaklık testinden hemen sonra çekilmiştir. Numuneler 300°C 'ye maruz kaldığında, basınç dayanımında azalma ile orantılı olarak önemli bir renk değişikliği olmamıştır. 600°C 'ye maruz kalan numunelerde renk değişimi gözlenmiştir. 600-900°C aralığında önemli bir basınç dayanımı kaybıyla, çatlaklar görülmeye başlanmıştır. 900°C'den sonra, geopolimer numunelerinde önemli miktarda renk değişikliği vardır, ancak çatlaklar daha düşük bir oranda kalmıştır. Bu durum geopolimer numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında stabilitesini koruması gerçeğiyle tutarlıdır. 900°C'den sonra numunelerin yüzeyi biraz daha kaba olma eğilimindedir. Metakaolin tabanlı geopolimer numunelerinin mikroyapıları, 500°C'den sonra yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında ağırlık kaybı, matris ayrışması ve faz dönüşümleri nedeniyle daha gözenekli hale gelmiştir. SEM analizi sonucu deformasyonlar ve makroyapısal çatlak oluşumu görünse de, mikroyapının, termal saldırıdan sonra değişmeden kaldığı gözlenmiştir.

Bu çalışmada sunulan sonuçlar, geopolimer kompozitlerin üretiminde kolemanit atığının başarıyla kullanılmasının mümkün olduğunu ortaya koymaktadır ve kolemanit atığının %10 oranında metakaolin geopolimer numunelerine eklenmesi

sonuçları olumlu yönde etkilemiştir. PVA ve bazalt lifleri, tüm deneysel gözlemler genel olarak birlikte ele alındığında modifiye poliamid ve poliolefin liflerinden daha iyi performans göstermiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Almashhadani, M.M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M., Erdem, S., Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 167: 505-513, 2018.
- [2] Kenneth, M.M.A., MacKenzie, J.D., Keyzers, R.A., Porous aluminosilicate inorganic polymers (geopolymers): a new class of environmentally benign heterogeneous solid acid catalysts. *Applied Catalysis A: General*, 524: 173-181, 2016.
- [3] Jamieson, E., McLellan, B., Riessen, A., Nikraz, H., Comparison of embodied energies of Ordinary Portland Cement with Bayer-derived geopolymer products. *Journal of Cleaner Production*, 99: 112-118, 2015.
- [4] Li, Z., Li, S., Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 163: 668-680, 2018.
- [5] Duxson, P., Provis, J.L., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J., The role of inorganic polymer technology in the development of green concrete. *Cement and Concrete Research*, 37: 1590-1597, 2007.
- [6] Duxson, P., Lukey, G.C., van Deventer, J.S.J., Physical evolution of na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 degrees. *J. Mater. Sci.*, 42: 3044–3054, 2007.
- [7] Cheng, T.W., Lee, M.L., Ko, M.S., Ueng, T.H., Yang, S.F., The heavy metal adsorption characteristics on metakaolin-based geopolymer. *Appl. Clay Sci.* 56: 90–96, 2012.
- [8] Roviello, G., Menna, C., Tarallo, O., Ricciotti, L., Ferone, C., Colangelo, F., Asprone, D., Maggio, R., Cappelletto, E., Prota, A., Preparation, structure and properties of hybrid materials based on geopolymers and polysiloxanes. *Materials & Design* 87: 82-94, 2015.

- [9] Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qiu, X., Li, D., A comparative study of high- and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. *Materials & Design* 95: 63–74, 2016.
- [10] Rieger, D., Kovarik, T., Riha, J., Medlin, R., Novotny, P., Belsky, P., Kadlec, J., Holba, P., Effect of thermal treatment on reactivity and mechanical properties of alkali activated shale-slag binder. *Construction and Building Materials*, 83: 26–33, 2015.
- [11] Chen, L., Wang, Z., Wang, Y., Feng, J., Preparation and properties of alkali activated metakaolin-based geopolymer. *Materials* 9: 1-12, 2016.
- [12] Tchakouté, H.K., Rüscher, C.H., Kong, S., Kamseu, E., Leonelli, C., Geopolymer binders from metakaolin using sodium waterglass from waste glass and rice husk ash as alternative activators: A comparative study. *Construction and Building Materials*, 114: 276–289, 2016.
- [13] Gougazeh, M., Geopolymers from Jordanian metakaolin: influence of chemical and mineralogical compositions on the development of mechanical properties. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7: 236-257, 2013.
- [14] Duana, P., Yana, C., Zhou, W., Influence of partial replacement of fly ash by metakaolin on mechanical properties and microstructure of fly ash geopolymer paste exposed to sulfate attack. *Ceramics International* 42: 3504–3517, 2016.
- [15] Wang, H., Li, H., Yan, F., Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 268: 1–6, 2005.
- [16] Sevim, U.K., Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength. *Materials and Structures*, 44: 187-193, 2011.
- [17] Gencil, O., Brostow, W., Ozel, C., Filiz, M., An investigation on the concrete properties containing colemanite. *International Journal of Physical Sciences*, 5(3): 216-225, 2010.
- [18] Kula, I., Olgun, A., Erdogan, Y., Sevinc, V., Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement. *Cement and Concrete Research*, 31: 491–494, 2001.
- [19] Ozdemir, M., Ozturk, N.U., Utilization of clay wastes containing boron as cement additives. *Cem. Concr. Res.*, 33: 1659–1661, 2003.

- [20] Assaedi, H., Alomayria, T., Shaikh, F.U.A., Low, I.M., Characterisation of mechanical and thermal properties in flax fabric reinforced geopolymer composites. *Journal of Advanced Ceramics*, 4(4): 272–281, 2015.
- [21] Amuthakkannan, P., Manikandan, V., Jappes, J.T.W., Uthayakumar, M., Effect of fibre length and fibre content on mechanical properties of short basalt fibre reinforced polymer matrix composites. *Materials Physics and Mechanics*, 16: 107-117, 2013.
- [22] Menna, C., Asprone, D., Ferone, C., Colangelo, F., Balsamo, A., Prota, A., Use of geopolymers for composite external reinforcement of RC members. *Composite Part B Eng.*, 45: 1667–76, 2013.
- [23] Ricciotti, L., Roviello, G., Tarallo, O., Borbone, F., Ferone, C., Colangelo, F., Synthesis and characterizations of melamine-based epoxy resins. *Int. J. Mol. Sci.*, 14: 18200–14, 2013.
- [24] Zhang, Y., Sun, W., Li, Z., Zhou, X., Impact properties of geopolymer based extrudates incorporated with fly ash and PVA short fiber. *Constr. Build. Mater.*, 22: 370–83, 2008.
- [25] Sun, P., Wu, H., Transition from brittle to ductile behavior of fly ash using PVA fibers. *Cement and Concrete Composites*, 30: 29–36, 2008.
- [26] Dias, D.P., Thaumaturgo, C., Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibres. *Cem. Concr. Compos.*, 27: 49–54, 2005.
- [27] Arunagiri, K., Elanchezhiyan, P., Marimuthu, V., Arunkumar, G., Rajeswaran, P., Mechanical properties of basalt fiber based geopolymer concrete. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 6: 551-556, 2017.
- [28] Li, Z., Zhang, Y., Zhou, X., Short fiber reinforced geopolymer composites manufactured by extrusion. *J. Mater. Civ. Eng.*, 17(6): 624-631, 2005.
- [29] Zhang, Y., Sun, W., Li, Z., Zhou, X., Geopolymer extruded composites with incorporated fly ash and polyvinyl alcohol short fibre. *ACI Mater J.*, 106(1): 3–10, 2009.
- [30] Xu, F., Deng, X., Peng, C., Zhu, J., Chen, J., Mix design and flexural toughness of PVA fiber reinforced fly ash-geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 150: 179–189, 2017.

- [31] Tanyildizi, H., Yonar, Y., Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 126: 381–387, 2016.
- [32] Jeon, J.K., Kim, W.S., Jeon, C.K., Kim, J.C., Processing and mechanical properties of macro polyamide fiber reinforced concrete. *Materials*, 7: 7634–7652, 2014.
- [33] Spadea, S., Farina, I., Carrafiello, A., Fraternali, F., Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement. *Construction and Building Materials*, 80: 200–209, 2015.
- [34] Alberti, M.G., Enfedaque, A., Galvez, J.C., Canovas, M.F., Osorio, I.R., Polyolefin fiber-reinforced concrete enhanced with steel-hooked fibers in low proportions. *Materials and Design*, 60: 57–65, 2014.
- [35] Han, T.Y., Lin, W.T., Cheng, A., Huang, R., Huang, C.C., Influence of polyolefin fibers on the engineering properties of cement-based composites containing silica fume. *Materials and Design*, 37: 569–576, 2012.
- [36] Yan, L., Pendleton, R.L., Jenkins, C.H.M., Interface morphologies in polyolefin fiber reinforced concrete composites. *Composites Part A*, 29A: 643–650, 1998.
- [37] Alberti, M.G., Enfedaque, A., Galvez, J.C., Reyes, E., Numerical modelling of the fracture of polyolefin fibre reinforced concrete by using a cohesive fracture approach. *Composites Part B*, 111: 200–210, 2017.
- [38] Deng, Z., Shi, F., Yin, S., Tuladhard, R., Characterisation of macro polyolefin fibre reinforcement in concrete through round determinate panel test. *Construction and Building Materials*, 121: 229–235, 2016.
- [39] United States Geological Survey (USGS), USGS mineral program cement report. USA: United States Geological Survey, Washington Post., 2009.
- [40] Klein, M., Donald, R., Development of CME National Emission Guidelines for Cement Kilns. *International Symposium on Sustainable Development of the Cement and Concrete Industry*, 16–30, 1998.
- [41] Gibbs, M.J., Soyka, P., Conneely, D., CO₂ Emissions From Cement Production. *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories journal*.
- [42] Brunner, B., *Time Almanac 2001*. Time Inc., Boston, 594, 2001.

- [43] Huntzinger, D.N., Eatmon, T.D., A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17: 668–675, 2009.
- [44] Stajanča, M., Eštokova, A., Environmental Impacts Of Cement Production. 2012.
- [45] Klee, H., Hunziker, R., Meer, R., Westaway, R., Getting the Numbers Right: a database of energy performance and carbon dioxide emissions for the cement industry. *Greenhouse gas measurement and management journal*, 109-118, 2010.
- [46] Mehta, P.K., Burrows, R.W., Building durable structures in th 21st century. *American Concrete Institute journal, concrete international*, 57-63, 2001.
- [47] Mehta, P.K., Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. *American Concrete Institute journal, concrete international*, 23-28, 2002.
- [48] Macaffrey, R., Climate change and the cement industry. *Global cement and lime magazine*, 9-15, 2002.
- [49] Davidovits, J., Geopolymer Chemistry and Application. Institute of Geopolymer, Quentin, France – 4th editions, 2008.
- [50] Palmo, A., Grutzeck, M.W., Blanco, M.T., Alkali-activated fly ashes A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, Spain, 1999.
- [51] Davidovits, J., Geopolymer Cement. Institute of Geopolymer, France, 2013.
- [52] Davidovits, J., Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Thermal Analysis Journal*, Saint Quentin, France, 1991.
- [53] Davidovits, J., Environmentally Driven Geopolymer Cement Application. Geopolymer conference, Melbourne, Australia, 2002.
- [54] Palmo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., Fernandez-Jimenez, A., A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Construction materials journal*, Madrid, Spain, 2014.
- [55] Rahier, H., Van Mele, B., Wastiels, J., Low-temperature synthesized aluminosilicate glasses. *J. Mater. Sci*, 80-85, 1996.
- [56] Wallah, S.E., Rangan, B.V., Low –calcium fly ash based geopolymer concrete: long-term properties. *Research Report GC2*, Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 1-97, 2006.

- [57] Yip, C.K., Lukey, G.C., Provis, J.L., Van Deventer, J.S.J., *Cement and Concrete Research*, 38: 554, 2008.
- [58] Zivica, V., Palou, M., Ifka, T., *High Strength Metakaolin-Based Geopolymer*. Building Research Journal, 2012.
- [59] Ferone, C., Colangelo, F., Roviello, G., Asprone, D., Menna, C., Balsamo, A., Prota, A., Cioffi, R., Manfredi, G., *Application-Oriented Chemical Optimization of a Metakaolin Based Geopolymer*. University of Naples, 2013.
- [60] Gao, K., Lin, K.L., Wang, D., Hwang, C.L., Shiu, H.S., Chang, Y.M., Cheng, T.W., *Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers*. Yan-Tai University, China, University of Science and Technology, Taiwan, 2013.
- [61] Chen, L., Wang, Z., Wang, Y., Feng, J., *Preparation and Properties of Alkali Activated Metakaolin-Based Geopolymer*. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China, 2016.
- [62] Rovánik, P., *Effect of curing temperature on the development of the hard structure of metakaolin-based geopolymer*. Institute of Chemistry, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology, Czech Republic, 2009.
- [63] Soleimani, M.A., Naghizadeh, R., Mirhabibi, A.R., Golestanifard, F., *The Influence of Phosphorus Slag Addition on Microstructure And Mechanical Properties Of Metakaolin-Based Geopolymer Pastes*. School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Iran, 2013.
- [64] Bernal, S.A., Provis, J.L., Rose, V., Gutierrez, R.M., *Evolution of binder structure in sodium silicate – activated slag-metakaolin blends*. *Cement and concrete journal*, 46-54, 2011.
- [65] Behera, P., Baheti, V., Militky, J., Louda, P., *Elevated temperature properties of basalt microfibril filled geopolymer composites*. *Construction and Building Materials*, 2018.
- [66] Rill, E., Lowry, D.R., Kriven, W.M., *Properties of Basalt Fiber Reinforced Geopolymer Composites*. Department of Material Science and Engineering, University of Illinois at Urban-Champaign, Urbana, USA, 2018.

- [67] Ekaputri, J.J., Junaedi, S., Wijaya, Effect of curing temperature and fiber on metakaolin- based geopolymer. Sustainable civil engineering structures and construction materials, 2016.
- [68] Zhang, H., Kodur, V., Cao, L., Qi, S., Fiber reinforced geopolymers for fire resistance applications. Procedia engineering journal, 153-158, 2014.
- [69] Aponte, L., Gutierrez, R., Ramirez, A., Metakaolin-Based Geopolymer with Added TiO₂ Particles: Physicomechanical characteristics. Coatings Journal, 2017.
- [70] Lahoti, M., Wong, K.K., Yang, E., Tan, K.H., Effects of Si/Al molar ratio on strength endurance and volume stability of metakaolin geopolymers subject to elevated temperature. Ceramics International journal, 5726-5734, 2018.
- [71] Zhang, Y.J., Wang, Y.C., Xu, D.L., Li, S., Mechanical performance and hydration mechanism of geopolymer composite reinforced by resin. Material science and engineering a journal, 6574-6580, 2010.
- [72] Villaquiran, M.A., Rodriguez, E., Guitierrez, R.M., Thermal assessment of metakaolin-based geopolymer systems produced with silica fume and rice husk ash. Informador Tecnico (Colombia) journal, 6-11, 2014.
- [73] Yilmaz, S., Ozkan, O.T., Gunay, V., Crystallization kinetics of basalt glass. Ceramics International, 22: 477-481, 1996.
- [74] Sim, J., Park, C., Moon, D.Y., Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. Composites Part B: Engineering, 36: 504-512, 2005.
- [75] Kong, D.L.Y., Sanjayan, J.G., Crentsil, K.S., Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. Cement and Concrete Research, 37: 1583–1589, 2007.
- [76] Natali, A., Manzi, S., Bignozzi, M.C., Novel fibre reinforced composite materials based on sustainable geopolymer matrix. Proc. Eng., 21: 1124–31, 2011.
- [77] Kabay, N., Abrasion resistance and fracture energy of concretes with basalt fiber. Construction and Building Materials, 50: 95–101, 2014.
- [78] ASTM C109/109M, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. Annual Book of ASTM Standards (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens, 1. Chemical Analysis, (C109/C109M – 11b), 1-9. 2010.

- [79] ASTM C348, Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars. Annual Book of ASTM Standards, 2-7, 1998.
- [80] ASTM C944/C944, Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method. ASTM International, 1-5, (2012),

ÖZGEÇMİŞ

Abdullah ÇELİK, 25.10.1976'da İstanbulda doğdu. İlk, Orta ve Lise eğitimini İstanbulda tamamladı. 1994 Yılında Maçka Akif Tuncel Anadolu Teknik Lisesinden mezun oldu. 1994 Yılında başladığı Sakarya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 1998'de tamamladı. Aynı Yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği Yapı Anabilim Dalında Yüksek Lisansa Başladı, 2001 yılında mezun oldu. 2002 yılında aynı üniversite Fen Bilimleri Enstitüsünde İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi Anabilim Dalında Doktora eğitimine başladı. 2000 Yılında kazandığı Devlet Memurluğu Sınavı ile İstanbul Esenler Belediyesinde memur olarak çalışmaya başladı. 2003 Yılında Eyüp Belediyesine naklen atandı. 2003-2007 yılları arasında Eyüp Belediyesi Fen İşleri Müdür Yardımcılığı, 2007 - 2013 yılları arasında Eyüp Belediyesi Bilgi İşlem Müdürlüğü görevini üstlendi. Halen, 2013 yılında naklen atandığı Yıldız Teknik Üniversitesinde İdari Kadroda E-Yıldız Şube Müdürlüğü görevini ifa etmektedir.