



T.C.

ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ



POLİMERİK LİF KATKILI
GÜÇLENDİRİLMİŞ JEOPOLİMER
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ

Burcu KARTAL

Enerji Kaynakları ve Yönetimi

ÇANAKKALE

Not: Tez kapağı yüksek lisans tezlerinde “Turkuaz”, doktora tezlerinde “Mavi” dir.

(Tez basımı aşamasında bu sayfa basılmayacaktır. Tez dış kapak örneğidir)

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİMERİK LİF KATKILI
GÜÇLENDİRİLMİŞ JEOPOLİMER
KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ

Burcu KARTAL

Enerji Kaynakları ve Yönetimi

Tezin Sunulduğu Tarih: 03/01/2019

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Uğur CENGİZ

ÇANAKKALE

Burcu KARTAL tarafından Doç. Dr. Uğur CENGİZ yönetiminde hazırlanan ve **03/01/2019** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan “**Polimerik Lif Katkılı Güçlendirilmiş Jeopolimer Kompozit Malzeme Üretimi**” başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

Doç. Dr. Uğur CENGİZ

.....

Başkan

Prof. Dr. Sermet KOYUNCU

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Hikmet OKKAY

.....

Üye

Prof. Dr. Levent GENÇ

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

Sıra No:.....

Bu çalışma Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince Desteklenmiştir. Proje Numarası: FYL-2018-2469

İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI



Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belirttiğimi beyan ederim.

Burcu KARTAL

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde, çalıŐmam boyunca benden bir an olsun yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini aktaran saygı değer danışman hocam Doç. Dr. Uğur CENGİZ'e, değerli tespitleri için Prof. Dr. Sermet KOYUNCU'ya, önemli dözeltmeleriyle görüŐlerini esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Hikmet OKKAY'a, jeopolimer malzemelerin mekanik testinin yapılmasını sağlayan AK-Kim kimya sanayine, Kamil ÖZGÜR ve Őeyma YILMAZ'a, FTIR analizleri için Doç. Dr. Hüseyin AYVAZ'a, XRD analizleri için OBİLTUM'a, desteklerini her zaman hissettiğim sevgili aileme ve bu araŐtırmayı FYL-2018-2469 no'lu proje ile destekleyen BAP'a sonsuz minnet ve teŐekkürlerimi sunarım.

Burcu KARTAL
anakkale, Ocak 2019

SİMGELER VE KISALTMALAR

Å	Angstrom
Al	Alüminyum
ASTM	American Society for Testing and Materials
Cu	Bakır
CO ₂	Karbondioksit
XRD	X ışını difraksiyonu
XRF	X-Ray Spektrometre
FT-IR	Fourier Dönüşümlü Infrared Spektrofotometre
OPC	Normal Portland Çimentosu
%	Yüzde oranı
TL	Türk Lirası
IUPAC	Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği
OPC	Normal Portland Çimentosu
MPa	MegaPascal
KOH	Potasyum Hidroksit
NaOH	Sodyum Hidroksit
Si	Silisyum
PP	Polipropilen
PS	Poli sialat
PSS	Poli sialat-silokso
NaSiO ₃	Sodyum Silikat
Al ₂ O ₃	Alüminyum Oksit
SiO ₂	Silisyum di Oksit

ÖZET

POLİMERİK LİF KATKILI GÜÇLENDİRİLMİŞ JEOPOLİMER KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ

Burcu KARTAL

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Uğur CENGİZ

03/01/2019, 64

Bu çalışmada sentetik lif takviyeli jeopolimer betonun yapısal ve malzeme özellikleri araştırılmıştır. Jeopolimerler, normal sıcaklık koşullarında reaktif alümina silikat malzemelerinin ve silikat çözeltilerinin polikondensasyon reaksiyonu ile oluşan kristal olmayan alümina silikat polimerleridir. Mekanizma farklı SiO_2 , Al_2O_3 , $\text{Na}_2\text{O-K}_2\text{O}$ ve H_2O oranlarından oluşan reaksiyona dayanmaktadır. Lif katkılı jeopolimer malzemelerin kimyasal bileşimlerine bağlı olarak; kanalizasyon boru ürünleri, ateş ve kimyasallara dayanıklı duvar panelleri, koruyucu kaplamalar ve tamir malzemeleri, püskürtme beton ve yüksek performanslı lif katkılı laminatlar gibi çeşitli uygulamalarda kullanılabilir. Bu çalışmada, liflerin metakaolin bazlı jeopolimer betonun mukavemetine etkisine odaklanılmıştır. Lif oranı ağırlıkça % 0-1 arasında tutulmuştur. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$: 3, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$: 1, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$: 18 molar oranı sabitlenmiştir. Mekanik karakterizasyon çalışmaları, basınç ve eğilme dayanımı testleri ile gerçekleştirilmiştir. Jeopolimerin yapısal analizleri ve başlangıç materyalleri de XRD, XRF ve FTIR ile araştırılmıştır.

Anahtar sözcükler: Jeopolimer, Kompozit, Lif Katkısı.

ABSTRACT

PRODUCTION OF POLYMERIC FIBER REINFORCED GEOPOLYMER COMPOSITE MATERIAL

Burcu KARTAL

Çanakkale Onsekiz Mart University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Energy Resources and Management Graduate Thesis

Advisor: Doç. Dr. Uğur CENGİZ

03/01/2019, 64

In this study, the structural and material characteristics of synthetic fiber reinforced geopolymer concrete is investigated. Geopolymers are noncrystal alumina silicate polymers formed by the polycondensation reaction of reactive alumina silicate materials and silicate solutions at normal temperature conditions. The mechanism is based on the reaction of different $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Na}_2\text{O}$ or K_2O and H_2O ratios. Depending on the chemical composition of the fiber reinforced geopolymer materials; source materials and activators can be used in a variety of applications such as sewer piping products, fire and chemical resistant wall panels, wall units, protective coatings and repair materials, shotcrete and high performance fiber reinforced laminates. This study focused on the effect of fibres on mechanical and flexural performance of metakaolin based geopolymer concrete. The fiber ratio was arranged from 0 to 1 % wt. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$: 3 moles, $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$: 1 mole, $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$: 18 moles ratio was fixed. Mechanical characterization studies were carried out by compressive and flexural strength tests. The structure analyses of geopolymer and its starting materials were also investigated by XRD, XRF and FTIR.

Keywords: Geopolymer, Fiber, Reinforced, Composite.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ SINAVI SONUÇ FORMU	ii
İNTİHAL (AŞIRMA) BEYAN SAYFASI.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	v
ÖZET	vi
ABSTRACT.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1. Jeopolimer	2
1.2. Jeopolimerizasyon.....	6
1.3. Jeopolimer Malzemelerin Termal ve Mekanik Özellikleri	10
1.4. Lif Katkılı Jeopolimerler	12
1.5 Jeopolimerlerin Kullanım Alanları	14
BÖLÜM 2	
ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	17
BÖLÜM 3	
MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
3.1. Materyal	26
3.1.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler	26
3.1.2. Deneyde Kullanılan Cihazlar	30
3.2. Yöntem.....	33
3.2.1. Jeopolimer Reçetelerinin Belirlenmesi.....	33
3.2.2. Hammaddenin Karakterizasyonu	37
3.2.3. Jeopolimerin Karakterizasyonu	38
BÖLÜM 4	
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	40
4.1 Metakaolenin Karakterizasyonu.....	40
4.1.1 XRF Sonucu	40
4.1.2 FT-IR Sonucu	41
4.1.2 XRD Sonucu.....	41
4.2 Jeopolimerin Optimizasyonu	42

4.2.1 Mukavemet Sonucu	42
4.3 Jeopolimerin Karakterizasyonu.....	43
4.3.1 FT-IR Sonuçları.....	43
4.3.2 XRD Sonuçları	46
4.3.3 Mukavemet Sonuçları.....	47
4.3.4 Mikroskop Sonuçları	51
4.4 Bulguların Tartışılması.....	53
BÖLÜM 5	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	58
KAYNAKLAR	59
ÖZGEÇMİŞ	I



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Alkali ortamda fenol ve formaldehitin polikondensasyonu (Davidovits, 2015) ...	3
Şekil 1.2. Alkali ortamda kaolinit Si_2O_5 , $\text{Al}_2(\text{OH})_4$ 'ün polikondensasyonu (Davidovits, 2015)	3
Şekil 1.3. Jeopolimer zincir yapıları (Davidovits J., 2011)	7
Şekil 1.4. Jeopolimerizasyon mekanizması	10
Şekil 2.1. Jeopolimer mazlemelerin termal direncinin üçlü şemada gösterimi	22
Şekil 2.2. Değişen $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının jeopolimerin mukavemetine etkisi	24
Şekil 3.1. 6 mm PP Lifi mikroskop görüntüleri	27
Şekil 3.2. 12 mm PP Lifi mikroskop görüntüleri	28
Şekil 3.3. 54 mm Fibermash 650s Lif görüntüleri	29
Şekil 3.4. 54 mm Macromesh Fiber Lif görüntüleri	29
Şekil 3.5. Mukavemet testlerinin yapıldığı cihaz	30
Şekil 3.6. Deneyde kullanılan FT-IR cihazı	31
Şekil 3.7. Deneyde kullanılan mikroskop	31
Şekil 3.8. Deneyde kullanılan XRD cihazı	32
Şekil 3.9. Jeopolimerin döküldüğü $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ 'lük çelik kalıp	32
Şekil 3.10. Lif katkılı jeopolimer malzeme üretimi (Sabattini, 2017)	37
Şekil 4.1. Metakaolin FT-IR sonucu	41
Şekil 4.2. Metakaolin XRD sonucu	41
Şekil 4.3. Jeopolimer örneklerinin eğilme mukavemeti test sonuçları	43
Şekil 4.4. Jeopolimer örneklerinin basınç mukavemeti test sonuçları	43
Şekil 4.5. J3 jeopolimeri FT-IR sonucu	44
Şekil 4.6. J5 jeopolimeri FT-IR sonucu	45
Şekil 4.7. J7 jeopolimeri FT-IR sonucu	45
Şekil 4.8. J9 jeopolimeri FT-IR sonucu	46
Şekil 4.9. Metakaolin ve jeopolimerlerin XRD sonucu	46
Şekil 4.10. J7 M54 jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu	48
Şekil 4.11. J7 M54 jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu	48
Şekil 4.12. J7 F6 jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu	49
Şekil 4.13. J7 F6 jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu	49
Şekil 4.14. J7 F12 jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu	50
Şekil 4.15. J7 F12 jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu	50
Şekil 4.16. J7 M650S jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu	51
Şekil 4.17. J7 M650S jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu	51
Şekil 4.18. % 0,25 F6 lif içeren J7 jeopolimer kalıbın farklı büyütmelelere mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.	52
Şekil 4.19. % 0,50 F6 lif içeren J7 jeopolimer kalıbın farklı büyütmelelere mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.	52
Şekil 4.20. % 0,25 F6 lif içeren J8 jeopolimer kalıbın farklı büyütmelelere mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.	52
Şekil 4.21. % 1 F6 lif içeren J8 jeopolimer kalıbın farklı büyütmelelere mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.	53

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 1.1. Jeopolimer kimyasındaki ilerlemeler.....	4
Çizelge 1.2. Enerji ihtiyacı, MJ/ton	5
Çizelge 1.3. Bir ton çimento üretimi için salınan sera gazı emisyonu.....	5
Çizelge 1.4. Jeopolimer Si: Al oranına göre uygulama alanları	15
Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan sodyum silikatın analizi.....	26
Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan liflerin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	27
Çizelge 3.3. Lif içermeyen jeopolimer reçeteleri	35
Çizelge 3.4. Lif katkılı jeopolimer reçeteleri	36
Çizelge 4.1. Metakaolin XRF sonuçları.....	40
Çizelge 4.2. Jeopolimer molar oranları.....	42
Çizelge 4.3. Farklı SiO ₂ /Al ₂ O ₃ oranlarındaki jeopolimerlerin mukavemet test sonuçları...	42
Çizelge 4.4. IR spektrumunda dalga sayısı ve bağlar	44
Çizelge 4.5. Lif katkılı J7 jeopolimer örneklerinin mukavemet sonuçları	47

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen endüstri, nüfus artışı ve beraberinde getirdiği artan tüketim ihtiyacı ile birlikte çevre koruma ve sürdürülebilir tasarıma yönelik çalışmalar geniş çapta artış göstermiştir. İnsan yaşamının kalitesini artırmak için gerçekleştirilen endüstriyel faaliyetlerdeki en önemli sorunlardan biri küresel ısınmadır. Küresel ısınma, atmosfere salınan sera gazlarının yaklaşık % 65'ini oluşturan CO₂ gibi gazların kompozisyonundaki değişim sonucu yeryüzünde oluşan sıcaklık artışıdır (McCaffrey, 2002).

Dünyadaki yıllık tüketimi 130 milyon tonu bulan Portland çimentosuna duyulan ihtiyaç her geçen yıl artmakta olup Portland çimentosu üzerine yapılan çalışmalar (Roy, 1999; Alzeer ve MacKenzie, 2013), 1 ton sıradan Portland çimentosunun üretilmesinin yaklaşık bir ton CO₂ salınımı gerektirdiğini göstermektedir. Dünya çapındaki CO₂ emisyonlarının % 5'inin Portland çimento üretiminden kaynaklandığı (Huntzinger and Eatmon, 2009) ve çevreye verdiği zarar değerlendirildiğinde Portland çimento imalatından kaynaklanan sera emisyonlarının farkındalığının artırılması ve alternatif bir "yeşil" malzeme aranması gerekmektedir (Ali, 2012).

Yüksek karbon ayak izi miktarının yanında iyi mekanik özelliklere sahip çimentoların inşaat alanında bazı uygulamalardaki yeterliliği konusunda sınırlamalar olmaktadır. Bazı sıvı kimyasalların betonun yüzeyinde bozulmaya sebep olması ve malzemenin yanmazlık derecesi yapının dayanıklılığı açısından ciddi sorunlara neden olmaktadır. Ancak, gelişen ve değişen dünya standartlarına paralel olarak mühendislik uygulamalarından beklenen performansın artmasıyla birlikte, geleneksel betonlar ihtiyaçlara cevap veremez duruma gelmiş ve mühendislik çalışmalarını betonun mekanik ve termal özelliklerini iyileştirmek adına çözüm bulmaya itmiştir.

Jeopolimerler bu tür dezavantajları olmayan alternatif yeni malzemelerdir (Roy, 1999; Barbosa ve diğerleri, 2000; Huntzinger and Eatmon, 2009; Alzeer ve MacKenzie, 2013). Jeopolimerlerin üretimleri Portland çimentosunun yaklaşık % 62- 66'sından daha düşük CO₂ salınımı gerektirdiğinden (Davidovits, 2015), bunlar yeşil çimentolar olarak kabul edilmekte (Duxson ve diğerleri, 2007; Essaidi ve diğerleri, 2014) ve jeopolimerlerin düşük sıcaklıklarda işlenmesi onları organik elyaflar da dahil olmak üzere çok çeşitli lifler için onları bir matris olarak uygun hale getirmektedir (Kriven ve ark., 2003). Ancak bu umut verici özelliklerden bağımsız olarak, jeopolimer malzemeler son derece kırılğan, seramik benzeri doğalarından dolayı çatlamaya karşı az direnç gösterirler. Üretilen

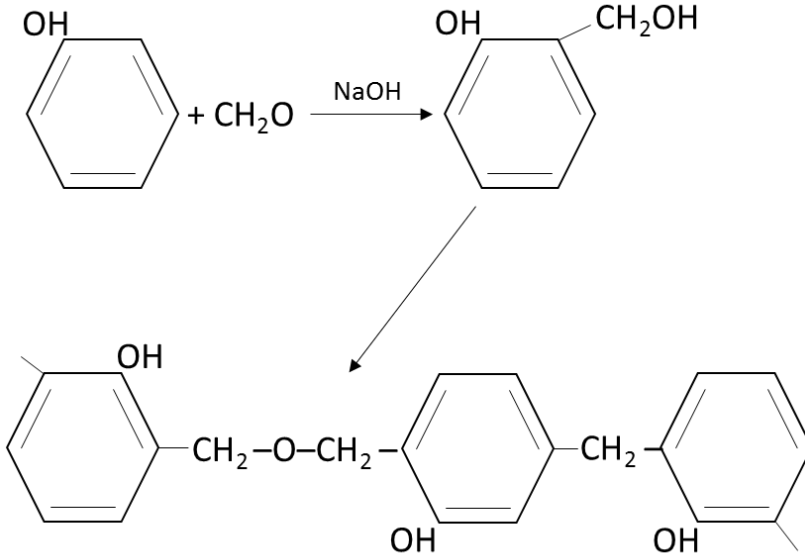
jeopolimer hangi etkiye ya da hangi zorlamaya karşı çalışacaksa bu durumun açıkça tanımlanarak bu yönünün güçlendirilmesi gerekmektedir. Jeopolimerlerin mekanik dayanımlarını artırma amacı, lif takviyesiyle "yeşil malzemeler" geliştirerek başarılabilir (Nematollahi ve diğerleri, 2014). Son yıllarda çok dikkat çeken yüksek mekanik performansa sahip kompozitlerdeki liflerin avantajları; düşük yoğunlukları, yüksek eğilme mukavemetleri, bükülebilirlikleri ve esneklikleridir (Ferreira ve diğerleri, 2010; Davidovits, 2011; Bohlooli ve diğerleri, 2012; Assaedi ve ark., 2015). Bu özelliklere dayanarak, harç içerisinde homojen olarak dağılan lifler bu kompozit sistemler için çekici bir takviye haline gelmektedir.

Bu tez çalışmasında, üretiminde yüksek CO₂ emisyonu ve yüksek enerji ihtiyacı olan çimento yerine daha sağlam, ısı yalıtım özelliği ile az enerji harcatacak, çevre dostu bir yapı malzemesi ihtiyacının karşılanabilmesi ve dünyanın, sera gazlarının neden olduğu küresel ısınmanın etkisinden korunmasına yönelik çalışmalarda polimerik lif katkılı güçlendirilmiş jeopolimer kompozit malzeme üretimi ve kullanımının önemi incelenmiştir.

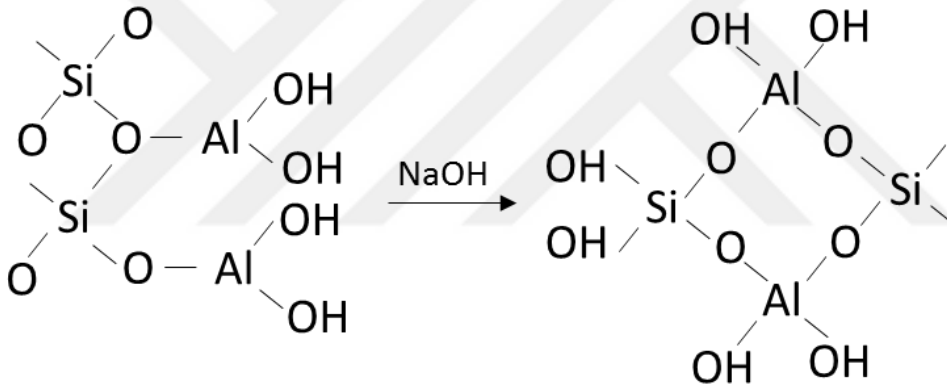
1.1. Jeopolimer

"Jeopolimer" terimi ilk olarak 1978 yılında, Davidovits tarafından zeolitlere benzeyen fakat amorf bir mikro yapıya sahip kimyasal bileşime sahip yarı kristal siliko-alüminat malzemeleri tanımlamak için kullanılmıştır. Jeopolimerler; kaplama ve yapıştırıcılar için yeni malzemeler, fiber kompozitler için yeni bağlayıcılar, atık kapsülleme ve betonlar içinse yeni çimentolardır. Jeopolimerlerin özellikleri ve kullanımları; modern inorganik kimya, fiziksel kimya, mineraloji, jeoloji, mühendislik teknolojileri gibi birçok bilimsel ve endüstriyel disiplin içerisinde incelenmektedir.

1970 yıllarında Fransa'da yaşanan ve ortak olarak organik plastik içeren çeşitli felaketlerin ardından, yanmazlık ve yanmaz plastik malzemeler üzerine yapılan araştırmalar artmıştır. Yeni inorganik polimer materyaller geliştirme arayışıyla 1972'de Davidovits tarafından Cordi-Géopolymère olarak adlandırılan özel araştırma şirketi Cordi SA kurulmuştur. Basit hidrotermal koşullarda, alkali ortamda oluşabilen zeolit gibi bazı organik plastikler çalışmaların ilham kaynağı olmuştur. 20. yüzyılın başlarında Bakeland tarafından icat edilen ve yapılan en eski plastiklerden biri olan bakalitin Şekil 1.1.'de gösterilen fenol ve formaldehitin alkali ortamdaki polikondenzasyonu ile oluşumu gibi alüminosilikat kaolinit de 100-150 °C'de sodyum hidroksitle ile reaksiyona girer ve polikondenzasyonla hidratlı sodalit veya hidroksi sodalit haline gelir.



Şekil 1.1. Alkali ortamda fenol ve formaldehitin polikondensasyonu (Davidovits, 2015)



Şekil 1.2. Alkali ortamda kaolinit Si_2O_5 , $\text{Al}_2(\text{OH})_4$ 'ün polikondensasyonu (Davidovits, 2015)

Şekil 1.2.'de gösterilen bu proses jeosentez olarak da adlandırılabilir. Amorf yarı kristal üç boyutlu siliko-alüminat malzemeler üzerine ilk çalışmalar 1973–1976'te "Siliface Prosesi" olarak adlandırılan tahta üstüne yapılan yangına dayanıklı kaplamalarla yapılmıştır. 1972'den beri, kaolinitik killerin dönüşümüne dayanan bir metodoloji uygulanırken sadece sıkıştırma veya ekstrüzyon yoluyla işlenebilmekte olan ıslak kil; 1975 yılında CORDI laboratuvarında, metakaolin ve çözünür alkali silikata dayalı bir jeopolimer sıvı bağlayıcının keşfi gerçekleşmiştir. 1975'ten sonra yine Davidovits tarafından metakaolinin siliface prosesindeki etkileri incelenmeye başlanmış ve metakaolin - sodyum hidroksit reaksiyonu ile elde edilecek sentetik zeolitlerin (tip Zeolit A) üretimi

için bir işlem bulunması hedeflenmiştir. Elde edilen karışımın 1 saat depolamadan sonra 100°C'yi aşan önemli bir ekzotermik reaksiyona eğilimli olması; karışım hemen karıştırılırsa, ekzotermik reaksiyonun çok güçlü olacağını ve 120°C'de 2 dakika içinde çok sertleşebilecek bir ürün elde edilebileceğini göstermiştir. Elde edilen malzemenin X-ışını kırınımında ise hidrosodalit ve Zeolit A'ya ait değerler bulunmuştur (Davidovits, 2015).

Çizelge 1.1. Jeopolimer kimyasındaki ilerlemeler

Hidrosodalit (Kaolen)	Jeopolimer
1963: Howell (ABD)	1976 : Davidovits Sialate Kimyası (IUPAC Terminoloji)
1964: Berg ve arkadaşları (Rusya)	1979 : Davidovits JEOPOLİMER (Fransa)
1969: Besson ve Arkadaşları (Fransa)	1979 : Davidovits Arkeoloji uygulamaları
1972: Davidovits (Fransa) Kaoolinitin NaOH ile polikondensasyonu	1980: Davidovits düşük maliyetli bina malzemesi (Fransa)
1975: Davidovits hidrosodalite Na-PS şekillendirilmiş ürünler	1981 : Davidovits jeopolimer köpük 1984 : Davidovits jeopolimer çimento(ABD) 1987: Davidovits fiber jeopolimer kompozit

1983 yılının başlarında, Amerika kıtasındaki lider çimento üreticisi Lone Star Industries'in başkanının Avrupa'da seyahati sırasında bilgi edindiği yeni jeopolimer bağlayıcılar için inşaat, mimari ve mühendislik uygulamaları üzerinde geniş kapsamlı bir etki yaratması beklenen yeni bir malzeme sınıfı geliştirmek, üretmek ve pazarlamak için bir Shell Oil Company ile birlikte Pyrament adında bir şirket kuracağını duyurmuştur. Organik polimerler ve monomerler ile birleştirilmiş mineral agregalardan oluşan yeni malzemeler, başka bir deyişle "organik polimer betonlar"; Shell Oil'den organik polimer kimyasal ihtiyacını sağlarken, Lone Star'dan da mineral agregatlar tedarik edilerek üretilmiştir. 1983 yılının Ağustos ayındaysa, Lone Star'ın yöneticisi James Sawyer ile hem jeopolimerik hem de hidrolik çimento kimyacılığına dayanan yüksek mukavemetli jeopolimer bağlayıcılar ve çimentolar geliştirmeye başlanmıştır. Birkaç ay sonra Lone Star ve Shell Oil'in anlaşmasından ayrılmasının ardından hidrolik çimentolu bir ürün olan

öğütülmüş yüksek fırın cürufunun poli (sialat) türü jeopolimere eklenmesinin, sertleşme süresini hızlandırdığı ve basınç - eğilme mukavemetini önemli ölçüde geliştirdiği keşfedilmiştir. İlk olarak Davidovits ve Sawyer'ın "Erken Yüksek Mukavemetli Mineral Polimer" başlıklı ABD patentinin 1984'te dosyalanmasının ardından, 1983 yılı Ağustos-Eylül döneminde yapılan araştırmalardan elde edilen ön bulgular sayesinde "Erken Yüksek Dayanımlı Beton Kompozit" başlığıyla 1985 yılında Avrupa Patenti yayımlanmıştır.

Normal Portland çimentosu (OPC), günümüzde kullanımda olan en yüksek hacimli mühendislik malzemeleridir ve iyi termal performansı, mekanik özellikleri, dayanıklılığı nedeniyle beton için bağlayıcı bir madde olarak kullanılmıştır. Bununla birlikte; üretimi sırasında harcanan yüksek enerji miktarı, karbondioksit (CO₂) emisyonları sebebiyle çevresel konularda bir tartışma yaratmaktadır.

Gelişmekte olan ülkelerde, sürdürülebilir kalkınma için itici unsurlar olan sera gazları ve küresel ısınma gözönüne alındığında jeopolimerik çimento ile geleneksel Portland çimentolarının sera gazı CO₂ emisyonlarını karşılaştırmak günümüz sanayisinde oldukça önemlidir. 1970'ten beri Davidovits, düşük CO₂ emisyonuna sahip çimentoların geliştirilmesinde büyük bir rol oynamıştır.

Jeopolimer bileşiği, portland çimentosundan 3,5 kat daha az enerji harcamasının yanı sıra, sera gazı olarak 5 kat daha az CO₂ yaymaktadır. 1 ton jeopolimerik çimento üretimi için hesaplanan CO₂ emisyonu; minerallerin kalsinasyonu, öğütme ve karıştırma enerjileri dahil olmak üzere (Çizelge 1.2.) 0,184 ton olarak bulunmuştur. Ayrıca Davidovits, uçucu kül bazlı jeopolimer teknolojilerini uygulayarak, çimento üretimi için CO₂ emisyonlarını % 80 oranında azaltarak kömür yakma geleceğinin güvence altına alınabileceği ve elektrik tesislerinin ileride aynı tesiste düşük enerji ve düşük CO₂ çimentosu üretebileceğini öngörmüştür (Davidovits, 2015).

Çizelge 1.2. Enerji ihtiyacı, MJ/ton

Türü	Kalsinasyon	Ezilme	Toplamda
Portland Çimentosu	3200	430	3430
Jeopolimerik Çimento	600	390	990

Çizelge 1.3. Bir ton çimento üretimi için salınan sera gazı emisyonu

Portland Çimentosu	1.00 ton CO ₂
Jeopolimerik Çimento	0.15 – 0.20 ton CO ₂

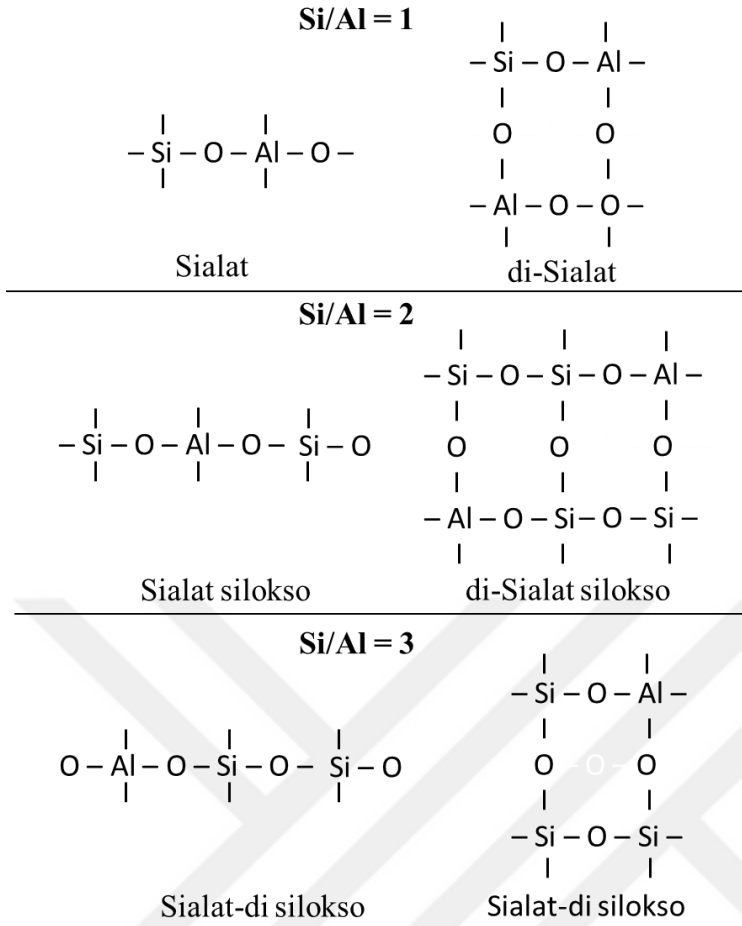
1.2. Jeopolimerizasyon

Alumino silikat bağlayıcılar, inorganik jeopolimerik bileşikler olarak adlandırılır, çünkü elde edilen jeopolimerik çimento, bir jeopolimerizasyon olarak adlandırılan bir inorganik polikondensasyon reaksiyonunun sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Jeopolimer yapısının organik kimya ürünü polimerlerden farkı karbon elementi yerine silisyum elementinin geçmesidir. Ana yapıda, silisyum tetrahedrallarıyla birlikte alüminyum tetrahedralları da yer almaktadır. Bu yüzden jeopolimer oluşumunda Si:Al oranlarının önemli olduğu düşünülmektedir. Siliko-alüminat bazlı jeopolimerlerin kimyasal olarak tanımlanması için "poli-sialat" teriminin kullanılmasını önerilmiştir (Davidovits, 1988b, 1991); Sialat, silikon-okso-alüminat için bir kısaltmadır ve polisialatlar aşağıdaki empirik formülle gösterilebilmektedir:



z değeri 1, 2 veya 3 olabilirken; M sodyum, potasyum gibi tek değerli katyonları; n ise polikondensasyon derecesini ifade etmektedir. Eğer z:2 ise poli(sialat silokso) kısaca PSS olarak adlandırılmaktadır.

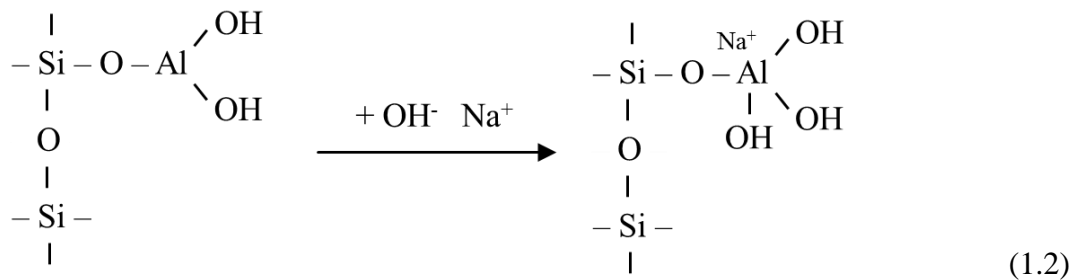
Silisyum atomları ve çevre atomların yerleri ^{29}Si MAS-NMR spektroskopisi ile belirlenmiş ve polimerizasyona elverişli ve oldukça kararlı bileşikler veren siloksan (O-Si-O) gruplarıyla yapılan çalışmalar sonucunda yapının 2-Silan (OSiH) yapısının kondensasyonu ile oluştuğunu kanıtlanmıştır (Kipping, 1927). IUPAC (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) Jeopolimer yapısındaki Si:Al oranına göre (Si: Al = 1:0) silokso; (Si: Al = 1:1) sialat; (Si: Al = 2:1) sialat-silokso; (Si: Al = 3:1) sialat-disilokso; (Si: Al>3) sialat zinciri olmak üzere Şekil 1.3. 'te gösterildiği gibi farklı isimlendirmeler yapmıştır.



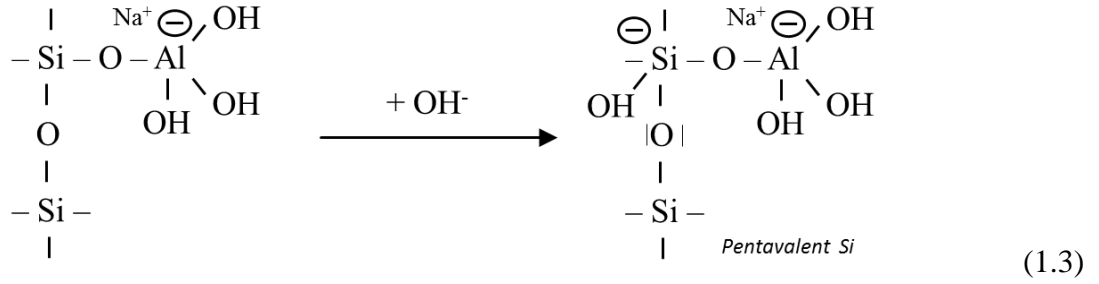
Şekil 1.3. Jeopolimer zincir yapıları (Davidovits J., 2011)

Metakaolen ve kaolin jeopolimerleri için kimyasal mekanizma, aynı adımları izler. Jeopolimerizasyondaki ön birim, polisilokso tabakasının alkalinasyonu ve depolimerizasyonu yoluyla elde edilen orto sialat(OH)₃-Si-O-Al-(OH)₃ molekülüdür.

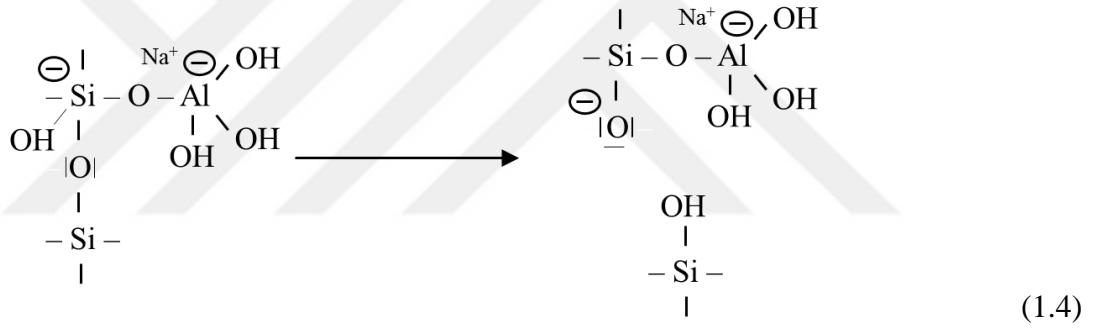
Al(V)-Al=O alumoksil kimyasal mekanizması Si / Al : 1 oranı için aşağıdaki gibidir. Kimyasal mekanizma KOH veya NaOH ile aşağıdaki şekilde yorumlanabilir. İlk adım yan grup sialat O₃-Si-O-Al-(OH)₃-Na⁺ içinde alkali ve tetralevent Al oluşumudur.



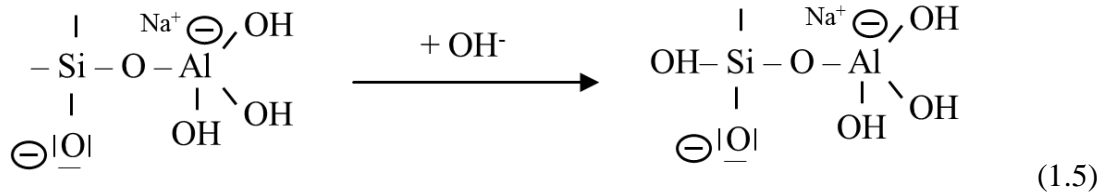
İkinci adım: alkali çözünme, bazın OH'in silikon atomuna bağlanmasıyla başlar, bu sayede valans küresini penta kovalent haline genişletebilir.



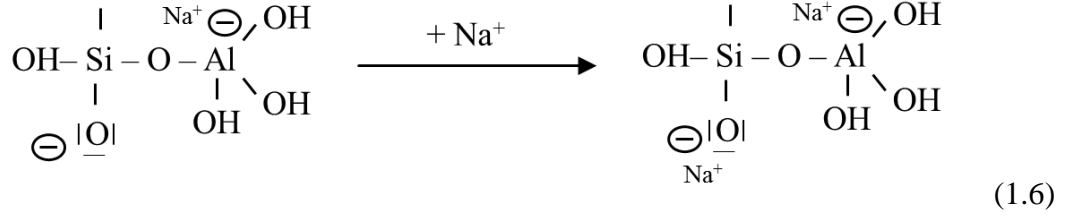
Üçüncü adım: reaksiyonun devamında elektronun Si'den O'ya aktarılması yoluyla siloksan oksijenin ayrılması, ara silanol Si-OH ile temel siloxo Si-OH- oluşumuyla açıklanabilir.



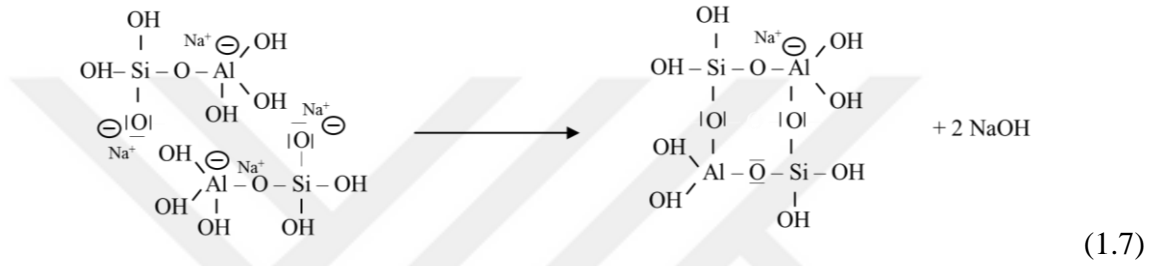
Dördüncü adım: silanol Si-OH gruplarının daha fazla oluşumu ve orto-sialat molekülünün izolasyonu ile jeopolimerisayson'daki birincil birim oluşur.



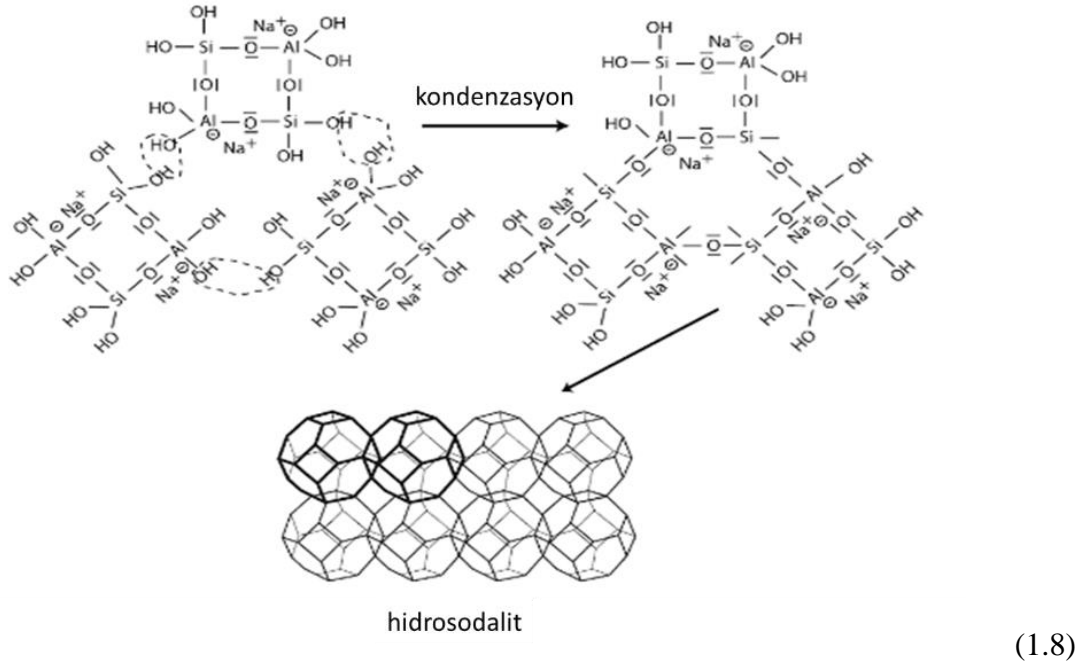
Beşinci adım: bazik siloxo Si-O- 'nin sodyum katyonu Na⁺ ile reaksiyonu ve Si-ONa terminal bağı oluşumu.



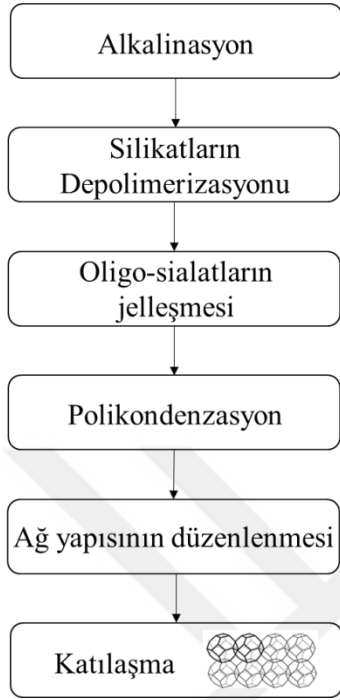
Altıncı adım: Si-ONa ile alüminyum hidroksil oh-al arasındaki kondenzasyon ve NaOH üretimi ile, siklodisilat yapısının oluşturulur, böylece alkali NaOH serbest bırakılır ve tekrar reaksiyona girer.



Yedinci adım: hidrosodalit ağına 3 siklo-disilatın polikondenzasyonu ile, karesel ve altıgen alt birimlere sahip Na-polisilat oluşumu



Jeopolimerizasyon mekanizması kısaca aşağıda Şekil 1.4.'teki prosesle de açıklanabilir (Davidovits, 2011).



Şekil 1.4. Jeopolimerizasyon mekanizması

1.3. Jeopolimer Malzemelerin Termal ve Mekanik Özellikleri

Pratik olarak jeopolimerlerin, çevre dostu yanmaz yapı malzemeleri, ses ısı yalıtkanları, tehlikeli atıkların kapsülmesi için malzemelerin ve hammaddeden üretimleri sırasında düşük enerji tüketimine sahip olması onlara olan ilgiyi artırmaktadır. Jeopolimerlerin, yüksek sıkıştırma mukavemeti, yüksek sıcaklık kararlılığı, düşük ısı iletkenlik ve yüksek termal mühendislik uygulamaları gibi mükemmel özelliklere sahip olduğu bilinmektedir. Isı iletkenliği, ısı işlem sonrası dayanım tutulması, yanmazlık ve sıcaklık kabiliyeti, jeopolimer malzemelerin yangın dayanımı göstergeleri olarak kullanılmaktadır. Jeopolimerler, 800 - 1200°C'ye kadar termal stabilitesiyle oldukça önemli bir yüksek ısı direncine sahiptir.

Termal genleşme, yapısal parçalar ısıtıldığında ve hareket etmesi engellendiğinde yıkıcı iç gerilmeler oluşturabilir. Yaygın olarak dilatometri, interferometri ve termomekanik analiz termal genleşme ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Metakaolin bazlı jeopolimerlerin termal direncini etkileyen faktörler, kullanılan alkali katyon ve Si/Al molar orandır. Dilatometri ile, Duxson ve ark. farklı alkali katyonları ve Si /Al molar oranlarıyla ısı işleme karşı çeşitli jeopolimer formülasyonlarını analiz etmiştir. Ayrıca mikro

gözeneklerde bulunan suyun 100 °C'ye kadar büzölmeye neden olmadan buharlaştığını ve viskoz bir akış nedeniyle önemli bir büzölme oluşumu 600 °C'nin üzerinde olduğunu gözlenmiştir (Duxson, 2007).

Basınç dayanımı, sertleşme süresi ve sertleşme sıcaklığına bağlıdır ve tüm betonlar için vazgeçilmez bir özelliktir. Jeopolimerlerin sertleşme süresi ve sıcaklığı optimum aralığa kadar arttığında, basınç dayanımları da artar. Ayrıca basınç dayanımı, jeopolimerlerin yapısında esas olarak bulunan metakaolen, kaolin ve cüruf gibi ham madde tozlarının inceliğine de bağlıdır ve basınç kuvveti tozun inceliği arttıkça artar.

Bunun yanında aktivatörlerin yapısı ve konsantrasyonu da jeopolimerleşme reaksiyonundaki baskın faktördür. Reaksiyon ürünlerine kolayca karışan ve harç özelliklerinin iyileştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunan çözünmüş ve kısmen polimerize edilmiş silikon içerdiği için sodyum silikat, alkali çözelti için oldukça uygundur. (Rickard,2010, Bakri, 2012)

Katyonun yapısı, viskoz akışın görüldüğü sıcaklığın ve toplam büzölmenin kontrolünü sağlar. Özellikle, potasyum katyonu, sodyum katyonuna kıyasla viskoz akışın daha sonra ortaya çıkmasına neden olur. Si / Al molar oranı da viskoz akıştan sorumludur; özellikle, Si / Al oranı ne kadar yüksekse, viskoz akış miktarındaki artış o kadar yüksektir. Ayrıca sodyum hidroksit ve sodyum silikat konsantrasyonundaki artış, harç akışını azaltmaktadır (Reddy, 2010; Chindaprasirt, 2007)

Termal iletkenlik, jeopolimerlerin termal engeller ve yapı yapısal elemanlarındaki potansiyel uygulamalar için uygunluğunu değerlendirmek için gereklidir. Örneğin jeopolimerin mikro yapısı, termal iletkenliği etkilemektedir, jeopolimerlerin gözenekliliği özellikle artırılmış ise termal iletkenlikte büyük ölçüde azalmaya yol açmaktadır.

Su, normal betonda olduğu gibi jeopolimer betonda önemli bir rol oynamaktadır ve jeopolimerlerin işlenebilirliği arttırmak için kullanılan su; jeopolimer matriksinden kürlenme ve ileri kurutma dönemlerinde atılarak, matriks içindeki nano gözenekleri arkasında bırakır ve bu da jeopolimerlerin termal yalıtım performansına fayda sağlar. (Bakri, 2012).

Jeopolimerlerin, yapılarında kalsiyum bulunmaması nedeniyle deniz suyuna dayanıklı olduğu bilinmektedir bunun yanında jeopolimerler asitlere de oldukça dayanıklıdır, çünkü Portland çimentosundan farklı olarak jeopolimer çimentoların yapısı kireçli değildir ve asidik çözeltilerle çözünmez (Zhang ve diğerleri 2010a; Zhang ve diğerleri 2010b).

Metakaolin ve uçucu kül bazlı jeopolimerlerin termal genişleme ölçümleri, sıcaklık arttıkça birkaç farklı bölge göstermektedir. Bu bölgelerin kapsamı sistemden sisteme değişir ve değişiklikler dehidrasyon, dehidroksilasyon, yoğunlaşma ve kristalleşme ile ilişkilendirilir. Kompozitlerin termal genişmesini azaltmak ve kullanılabilir sıcaklık aralığını genişletmek için dolgu malzemeleri, lifler ve agregalar jeopolimerlere eklenebilir. Kompozit sistemlerde matris ve lifler arasındaki yapışma oranları değişmektedir. Böylece, jeopolimerlerin mekanik özellikleri ve termal direnci matrise takviye eklenmesiyle geliştirilebilmektedir bunun için en iyi sonucu veren malzemeler, karbon ve bazalt lifler olarak bilinmektedir (Sabbatini ve diğerleri, 2017).

1.4. Lif Katkılı Jeopolimerler

Yapı malzemelerinin özelliklerini geliştirmek için liflerin kullanımı, sıvalarda kullanılan hayvan kılları ve tuğlalardaki saman örnekleriyle binlerce yıl öncesine dayanmaktadır. Genellikle düşük gerilme mukavemeti ve gerilme kapasitesi ile karakterize edilen çimentolu malzemeler, mikro çatlamlara karşı duyarlıdırlar ve bu zayıflıkların üstesinden gelmek için gerilme mukavemeti, süneklik, tokluk ve daha fazla dayanıklılık veren liflerin matrislerine dahil edilmesi OPC ve jeopolimerlerde oldukça yaygındır.

Yüksek dayanımlı betonlar yangına karşı normal betona kıyasla dayanıksızdır ve bu sebeple yüksek dayanımlı betonlara polipropilen lifler katılmaktadır. Katılacak lifler yaklaşık 80°C'de erimekte ve böylece yangın sırasında beton içerisindeki su buharının tahliye olabileceği kanallar oluşturulmaktadır. Bu sayede su buharının oluşturacağı patlamayı da engellemektedir.

Sıkıştırılmadaki dayanımının yanında malzemenin kırılma yapısı nedeniyle, gerilimdeki mukavemeti oldukça düşük olan betonun son tepe performansının iyileştirilmesi için ortak bir yaklaşım, içsel takviye olarak rastgele dağıtılmış kısa liflerin eklenmesi olarak düşünülmüştür ve liflerin, gerekli esneme performansını zamanında sağlamada etkili olduğu literatürde gösterilmiştir. Lifler, genişlikleri ve yayılma eğilimlerini azaltıp, elastik enerji emilimini (gerilme-yumuşatma) arttırarak malzemenin başarısızlığını kırıldıktan sonra, spektrumun daha sünek ucuna doğru kaydırmaktadır (Sabbatini ve diğerleri, 2017).

Lifler taze betondaki plastik çatlama azaltırken ve sertleşmiş betonun çatlak sünekliğini iyileştirebilmektedir. Jansson Doktora tezinde, liflerin etkisinin mikro düzey ve makro seviyesi olmak üzere iki düzeyde ayırt edilebileceğine inanmıştır (Jansson, 2008).

Mikro seviye, doğrusal elastik aşama aşıldıktan sonra kısa bir aşamayı kaplar, burada matraste başlangıç kusurlarından küçük çatlaklar oluşur. Yük arttıkça mikro çatlakların uzunluğu artar ve bunlar birleşerek makro çatlaklara dönüşür. Belirli bir lif içeriği için, mikro liflerin, fazlalığından, bu mikro çatlakları geçme olasılığı daha yüksektir.

Mikro liflerin etkili olabilmeleri ve mikro çatlakları durdurabilmeleri için matris içerisinde yüksek bir lif oranına ve sertliğe sahip olmalıdırlar. Malzemenin eğilme gibi yapısal özelliklerinde bir gelişme isteniyorsa, bu durumda, elyaflar, makro çatlaklar ve spesifik mekanik özellikler için yeterli uzunlukta seçilmelidir. Başlangıçta kısa olan mikro çatlakların, büyük makro çatlaklar oluşturmaması için katılan fiberler bu çatlakları köprüleyerek yükü transfer ederek çatlakların kaynaşmasını geciktirmektedir. Bu nedenle çatlak oluşumu ve gelişimi lif takviyesinin şekli, boyutu, tipi ve hacminden doğrudan etkilenmektedir.

Takviye için kullanılan lifler; polimer, metal veya seramik yapıları doğranmış lifler, öğütülmüş lifler, nano malzemeler, rijit çubuklar, dokuma paspaslar ve fitiller gibi çeşitli formlarda tedarik edilebilmektedir. Büzülme ve termal hareketler nedeniyle oluşan çatlamları kontrol etmek ve çatlama sonrası enerji emilimini arttırmak için kullanılan polimerik makro lifler 1990'larda tanıtılmıştır (CCANZ, 2009).

Makro lifler, 0,5 mm'den büyük çatlak genişliklerini tolere edilebildiğinde faydalı olmakta ve tipik olarak zemin destek uygulamaları için püskürtme beton ve sınıfta beton döşeme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır.

Mikro liflerse beton için özel olarak tasarlanmıştır ve temel işlevleri betonun sertleşmeden önceki plastik yerleşimi ve plastik büzülme çatlamasını azaltan plastik özelliklerini modifiye etmektir. Mikro liflerin sertleşmiş beton üzerindeki etkilerinin sınırlı olmasının yanında geçirgenliği azaltabilmektedir. Ayrıca darbelere, aşınmaya ve dağılmaya karşı direncini arttırırken birlikte donma-erime ve parçalanma direncini de arttırabilmektedir. Mikro lifler 5–30 mm karakteristik uzunluğa sahiptir ve poliamid, polyester, akrilik ve polivinil alkol, seramik, cam, bazalt olmak üzere en yaygın polipropilen olarak bulunmaktadır.

1960'lı yıllarda sağlık ve güvenlik nedenlerinden ötürü betonlarda takviye olarak kullanılan asbest liflerinin yerini alan polipropilen lifler yangından korunma başta olmak üzere çimentolu bağlayıcıların güçlendirilmesi için farklı şekillerde kullanılmaya başlanmıştır. Mikro lifler, beton dökümü sonrasında ilk birkaç saat içinde oluşabilecek mikro çatlakların genişlemesini önlemek için yeterli mukavemeti sağlarken, monofilament mikro lifler, yangın durumlarında, buharlaşma ve böylece su kaçışına izin veren kanallar

oluşturarak parçalanmaya karşı direncini arttırmaktadır ancak çatlama sonrası betonda kayda değer miktarda mukavemet sağlayamamaktadırlar.

Bunların dışında diğer birçok polimer lif oluşturabilmektedir; poliamidler, polyesterler, akrilikler, aramidler (Zhang et al. 2012) ve bir dizi doğal olarak oluşan selüloz esaslı (pamuk, kenevir, hindistancevizi) lif mevcuttur (Cement and Concrete Institute 2010).

Beton takviyeleri için halılardan geri dönüştürülmüş lifler de araştırılmış ve polipropilen liflerden daha yüksek mekanik özellikler sergileyen, geri dönüştürülmüş naylondan üretilmiş, şekillendirilmiş bir monofilamanı ticarileştirilmiştir. Doğal liflerin kullanımı ekonomik ve çevresel nedenlerden dolayı önemlidir. Özellikle bambu, sisal, jüt ve hindistan cevizi gibi yerel malzemeleri başarılarla kullanan bazı gelişmekte olan ülkelerde, uzun yıllar doğal liflerle takviye edilmiştir. Bu malzemeler sadece ucuz olmakla kalmaz, aynı zamanda düşük yoğunluklu, elverişli mekanik özellikleri onları cazip alternatifler yapar.

1.5 Jeopolimerlerin Kullanım Alanları

Jeopolimer malzemeler, otomobil ve havacılık, demir dışı dökümhaneler ve metalurji, inşaat mühendisliği ve plastik endüstrileri gibi endüstriler alanında geniş bir uygulama alanına sahiptir (Davidovits, 1988b). Jeopolimerik malzemelerin uygulama şekli, kimyasal yapı tarafından, polisialattaki Si: Al atomik oranı cinsinden belirlenmektedir. Davidovits (1999), uygulama tipini Çizelge 1.4.'te sunulan Si: Al oranına göre sınıflandırmıştır. Si: Al, 1, 2 veya 3'ün düşük bir oranı, çok sert olan bir 3D-Ağı başlatırken Si: Al oranı, 15'ten yüksek bir jeopolimerik malzemeye bir polimerik karakter sağlar. Tablodan görülebileceği gibi inşaat mühendisliği alanındaki birçok uygulama için düşük bir Si: Al oranı uygundur.

Çizelge 1.4. Jeopolimer Si: Al oranına göre uygulama alanları

Si: Al oranı	Uygulama alanları
1	Tuğla Seramik Yangın koruması
2	Düşük CO ₂ çimentoları ve betonları Radyoaktif ve zehirli atık kapsülleme
3	Yangından korunma fiber cam kompozit dökümhane ekipmanları Isıya dayanıklı kompozitler (200°C - 1000°C) Havacılık titanyum işlemi için takım
>3	Endüstri için sızdırmazlık ürünleri (200°C - 600°C) Havacılık SPF alüminyum için takım
20-35	Ateşe dayanıklı ve ısıya dayanıklı fiber kompozitler

Jeopolimer materyallerin potansiyel uygulama alanlarından biri de zehirli atık yönetimindedir, çünkü jeopolimerlerin zehirli kimyasal atıkları emebilme yetenekleri ile bilinen zeolitik malzemelere benzer davranırlar (Davidovits, 1988b; Comrie, 1988). Ayrıca, jeopolimer teknolojisinin toksik atık yönetiminde kullanılma potansiyelini araştırmış ve GEOPOLYMITE 50 kullanılarak yapılan testlere dayanarak, jeopolimerik malzemelerin atık muhafazada kullanılabileceğini önermektedir. GEOPOLYMITE 50, alkali sertleştiriciler ile çeşitli alumina-silikat ön yoğunlaşma maddelerinin karıştırılmasıyla hazırlanan bir tür jeopolimer bağlayıcı olan Cordi- Geopolymere SA'nın tescilli ticari markasıdır (Davidovits, 1988b).

Jeopolimerler aynı zamanda amorf inorganik yapıları sayesinde ısı yalıtımı gibi uygulamalarda kullanılabilmesini sağlayan iyi termal dirence sahiptir ve son yıllarda Avustralya'da; kanalizasyon boru hattı ürünleri, demiryolu traversleri, yangın ve kimyasal dirençli duvar panelleri, duvar üniteleri, koruyucu kaplamalar ve onarım malzemeleri, püskürtme beton ve yüksek performanslı elyaf takviyeli laminatlar dahil olmak üzere inşaat ürünleri geliştirmek için kullanılmaktadır. (Gourley, 2003; Gourley & Johnson, 2005).

Jeopolimerlerin, yapılarında kalsiyum bulunmaması nedeniyle deniz suyuna OPC betona göre daha dayanıklı olduğu bulunmuştur ve Hangzhou Bay (Shanghai) 'daki beton

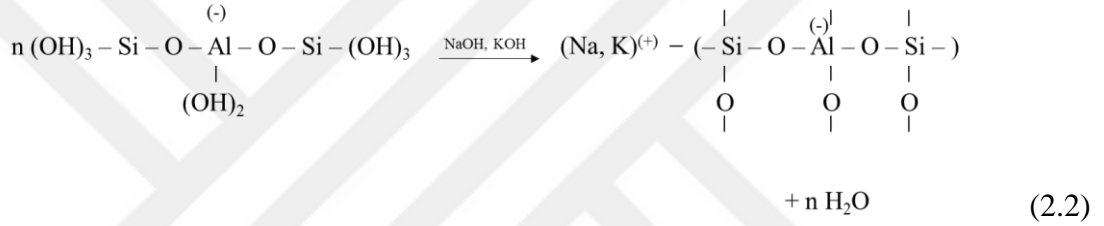
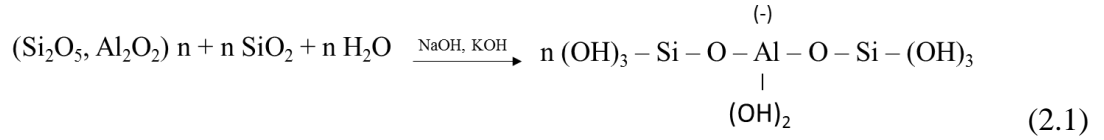
yüzeyley üzerinde deniz betonu için korozyon önleyici kaplama olarak kullanılmıştır (Zhang ve diğerleri 2010a; Zhang ve diğerleri 2010b).



BÖLÜM 2

ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Jeopolimerizasyon, alümino-silikat oksitler (Si_2O_5 , Al_2O_2) ve polimerik Si-O-Al bağları ile sonuçlanan alkali polisilikatlar arasındaki kimyasal reaksiyonunu içerdiği; alkali çözeltinin polikondenzasyon reaksiyonunun örneği aşağıdaki denklemde gösterilmektedir (Davidovits, 1991, Jaarsveld & Deventer, 1996, Wallah & Rangan, 2006).



Rangan'a göre (2008), yukarıda verilen 2. reaksiyon, bir jeopolimer karışımındaki suyun kimyasal reaksiyonda hiçbir rol oynamadığını; sadece işlem sırasında karışımın işlenebilirliğine katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda; sertleşme ve ileri kurutma dönemlerinde jeopolimer matristen dışarı atılan suyun, hidrasyon işlemi sırasında OPC bazlı bir beton karışımındaki suyun kimyasal reaksiyonunun tersi olduğu görülmüştür.

Wallah ve Rangan (2006) düşük kalsiyum içeren uçucu kül bazlı jeopolimer betonun uzun süreli özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda ısıyla sertleşmiş uçucu kül bazlı jeopolimer betonun basınç mukavemetinde jeopolimerleşmeden sonra zamanla önemli bir artış olmamıştır ancak laboratuvar ortam sıcaklığında sertleşmiş kül bazlı jeopolimer betonun zamanla basınç mukavemetinde artış görülmüştür. Laboratuvar ortamında sertleşmiş numunelerin 7. Güne ait basınç mukavemetlerinin, dökümden sonraki ilk hafta boyunca bulunduğu ortalama ortam sıcaklığına bağlı olduğu ve daha yüksek ortam sıcaklıklarının daha yüksek basınç mukavemeti verdiği bulunmuştur. Test sonuçlarında, ısıyla sertleşen uçucu kül bazlı jeopolimer betonun sülfat atağına karşı mükemmel bir dirence sahip olduğu gösterilmiştir. Sodyum sülfat çözeltisine maruz kaldıktan sonra test numunelerinin yüzeyinde bir yıla kadar herhangi bir hasar olmamıştır

ve bu numunelerin bir yıla kadar çeşitli maruz kalma sürelerinden sonra basınç dayanımlarında da önemli bir değişiklik olmadığı bulunmuştur. Ayrıca ısı ile sertleşen düşük kalsiyumlu uçucu kül bazlı jeopolimer betonun ana polimerizasyon ürünlerinden alçı veya etringit oluşturmak için bir mekanizmanın olmadığı belirtilmiştir.

Yeşil bir beton çeşidi olan jeopolimerin, yanmaz yapı malzemeleri ve çevresel malzemeler gibi birçok potansiyel uygulamasının olacağı öngörülmüş ve son yıllarda yapılan araştırmalarda jeopolimerlerin termal ve ateşe dayanıklı malzemeler olarak kullanılması için pek çok çaba gösterilmiştir.

Qi ve ark. (2009) matris olarak jeopolimer, dolgu olarak TiO_2 ve ateşe dayanıklı ajan olarak $Al(OH)_3$ kullanılarak kalın (8 mm, geleneksel polimer kaplamadan daha kalın) yangına dayanıklı kaplama geliştirmiştir.

Ashadi ve ark. (2010); jeopolimer betonunun deniz suyuna dayanıklılığını araştırmışlardır. Jeopolimerlerin, yapılarında kalsiyum bulunmaması nedeniyle kimyasal saldırıya dirençli olacağı düşünülmüştür. Mekanik mukavemeti 40 MPa olan jeopolimer beton, kaba agregalar, kumlardan elde edilmiştir. İki tür çimento, uçucu kül ve dehidroksile kaolinden (metakaolin), aktivatör olarak sodyum silikat çözeltisi kullanılarak sentezlenir. Hem jeopolimer hem de normal Portland çimentosu (OPC) betonlarının (ASTM C39) $15 \times 15 \times 15$ cm³'lük sıkıştırma testi parçaları dökülmüş ve sertleştirilmiştir. Kütleme, 1 gün boyunca oda sıcaklığında yapılırken, Portland çimentosu betonları, tam hidrasyon sağlamak için 28 gün suya batırılmıştır. Sertleştikten sonra, numuneler 7, 28, 56 ve 90 gün boyunca ASTM deniz suyuna (ASTM D1141-90) daldırılarak bu işlemden sonra basınç dayanımları ölçülmüştür ve jeopolimer betonların genel olarak OPC betona göre deniz suyu daldırma işlemine daha dayanıklı olduğu bulunmuştur. Deniz suyu maruziyetine karşı direnç, Ca bileşiklerinin varlığına bağlı olabilir. Ca'nın bulunmadığı dehidroksile kaolin jeopolimerlerinde, mekanik mukavemet, deniz suyu daldırma işleminden etkilenmemiştir. Bu deneyde % 5 kalsiyum oksit içeren uçucu küllerden sentezlenen jeopolimerler 56 günde kuvvetli bir düşüş göstermiş, ancak daha sonra azalmamıştır. Öte yandan, kalsiyum içermeyen kaolin jeopolimerleri, mukavemetinde azalma eğilimi göstermemiştir. Denemede ayrıca, uçucu kül jeopolimerinin oda sıcaklığında kürlenmesinin yavaş olduğu, ancak kuru koşullar altında da deniz suyuna daldırılrsa da 28 gün boyunca devam ettiği bulunmuştur.

Zhang ve ark. (2010a, 2010b); deniz betonu için korozyon önleyici kaplama olarak jeopolimerin potansiyel uygulamasını araştırırken bağlanma mukavemeti, konsantre deniz suyundaki dayanıklılık, çevre koşulları altında geçirgenlik ve hacim stabilitesi üzerinde

çalışmış ve Hangzhou Bay (Shanghai) 'daki beton yüzeyler üzerinde gerçekleştirmiş jeopolimer kaplama tabakasının sertleşme davranışını incelemiştir. Karşılaşılan en büyük sorun dış ortam koşullarında gerçekleşen büyük büzülme olmuştur. Bu problemi çözmek için, Zhang ve ark. polipropilen fiberleri ve az miktarda magnezyum bazlı genleşme ajanı kullanmış ve büzülme kabul edilebilir bir seviyeye düşürmüştür.

Wu ve Fang (2011), karbon fiber takviyesiyle geliştirilen metakaolin bazlı jeopolimer betonun yapısını güçlendirdiğini bildirmiş ve optimum karışımın 800 ° C'de 3 saat ısıtılmış metakaolinin 1.0 modüllü bir cam suyu ve % 35-40'lık Na₂O ve SiO₂ konsantrasyonunun karıştırılmasıyla elde edilen bağlayıcının 158 mm'lik bir akışkanlığa, 15 °C'de 2 saatte sertleşmeye ve 28 günde 51.2 MPa basınç dayanımına sahip olduğu bulunmuştur.

Zhang ve ark. (2012) saha uygulamalarından elde edilen sistematik deneyler, jeopolimer kaplamanın uygun ayar süresine, yüksek yapışma gücüne ve mükemmel korozyon özelliklerine sahip olduğunu göstermiştir. Jeopolimer kaplamaların 4 saat içinde sertleşip betonla kuvvetle bağlandığı ve dalgaya direnebildiği gözlenmiştir. X-ışını kırınımına (XRD) bakılan örneklerdeyse 6 ay içinde kaplamalarda sülfat bulunmamış ancak bir kalsit modifikasyonu görülmüştür. Uygulama sırasında ortaya çıkan bir sorun olan jeopolimer hamurunun büyük büzülmesini engellemek için eklenen MgO bazlı genleşme ajanı ve polipropilen (PP) fiberlere rağmen 7 gün sonra yüzeylerdeki mikro çatlaklar gözlenmiştir. Atmosferin nem oranının ve kaplama tabakasının kalınlığının kaplamaların bütünlüğünü etkileyen iki önemli faktör olduğu; jeopolimerlerin deniz koşulları altındaki kimyasal stabilitesinin, beton gibi yapılara sürdürülebilir bir koruma sağladığı rapor edilmiştir. Sertleşme sırasındaki büyük büzülmenin, MgO bazlı genleşme ajanı ve PP fiberlerin eklenmesiyle azaltılabileceği düşünülse de doğal deniz koşullarında tatmin edici olmadığına ulaşılmıştır. Ayrıca periyodik olarak deniz suyuyla temasın olduğu, gelgit bölgesinde 5 mm kalınlığında kaplamanın en iyi bütünlüğü sergilediği belirtilmiştir.

Zhu ve ark. (2013), H₂O / Al₂O₃ oranının jeopolimerin termal kararlılığına etkisini rapor etmiştir. En uygun H₂O / Al₂O₃ oranı 13 olarak bulunan jeopolimer yapılarının 600 ° C ısıtmaya maruz kaldığında stabil kaldığı ve 800 °C'de lineer büzülme % 9'a ulaşırken kristalin nefelin oluştuğu da gözlemlenmiştir.

Li ve ark. (2013), metakaolin bazlı jeopolimerin büzülmesinde liflerin tipi, dozu ve şekli hakkında sistematik bir araştırma rapor etmiştir. Çekme - büzülme oranlarının karşılaştırılması: Cam elyafı ve mineral elyafı > karbon elyafı > cam elyafı > mineral

elyafı > cam elyafı-polivinil asetat elyafı karışımı > mineral elyafı-polivinil asetat elyafı karışımı olarak bulunmuştur. Normal polimer liflerin nispeten düşük modülleri nedeniyle büzülme kontrolünde çok etkili bulunmadığı ve buna ek olarak, kum veya diğer dolgu maddeleri kullanıldığında, büzülmenin önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Dolayısıyla, uygun lif, dolgu ve genleşme maddesi kombinasyonunun bu problemi çözebileceğine inanılmaktadır.

He ve ark. (2013) bir dizi metakaolen bazlı jeopolimer kompozit ve seramiği başarılı bir şekilde geliştirmiştir. Kısa karbon fiber takviyeli jeopolimer kompozitler, 7 mm uzunluğunda karbon fiber kullanılarak güçlendirilmiş jeopolimerlerin eğilme dayanımı 5 kat artırılarak başarısızlığın önüne geçilmiştir. Ayrıca, karbon fiberle güçlendirilmiş jeopolimer kompozitleri güçlendirmek için bir dolgu maddesi olarak α -Al₂O₃ tozunun eklenmesini de rapor etmişler ve bu tür karbon fiberle güçlendirilmiş jeopolimer kompozitlerden seramiğe geçişi raporlamışlardır. Jeopolimerden elde edilen lösit seramiklerin bütünlüğü önemli bir özelliktir. En uygun ısıtma koşullarında, örneğin 2 °C /dakika ile oda sıcaklığından 600 °C'ye ve ardından 5 °C/dk ile 600 °C'den 1000 °C'ye kadar, çatlak içermeyen seramik levha ve mermi numuneleri üretilebilmekte olduğu bulunmuştur.

Wu ve ark. (2014), ISO834 standardına göre kompozit levhaların yangın dayanımlarını ve kompozit levhaların yangın dayanımı üzerine yıkılan beton blokların, yük oranının ve yanmaz kaplamanın kalınlığının etkilerini test etmiş ve beton bloklarda bir jeopolimer kaplamanın (10 mm kalınlığa kadar) yanmaz özelliklerini rapor etmiştir.

Yangına dayanıklı kaplama, özellikle jeopolimer bağlayıcı sodyum silikat bazlı aktivatör kullanıldığında, mükemmel ısı yalıtımı özelliği sergilediği ve kompozit levhanın, 10 mm kalınlığında yanmaz bir kaplama ile ateş dayanıklılığı, istenen standart süreden (1.5 saat) çok daha uzun olduğu bulunmuştur.

Seçkin (2017), yaptığı çalışmalarda boraksın metakaolin ve C tipi uçucu kül içeren jeopolimerlerin yapısal özelliklerine olan etkisini araştırmıştır. Bu sebeple B/Si molar oranı 0-1 arasında değişen boraks-metakaolin ve boraks-uçucu kül bazlı jeopolimerler için Fourier Dönüşümü Kızıl Ötesi Spektroskopisi (FT-IR), X-Işını Kırınımı (XRD), Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM) ve Termogravimetrik Analiz (TGA) gibi çeşitli yapısal karakterizasyon tekniklerini kullanmıştır. Ayrıca karışıma Boraks eklenmesinin jeopolimer örnekler üzerindeki mekanik etkisini ölçmek için basınç dayanımı testleri de yapmıştır. Tezin ilk bölümünde boraks-metakaolin bazlı jeopolimerler incelenmiş ve Boraks-metakaolin bazlı jeopolimer sisteminlerinin kuartz ve bor içeren kristal bileşenleri ile

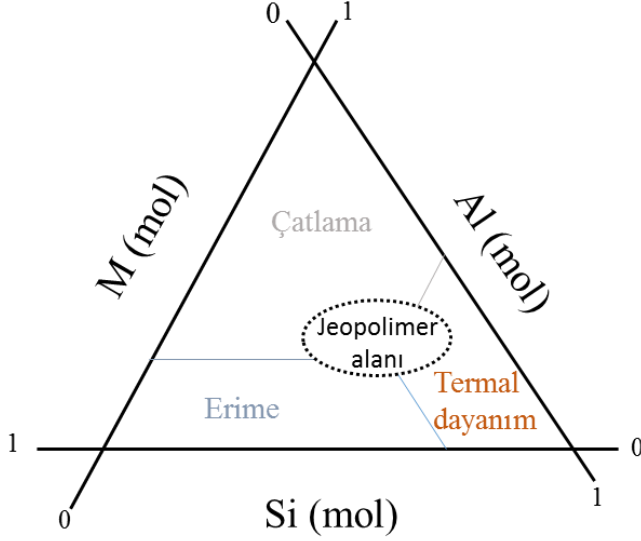
birlikte amorf bir yapıya sahip olduğunu gözlemlemiştir. FTIR bandlarının yoğunluğu, B /Si oranına bağlı olarak sistematik bir şekilde artmakta olan Boraks-metakaolin bazlı jeopolimer örneklerinin SEM ölçümlerinde kristal yapıların varlığını gösteren iğne ve yıldız benzeri yapılar gözlenmesi de bu durumu desteklemektedir. B/Si oranı 1 olan boraks-metakaolin bazlı jeopolimerin 620 cm^{-1} 'de sahip olduğu bant poliborosilikat köprüsü parmak izi olarak kabul edilmiştir. Bu bant bor atomlarının silika ağı içine katıldığını kanıtlamaktadır.

Tezin ikinci bölümünde ise Seçkin farklı B/Si oranlarına sahip boraks-metakaolin ve boraks-uçucu kül esaslı jeopolimerlerin yapısal özelliklerini karşılaştırmıştır. Boraks-metakaolin ve boraks-uçucu kül bazlı jeopolimerlerin FTIR sonuçlarında 685 cm^{-1} 'de ve 875 cm^{-1} 'de görülen bantlarda Borosilikat köprüsü görülmektedir. Metakaolin bazlı jeopolimerde 0.56 MPa ile en yüksek basınç dayanımı bor içeriği olmayan jeopolimerlere aitken boraks-uçucu kül jeopolimerleri için artan bor (B / Si) oranı ile basınç mukavemeti değerlerinin sistematik olarak arttığı yapılan mekanik testlerde gözlemlenmiştir.

Sabatini ve ark (2017), bu çalışmada alkali çözeltiler, metakaolin, lif ve kum takviyelerin karıştırılmasıyla hazırlanan çeşitli jeopolimerlerin termal direnci üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Hazırlanan farklı jeopolimer örnekler dilatometrik analiz ve yüksek sıcaklıkta ($800 \text{ }^\circ\text{C}$) termal direnç ile test edilmiştir. Ayrıca jeopolimerizasyonu doğrulamak için yapısal ve mikroyapısal analiz yapıp ve formülasyona bağlı olarak suyun yapısını değerlendirmek için diferansiyel termogravimetrik analizi de yapmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalarda alkali katyonun (Na veya K) molar konsantrasyonu ($[M] 16 \text{ mol / L}$) ve silikonun molar konsantrasyonu (Si) jeopolimer özelliklerini etkileyen kritik parametreler olarak tanımlanmıştır. Reaktivite ve saflık açısından farklılık gösteren dört metakaolin (M1(en aktif), M2, M4 ve M5) kullanılmıştır. Ayrıca, farklı morfolojilere sahip üç farklı takviye (cam elyaf, kum ve zirkon kumu) da karışımlara farklı reçete oranlarında eklenmiştir. Test numunelerini düzgün şekillerde elde etmek ve sıkışmış havayı çıkarmak için jeopolimer harç $45 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve titreşim altında farklı kalıplara dökülmüştür. Dökümü kolaylaştırmak için iki bölümden oluşan kalıplar kullanılmıştır. Elde edilen numuneler, çatlamayı önlemek için $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de ve % 85 nem içeren ortamda 24 saat kürlenmiştir.

Şekil 2.1.'de verilen üçlü şemada farklı metal, alüminyum ve silikon konsantrasyonlarının işlevsel olarak ayarlanmıştır. Bu şema, jeopolimer malzemelerin termal direncini kontrol etmek için bir yol haritası olarak düşünülebilmektedir.



Şekil 2.1. Jeopolimer mazlemelerin termal direncinin üçlü şemada gösterimi

Isıl işlemlemeden sonra, kimyasal bileşime bağılı olarak farklı mekanik özellikleri olan jeopolimerlerde erime, çatlama veya iyi termal direnç gibi üç farklı davranış belirlenmiştir. 0,65'ten daha düşük bir M / Al oranı için yüksek sıcaklıkta iyi termal direnç ve düşük büzülme değerleri elde edilmiştir. Ayrıca alkali katyonunun yapısına ve miktarına bağılı olarak da jeopolimer örneklerin oda sıcaklığında düşük büzülme değerleri sergilediği bulunmuştur.

Tamburini ve ark (2017), metakaolin, cüruf, sodyum-silikat içeren jeopolimer harcına; bazalt, cam, karbon fiberlerden oluşan ultra yüksek gerilim mukavemetli çelik kumaşlar gömerek ve yapıştırarak; yumuşak çamur ve kuvvetli ekstrüde edilmiş kil tuğlalar için güçlendirilmiş bir matris elde etmişlerdir. Yapılan çalışmalarda jeopolimerin ayrıntılı kimyasal/fiziksel karakterizasyonu, jeopolimerizasyon reaksiyonunun tamamlandığını açıklarken, jeopolimerin yüksek sıcaklık muamelelerine ve onun uygun mekanik özelliklerine olan iyi stabilitesinin kanıtlandığı belirtilmiştir. XRD, TG-DTA ve MAS-NMR ile yapılan kimyasal karakterizasyonlar, jeopolimerizasyon reaksiyonunun esas olarak bir amorf alüminosilikat jeopolimer ağının oluşumuna ve sadece az miktarda kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) fazına yol açtığını göstermiştir. Ayrıca 600 °C'ye kadar düşük kuruma büzülmesi ve düşük termal büzülmeye sahip olan numunelerin tam bir jeopolimerizasyon reaksiyonunu doğruladığı düşünülmektedir. Test sonuçlarına göre harç basınç dayanımı zamanla logaritmik olarak artmış, 1 yıl sonra 45 MPa'ya ulaşmıştır. Bununla birlikte 50 adet donma-çözülme döngüsünden ve 1000 °C'ye kadar ısı işlemlerinden ihmal edilebilir düzeyde etkilenmiştir. Karbon, bazalt, alkali-dayanıklı cam

ve çelik olmak üzere dört tip lif takviyesi kullanılarak hazırlanan lif katkılı jeopolimerlerin yumuşak çamurlu kil tuğlalarla mükemmel yapışma mukavemeti olduğu bulunmuştur.

Wan ve ark (2017), metakaolin bazlı jeopolimerlerin Silisyum oranlarını değiştirmek için silika dumanı kullanarak Si / Al oranları 1, 1.5, 2, 3, 4 ve 5 olacak şekilde yeni jeopolimerler sentezlemiştir. Bu jeopolimerlerin mikroyapıları XRD, SEM, NMR ve kuvvetleri basınç dayanımı ölçümleri ile karakterize edilmiştir. Bir Si atomunun bağlanma enerjisini ve çeşitli Si/Al oranlarından oluşan jeopolimerlerin toplam enerjisini hesaplamak için modelleme ve simülasyon kullanılmıştır. Jeopolimerizasyonda Al ve Si türlerinin oranları ölçülmüş ve dondurularak kurutulmuş N-A-S-H jeli FTIR spektrumları ile karakterize edilmiştir.

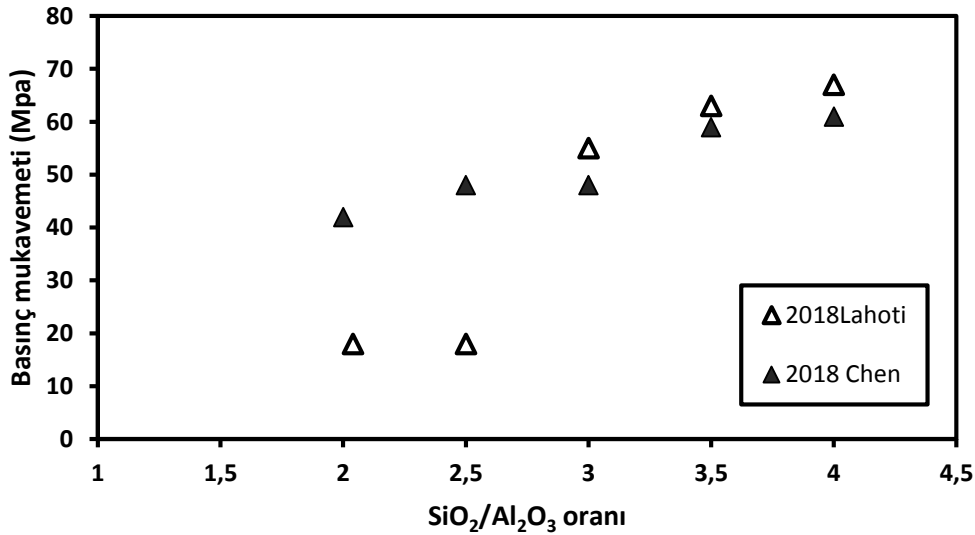
Yapılan çalışmaların sonunda çözünebilir silikatların, 2'den daha az Si / Al oranlarında metakaolinin çözünmesini arttırdığı ve alkali aktivatör olarak silikat kullanıldığında N-AS-H jellerinin oluşumunda Al'in çözünmesi belirleyici olduğu görülmüştür. Yüksek Kristalin zeolitik çekirdekleri içeriğinin (Q4 (4Al)) Si / Al : 1 oranında olduğu ve silikat türevleri içeriğinin ise Si / Al oranlarında 3'ten yüksek olduğunda olduğu yapılan karakterizasyonlarla belirlenmiştir. Bunun dışında jeopolimerlerin mekanik mukavemetinin, zeolitik çekirdeklerin veya silikat türevlerinin oluşumundan ziyade N-A-S-H jelin oluşumuna bağlı olduğu bulunmuştur.

Noushini ve ark (2018), sentetik lif takviyeli jeopolimer betonun yapısal özelliklerini analiz etmek için yaptıkları bu kapsamlı çalışmada, monofilament ve fibrilize yapıları polipropilen liflerin ve monofilament yapıları poliolefin liflerin uçucu kül bazlı jeopolimer betonun mekanik ve eğilme performansına olan etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda hacimce % 0,5'lik beş farklı sentetik lif ilave edilen jeopolimer beton örneklerin basınç dayanımı, dolaylı gerilme mukavemeti, elastisite modülü, kopma modülü, bükülme sertliği ve kırılma enerjisi belirlenmiştir. Lif takviyeli jeopolimer betonun geleneksel Portland çimento esaslı sistemlere göre performansını değerlendirmek için karşılaştırmalı analizler yapılmıştır.

Polipropilen lif içeren jeopolimerlerin basınç mukavemetinde, düz jeopolimerlere oranla % 1-% 7'lik bir azalma sergilemiştir. Poliolefin lif takviyeli jeopolimerlerde ise % 10-% 15'lik bir azalma gözlenmiştir. Takviye liflerinin düşük elastisite modülü ve liflerin etrafındaki küçük hava ceplerinin betona sokulması, gözlemlenen mukavemet azalmasının ana nedenleri olabileceği düşünülmüştür. Basınç mukavemetindeki düşüşe rağmen, 19 mm ve 51 mm'lik polipropilen lif katılan jeopolimerlerde eğilme mukavemetinde 1,5 ve 2,5 kat

artış gözlemlenirken 48 mm ve 55 mm poliolefin lif içeren jeopolimerlerde 5,6 ve 6,3 kat iyileşme gözlenmiştir.

Lahoti ve ark (2018), çalışmalarında Si / Al mol oranındaki değişimin metakaolin jeopolimerlerin mezo ve makro ölçekli termal stabilitesi üzerindeki etkisini kapsamlı bir şekilde araştırmıştır. Şekil 2.2.'de farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol oranlarındaki jeopolimerlerin mukavemeti incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda tüm jeopolimer numunelerin 300 °C'ye maruz kaldıktan sonra basınç dayanımlarında düşüş yaşandığı görülmüştür. XRD ve FTIR sonuçlarından görüldüğü gibi mikro ölçekte iyi kimyasal stabilite sergilemelerine rağmen, gösterdikleri çok yüksek termal büzülme mezo ölçekte düşük stabiliteye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca tüm jeopolimer numunelerin, 900 °C'ye kadar yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında basınç dayanımlarında düşüş yaşadığı ancak yapısal bütünlüklerini korudukları gözlemlenmiştir. Jeopolimer numunelerin içeriğindeki nefelinin yüksek sıcaklıkta yeniden kristalleşmesinin, jeopolimer matrisinin genişlemesine ve çatlamasına sebep olarak mukavemeti olumsuz etkilediği de düşünülmüştür. Si / Al oranı 1,75 olan jeopolimer numune ise, 900 °C'ye maruz kaldıktan sonra mukavemetini (6 MPa) korumuştur.



Şekil 2.2. Değişen $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranının jeopolimerin mukavemetine etkisi

Chen ve ark (2018), bu çalışmada Sodyum Poliakrilatın farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranına sahip metakaolin bazlı jeopolimerler üzerindeki mekanik ve mikro yapısal etkilerini incelemiştir. Jeopolimerlerin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ mol oranları silis dumanı ve $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ eklenerek 2,0 - 2,5 - 3,0 - 3,5 - 4,0'e ayarlanırken $\text{Na}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ ve $\text{H}_2\text{O} / \text{SiO}_2$ mol oranları sırasıyla

0,2 - 4,0'te muhafaza edilmiştir. Jeopolimerlerin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranları ağırlıkça yüzde 0 - 0,4 - 0,8 - 1,2 ve 1,6 sodyum poliakrilat (PAAS) ilavesi ile ayarlanmıştır. Numuneler ayrıca ^{29}Si NMR, XPS ve FTIR ile incelenmiştir. Yapılan deney sonuçları polimerin jeopolimerlerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisinin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranından etkilendiğini ve $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2 ile 4 arasındayken Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi etkinin daha az belirgin olduğu gözlemlenmiştir.

PAAS'ın yapıya katılması, jeopolimerdeki $[\text{SiO}]^4$ veya $[\text{AlO}]^4$ 'ün polimerizasyon derecesini azaltıp jeopolimerin sertliğini arttırdığı düşünülen Si-O-C bağı oluşturmaktadır. Ayrıca düşük $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranına sahip olan jeopolimer karışıma organik polimer ilave edildiğinde jeopolimer yapı önemli ölçüde sertleştiği belirtilmiştir.

Bu tez çalışmasında literatürden farklı olarak jeopolimer reçetelerindeki optimum $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı hesaplanıp seçilerek jeopolimer malzemeye takviye edilen liflerin yüzdesi ve boyundaki değişimin mukavemet sonuçları ELE mukavemet makinası kullanılarak hesaplanmıştır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler

Metakaolen: Deneysel çalışmalarda kullanılan metakaolen Mefisto L05 , Ceske Lupkove Zavody A.S. (CLUZ) firmasından elde edilmiştir.

Sodyum Silikat (Cam Suyu): Deneysel çalışmalarda kullanılan sodyum silikat Sodel Kimya'dan temin edilmiştir. Ürün silis kaynağının sodyum hidroksit ile ısı ve basınç altında reaksiyona sokulması ile elde edilir. Elde edilen sıvı ürün filtre edilir. Çalışmalarda modül 2 (46/48 Bé) alkali cam suyu kullanılmıştır. Silikat için MODÜL : % SiO₂ / Na₂O oranıdır.

Çizelge 3.1. Deneyde kullanılan sodyum silikatın analizi

Analiz Adı	Spekt Değeri
Görünüş	Renksiz Sıvı
Yoğunluk, g /cm ³ (20 C)	1,4680 - 1,4950
Baume, Bé (20 C)	46,0 - 48,0
% Na ₂ O	15,0 - 17,0
% SiO ₂	26,5 - 29,0
Modül	1,7 - 1,9
Katı Madde Miktarı	41,5 - 43,5

Sodyum Hidroksit: Jeopolimerizasyondaki alkali kaynağı olarak kullanılan sodyum hidroksit ISOLAB'dan temin edilmiştir.

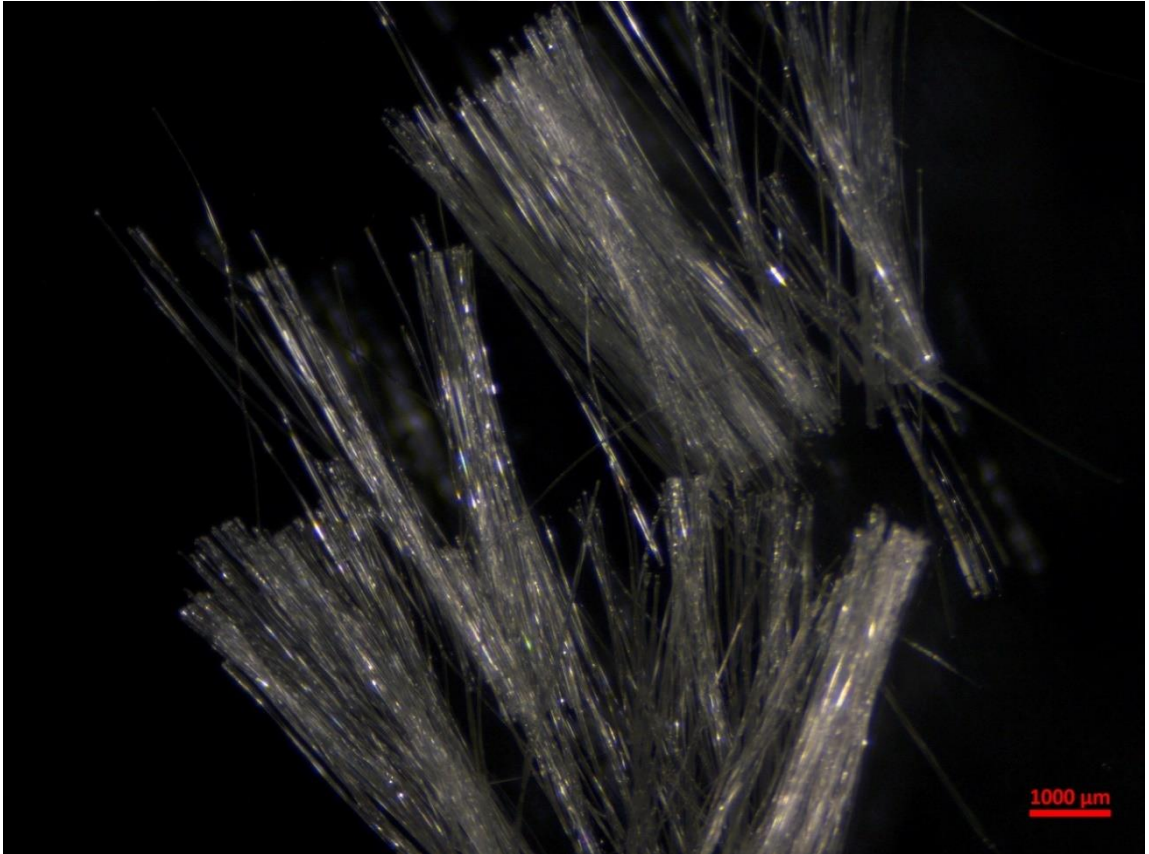
Potasyum Hidroksit: Jeopolimerizasyondaki alkali kaynağı olarak kullanılan potasyum hidroksit ISOLAB'dan temin edilmiştir.

Lifler: Bu çalışmada, Çizelge 3.1.'de ayrıntıları verilen dört tip lif kullanılmıştır. Tüm lifler, yüksek aşındırıcı ortamlara uygun olan yüksek alkali ve asit direncine sahiptir. Bu aynı zamanda, jeopolimer beton üretiminde kullanılan alkali çözeltiye karşı dayanıklı oldukları anlamına da gelir. Ek olarak, kullanılan liflerin erime noktaları Çizelge 3.1.'de gösterildiği gibi 160 ° C'nin üzerinde oluşu, jeopolimerleşme sırasında ortaya çıkan ısıya ve yangın hasarına karşı jeopolimer betonu dirençli hale getirmektedir.

Çizelge 3.2. Deneyde kullanılan liflerin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Liflerin Özellikleri	BF-06	BF-12	Fibermesh	Macromesh
Uzunluk	6 mm	12 mm	54 mm	54 mm
Çap	0.031 mm	0.031 mm		
Polimer Tipi	Polyolefin	Polyolefin	Polyolefin	Polyolefin
Şekil	Monofilament	Monofilament	Monofilament	
Yoğunluk	0.9 kg/m ³	0.9 kg/m ³	0.91 kg/m ³	0,91 g/cm ³
Çekme Mukavemeti	450-700 Mpa	450-700 Mpa	613 Mpa	550-750 MPa
Erime Noktası	162 °C	162 °C	164 °C	160-170 °C
Yanma Sıcaklığı	593 °C	593 °C	550 °C	350 °C
Asit Reaksiyonu	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl	Dayanıkl

ASTM CIII6 CE standartına sahip olan BF-06 ve BF-12 Polipropilen Lifleri Atlas Beton Fiber Makro & Mikro Donatılar'dan temin edilmiştir. Asit, tuz, alkali ve uv etkisine karşı dayanıklıdır. BF06 özellikle sıvalarda kullanılırken BF12 şap betonlarında kullanılmaktadır.

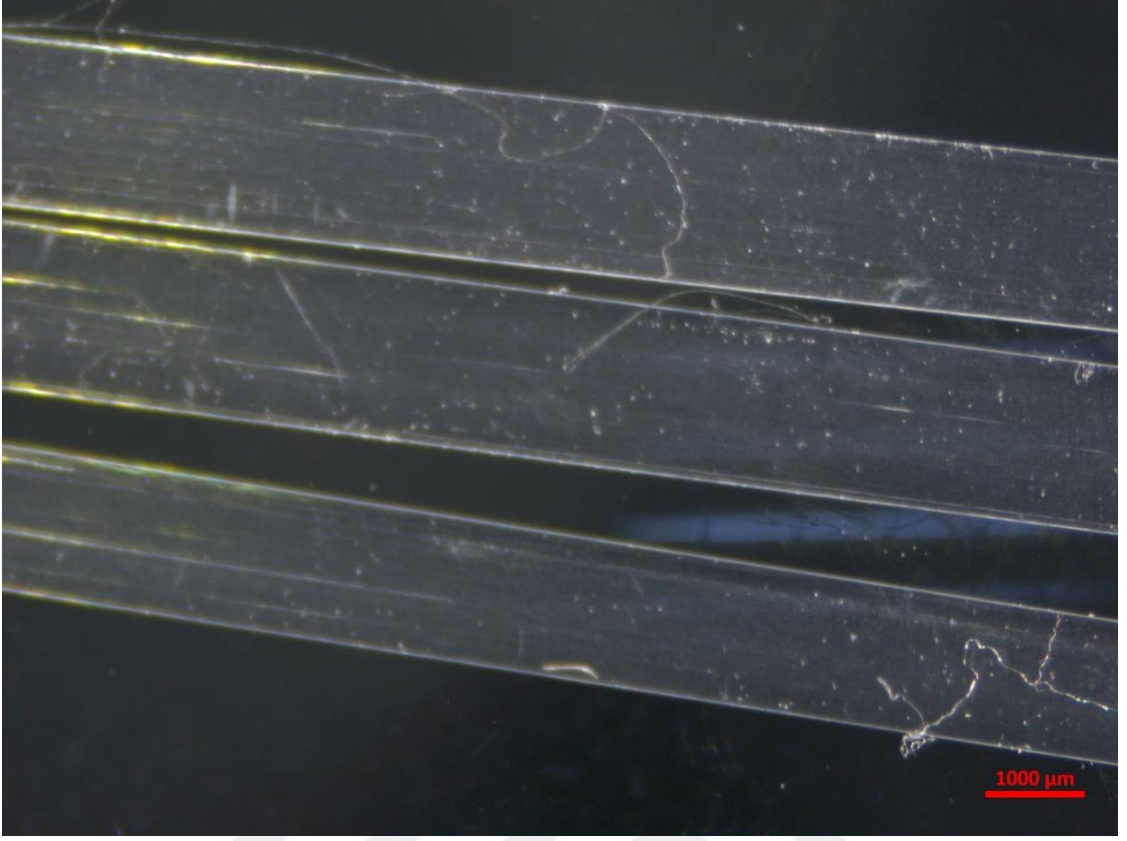


Şekil 3.1. 6 mm PP Lifi mikroskop görüntüleri

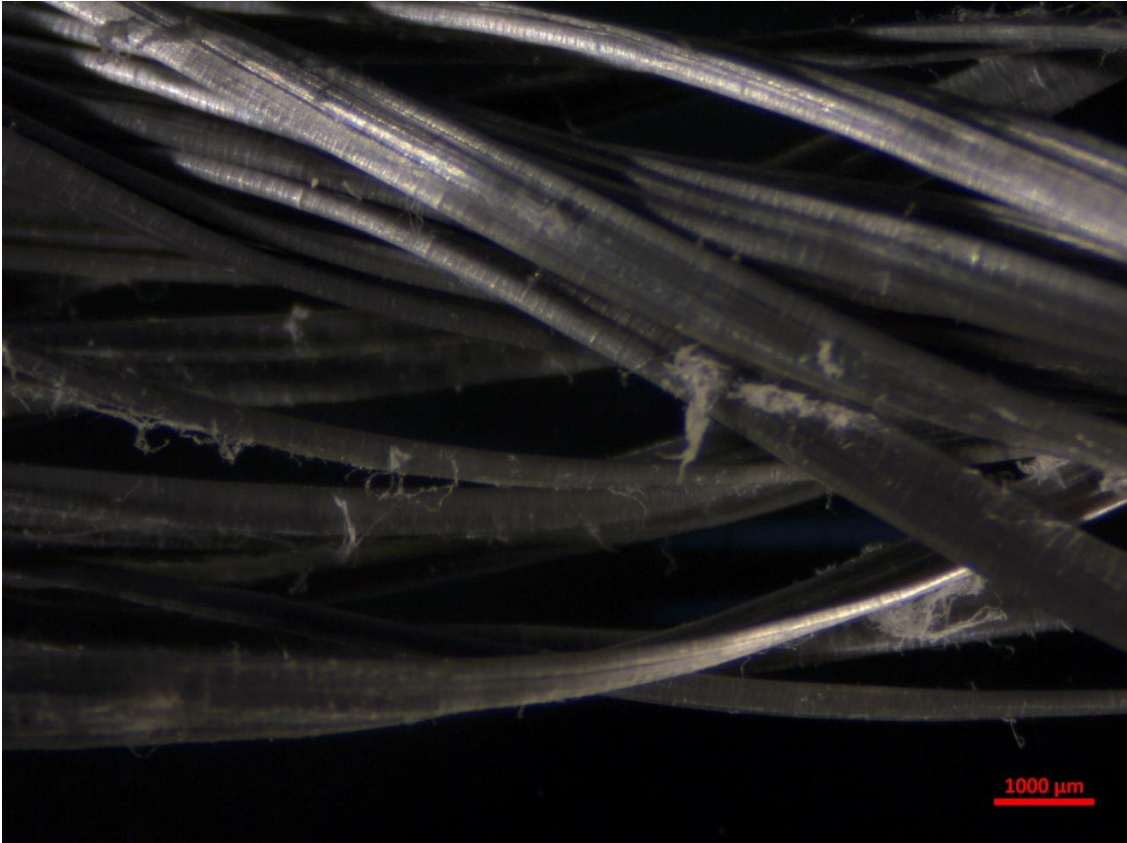


Şekil 3.2. 12 mm PP Lifi mikroskop görüntüleri

Fibermesh 650S, büyük yüzey alanlı saha betonlarının, tokluğunu, mukavemetini ve verimliliğini artırma amacıyla dizayn edilmiş; makro sentetik fiber üründür ve özel olarak ISO 9001:2008 sertifikası standartlarında, beton donatısı olarak kullanılmak üzere tasarlanmıştır. En 14889-2 Avrupa Standartları ve 2006 Polimer Fiber Standartları ile uyumlu olmasının yanı sıra termal şok (sıcaklık farkı) yüzünden meydana gelen çatlamları, beton döküm esnasında oluşan plastik rötre çatlaklarını, ağır yüklemelerden kaynaklanan yıpranmaları ve endüstriyel aşınmaları önleyebilmektedir. Fibermesh 650S; püskürtme beton, cadde-yol inşaatı, havalimanı döşemeleri, kıyı ve liman yapılarında kullanılabilir.



Şekil 3.3. 54 mm Fibermash 650s Lif görüntüleri



Şekil 3.4. 54 mm Macromesh Fiber Lif görüntüleri

Macromesh 54, makro sentetik lif beton donatısıdır. Saha betonlarının uygulanma hızını artırır, Plastik evredeki rötre çatlamlarını bertaraf ederken kenar ve köşe çatlamlarının da önüne geçmektedir. Bunun yanında segregasyonu azaltırken beton bütünlüğünü koruyarak kohezyonu artırmaktadır. Çelik alternatiflerine göre, daha hafif olmasının yanı sıra yapıları gereği korozyona uğramazlar ve ekonomik olarak büyük avantaj sağlamaktadır. Macromesh 54 lifleri; saha betonları, otopark betonları, tabliye üzeri şap betonları, püskürtme betonlar, endüstriyel zeminler, beton yollar dahil olmak üzere, çelik hasır ve çelik fiber yerine her betonda kullanılabilir.

3.1.2. Deneyde Kullanılan Cihazlar

Deneylerde kullanılan metakaolenin karakterizasyonunda ve polikondenzasyon reaksiyonundan sonra elde edilen jeopolimerlerin analizinde farklı cihazlarından yararlanılmıştır.



Şekil 3.5. Mukavemet testlerinin yapıldığı cihaz



Şekil 3.6. Deneyde kullanılan FT-IR cihazı



Şekil 3.7. Deneyde kullanılan mikroskop



Şekil 3.8. Deneyde kullanılan XRD cihazı



Şekil 3.9. Jeopolimerin döküldüğü 4 x 4 x 16 cm³'lük çelik kalıp

3.2. Yöntem

3.2.1. Jeopolimer Reçetelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada aktif madde olarak metakaolen, alkali çözelti olarak sodyum silikat (cam suyu, NaSiO₃), sodyum hidroksit (NaOH), potasyum hidroksit (KOH) kullanılmıştır.

Hesaplamalarda öncelikle metakaolenin içindeki Al₂O₃ ve SiO₂ oranı belirlenmiştir. Oluşturulan reçeteye göre SiO₂ mol miktarı Al₂O₃ mol değerinin 3 katıdır. Bu yüzden gerekli SiO₂ miktarı cam suyundan tamamlanmıştır.

Dört koordineli olan alüminyumun yük dengesi için her bir alüminyum iyonu için bir sodyum iyonu ve dolayısıyla 1: 1 sodyum alüminyum oranı oluşturulmuştur. Reçetede Na₂O ise NaSiO₃ ve NaOH kullanılarak tamamlanmıştır. Literatürden reaksiyona girmemiş hammaddelerin varlığının jeopolimerlerin katı yapısını zayıflatabileceği örneğin fazla su varlığında büyük gözenekler ve çatlaklar ortaya çıktığı bilinmektedir (Sabattini, 2017). Bu nedenle gerekli H₂O miktarına denemelerle ulaşıp ihtiyaç duyulduğu kadar su ilave edilmiştir. Reaksiyondaki Al₂O₃ bileşiğinin kaynağı ise metakaolendir.

Kimyasal formülü: Al₂O₃.2SiO₂, molekül ağırlığı 222 g/mol olan ve deneyde kullanılan metakaolenin kimyasal analizi % 51,97 SiO₂ - % 43,50 Al₂O₃; mineralojik analizi % 95 metakaolen olarak bulunmuştur. Aktif olan kısım için SiO₂ ve Al₂O₃ mol oranları bulunarak hesaplamalara başlanmıştır. Aktif Al₂O₃ mol sayısını bulmak için metakaolen miktarı 10 gr kabul edilirse;

$$\frac{(\text{metakaolen})Al_2O_3 \text{ yüzdesi}}{100 \text{ gram Metakaolen}} \times \frac{(\text{metakaolen})\text{aktif yüzde}}{100 \text{ gram Metakaolen}} \times (\text{metakolen})\text{miktar}}{Al_2O_3 \text{ molekül ağırlığı}}$$

$$n Al_2O_3 (\text{aktif}) = 0,0408 \text{ mol} \quad (3.1)$$

Metakolen içindeki aktif SiO₂ için de aynı işlem tekrarlanırsa;

$$\frac{\text{metakaolendeki } SiO_2 \text{ yüzdesi}}{100 \text{ gram Metakaolen}} \times \frac{\text{metakaolendeki aktif yüzde}}{100 \text{ gram Metakaolen}} \times \text{metakolen miktarı}}{SiO_2 \text{ molekül ağırlığı}}$$

$$n SiO_2 (\text{aktif}) = 0,0838 \text{ mol} \quad (3.2)$$

Metakaolen 0,0408 mol Al_2O_3 ve 0,0838 mol SiO_2 içermektedir. Reçetede Al_2O_3 metakaolenden geldiğine göre;

$$SiO_2/Al_2O_3 = 3 \text{ mol} \rightarrow SiO_2 = 3 \times Al_2O_3 \quad (3.3)$$

$$SiO_2 = 3 \times 0,0408$$

$$SiO_2 = 0,1224 \text{ mol } SiO_2 \text{ gerekli}$$

Gereken 0,1224 mol SiO_2 'nin 0,0838 molü metakaolenden, geri kalanı için $NaSiO_3$ molekül yapısındaki sodyum silikattan (cam suyu) kullanılmıştır. Bu durumda;

$$0,1224 - 0,0838 = 0,0386 \text{ mol } SiO_2 \quad (3.4)$$

$$0,0386 \text{ mol } SiO_2 = 2,319 \text{ gram } SiO_2$$

Kimyasal analizi % 13,50 Na_2O - % 28,2 SiO_2 - % 58,0 H_2O olarak bulunan sodyum silikatın içeriğindeki bileşiklerin mol sayıları hesaplanmıştır. 100 gr sodyum silikat 28,2 gram SiO_2 içeriyorsa kaç gr sodyum silikatın 2,319 gram SiO_2 içerdiği aşağıdaki eşitlikteki gibi bulunmuştur.

$$\frac{2,319 \text{ g } SiO_2 \times 100 \text{ g cam suyu}}{28,2 \text{ g } SiO_2} = 8,224 \text{ g cam suyu} \quad (3.5)$$

100g Cam suyu , 13,5 g Na_2O içeriyorsa ;

$$8,224 \text{ g Cam suyu} \rightarrow 1,11 \text{ g } Na_2O \rightarrow \frac{1 \text{ mol } Na_2O}{61,98 \text{ g}} \times 1,11 \text{ g } Na_2O = 0,018 \text{ mol}$$

$$8,224 \text{ g Cam suyu} \rightarrow 4,77 \text{ g } H_2O \rightarrow \frac{1 \text{ mol } Na_2O}{18 \text{ g}} \times 4,77 \text{ g } H_2O = 0,265 \text{ mol}$$

$$Na_2O \text{ mol sayısı} / SiO_2 \text{ mol sayısı} = 0,33 \quad (3.6)$$

$$\text{Gerekli } Na_2O \text{ mol sayısı} = 0,1224 \times 0,33 = 0,0404 \text{ mol}$$

Gerekli Na_2O 'in 0,018 molünün cam suyundan karşılandığı düşünüldüğünde $NaOH$ 'ten gelecek Na_2O aşağıda hesaplanmıştır.

$$0,0404 \text{ mol} - 0,018 \text{ mol} = 0,022 \text{ mol } Na_2O \quad (3.7)$$



Yukarıdaki denkleme göre 1 mol Na₂O oluşumu için 2 mol NaOH gerekmektedir.

$$n(NaOH) = n(Na_2O) \times 2 = 0,022 \times 2 = 0,045 \text{ mol} \quad (3.9)$$

$$0,045 \text{ mol NaOH} = 0,045 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \times \frac{40 \text{ g}}{1 \text{ mol}} = 1,8 \text{ gram NaOH}$$

$$H_2O \text{ mol sayısı} / Na_2O \text{ mol sayısı} = 11 \rightarrow 0,0404 \times 11 = 0,44 \text{ mol } H_2O$$

Gerekli H₂O'nun 0,022 sinin NaOH'tan 0,265 molünün de cam suyundan karşılandığı düşünüldüğünde eklenmesi gereken H₂O aşağıda hesaplanmıştır.

$$0,44 - 0,022 - 0,265 = 0,16 \text{ mol } H_2O = 2,9 \text{ gram } H_2O \quad (3.10)$$

Jeopolimerizasyon için yukarıdaki hesaplamalar doğrultusunda, 10 gram metakaolen için 8,2 gram cam suyu; 1,8 gram NaOH ve 2,9 gram su değerleri bulunmuştur.

Çizelge 3.3. Lif içermeyen jeopolimer reçeteleri

KOD	GİREN MADDE (GRAM)				
	Metakaolen	Cam Suyu	NaOH	KOH	H ₂ O
j1	10	16,9	1,62		8,35
j2	15	16,9	1,62		8,35
j3	10		3,3		7,5
j4	10	3,55	2,24		4,54
j5	10	3,9	2,6		5,28
j6	10	8,227	1,44		3
j7	10	8,227	1,824		2,9
j8	10	8,69	1,754		4,11
j9	10	12,55	1,11		0,65
j10	10	2,7	1	1,3	5
j11	10	2,7	2,3		5

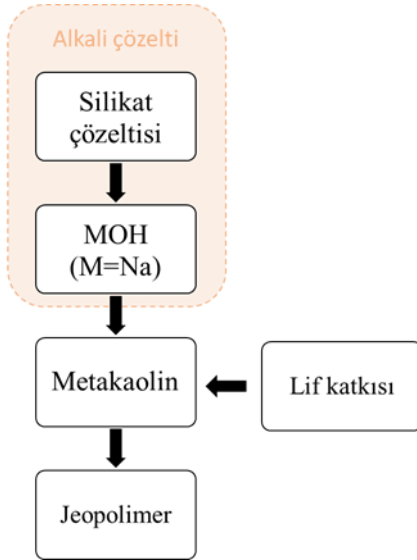
Çizelge 3.3.'te verilen reçete oranlarına uygun olarak, hesaplanan NaOH, (Na₂SiO₃) cam suyunun içinde çözülünceye kadar manyetik karıştırıcı ile karıştırılıp homojen hale getirilmiştir. Tamamen çözüldüğünde su ilave edilip 10 - 15 dakika daha karıştırılmaya

devam edilerek jeopolimer reçetesindeki alkali çözelti hazırlanmıştır. NaOH ve Na₂SiO₃ karışımı 90 °C'ye kadar artan ekzotermik bir reaksiyon meydana getirdiği için hazırlanan alkali çözeltinin soğuması jeopolimerleşmenin kontrol altına alınması için önemlidir. Toz metakaolene oda sıcaklığına kadar soğutulan çözelti eklenip ve karıştırıldıktan sonra elde edilen harç 4 x 4 x 16 cm³'lük çelik bir kalıba dökülmüştür. Jeopolimerleşme bir kondenzasyon polimerizasyonudur ve karışıma eklenen su süreci kolaylaştırıp ve jeopolimerleşme sonunda dışarı çıkmaktadır. Bu nedenle jeopolimer harcının jeopolimerleşme sırasında havayla teması su kaybına bu da çatlak ve kuruluklara sebep olduğundan bir plastik kapakla engellenmiştir.

Çizelge 3.4. Lif katkılı jeopolimer reçeteleri

Kod	Lif		Giren Madde (Gram)				
	Yüzdesi	Türü	Metakaolen	Sodyum silikat	NaOH	H ₂ O	Lif
J7	0,25%	M54	10	8,227	1,824	2,9	1,15
		F6	10	8,227	1,824	2,9	1,15
		F12	10	8,227	1,824	2,9	1,15
		M650S	10	8,227	1,824	2,9	1,15
	0,50%	M54	10	8,227	1,824	2,9	2,3
		F6	10	8,227	1,824	2,9	2,3
		F12	10	8,227	1,824	2,9	2,3
		M650S	10	8,227	1,824	2,9	2,3
	0,75%	M54	10	8,227	1,824	2,9	3,45
		F6	10	8,227	1,824	2,9	3,45
		F12	10	8,227	1,824	2,9	3,45
		M650S	10	8,227	1,824	2,9	3,45

Lif katkılı jeopolimer örneklerinin üretimi için ise Şekil 3.7'de gösterildiği gibi kütlece istenilen yüzde lif Çizelge 3.4.'teki miktarlarda metakaolin içerisine eklenmiş ve örneklerin sertleşmesinin 7. gününde ise mekanik testler için Yalova'da bulunan Ak-Kim Kimya Sanayii'ne gönderilmiştir. Basınç dayanımı ve eğilme testleri için ELE International makinası kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Lif katkılı jeopolimer malzeme üretimi (Sabattini, 2017)

3.2.2. Hammaddenin Karakterizasyonu

Jeopolimer reçeteleri hazırlanırken yapılan hesaplamalarda deneyde reaktif olarak kullanılan metakaolinin içerdiği kimyasal bileşiklerin yüzdelere ihtiyacı duyulmuştur. Metakaolinin yapısındaki alüminyum ve silisyum oranları karışıma katılacak alkali çözeltinin hazırlanması ve jeopolimerizasyon sırasında oluşacak polimerik Si-O-Al bağları için oldukça önemlidir.

3.2.2.1. X-Ray Spektrometre (XRF)

Elemental ve kimyasal kompozisyonu belirlemede kullanılan önemli bir cihaz olan XRF cihazı; X-ışını kaynağı, farklı elementlere hassas kristaller, numune odası, dedektör ve kapalı devre soğutma ünitesinden oluşmaktadır. X-ışınları kaynağından çıkan birincil radyasyon örnek üzerine gönderilerek bu yüksek enerji girişiyle yakın yörüngelerdeki elektronları daha yüksek enerji düzeyine çıkarmaktadır. Uyarılmış elektronlar ilk enerji düzeylerine döndüklerinde kazandıkları fazla enerjiyi dalga boyu 0,1-50 Å olan ve floresan ışına olarak adlandırılan X ışınları şeklinde geri vermektedirler.

Elementlerin verdiği bu ışınların dalga boyu her element için farklı ve ayırt edici olmaktadır. Işımanın dalga boyunun belirlenmesiyle elementin cinsi (nitel) ve bu ışının yoğunluğunun ölçülmesiyle de element konsantrasyonu (nicel) belirlenebilmektedir.

3.2.3. Jeopolimerin Karakterizasyonu

Yapılan çalışmalarda bilim insanları tarafından; XRD, FT-IR ve TGA tekniklerinin jeopolimerin davranışını anlamalarına yardımcı olduğunu görülmüştür. Bu nedenle yapılan araştırmalarda büyük önem taşımaktadır.

Jeopolimerlerin amorf yapısına rağmen, XRD genellikle yeni oluşmuş fazları tanımlamak için kullanılıp, başlangıç materyallerinin reaksiyona girme derecesini tanımlar ve nihai ürünlerin amorfite düzeyini değerlendirmektedir. FT-IR analizi, yüksek heterojenlik sergileyen amorf alümino-silikatların yapısal evrimini incelemek için uygun bir yöntem olarak kabul edilmektedir. Kızılötesi absorpsiyon bantları, spesifik moleküler bileşenlerin ve yapıların tanımlanmasını sağlamaktadır (Sathia, 2008). Termogravimetrik analiz, kontrollü ısıtma sonucunda malzeme ağırlığı kayıplarına neden olan su buharlaşma mekanizmalarını tanımlamak için kullanılabilir, genellikle test sırasında atmosfer seçimine izin vermektedir. Azot veya argon gibi inert atmosferler, oksidasyon gibi ikincil atmosferik reaksiyonları ortadan kaldırmak için kullanılabilir.

3.2.3.1. X-Ray Difraktometre (XRD)

Katı ve toz örneklerin yapılarındaki çeşitli kristal formlar veya fazlar hakkında bilgi veren bu analitik teknik, malzemenin içerdiği fazlar ve bu fazların konsantrasyonu, kristal olmayan fazların miktarı ve kristal boyutu hakkında bilgi vermektedir. Jeopolimerik malzemelerde de amorf (jeopolimer faz) ve kristal fazların varlığı, kristal fazların neler olduğu ve miktarları hakkında bilgiler XRD analizleriyle saptanmaktadır (Yaşın, 2010).

3.2.3.2. Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopisi (FT-IR)

FT-IR genelde jeopolimerlerin karakterizasyonu sırasında yapılan XRD ve NMR analizlerini tamamlayıcı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Jeopolimerlerin FT-IR analizlerinde ağırlıklı olarak Si – O bağlarını ifade eden 1000 cm^{-1} civarındaki pik dikkate alınmaktadır. Çünkü bu pik; silisyum tetrahedraların, alüminyum tetrahedralarıyla ve alkalilerle etkileşimlerinde değişimler göstermektedir.

FT-IR Spektrum Cihazı organik bileşiklerin tanımlanmasında kullanılmasına rağmen bu analiz ile jeopolimer malzemelerin başlangıç malzemesinden son ürün haline dönüşmesine dek geçen süreçteki yapısal değişiklikler hakkında fikir sahibi olunabilmektedir. IR spektrometresi ışın kaynağı, monokromatör, alıcı olmak üzere başlıca üç kısımdan oluşmaktadır. Optik izomerler dışında bütün bileşiklerin IR spektrumu

birbirinden farklıdır. IR bölgesi elektromanyetik spektrumun görünür bölgesi ile mikro dalga bölgesi arasında yer alır. Bu bölge $4000-450\text{ cm}^{-1}$ dalga boyu arasındadır (Criado,2005).

3.2.3.4. Mikroskop

Jeopolimerlerin yüzey yapıları, mikro gözeneklerinin boyutu ve şekli mikroskop ile belirlenebilir. Bu tezde örnekler ZEISS Stemi 305 Axiocam 105 color mikroskobu ile çekilmiştir.

3.2.3.5. Mukavemet Testi

Basınç dayanımı, sertleşme süresi ve sertleşme sıcaklığına bağlıdır ve tüm betonlar için vazgeçilmez bir özelliktir. Sertleşme süresi ve sıcaklığı arttığında, basınç dayanımı da artar. Ayrıca basınç dayanımı, jeopolimerlerin yapısında esas olarak bulunan metakaolen, kaolin ve cüruf gibi ham madde tozlarının inceliğine de bağlıdır ve basınç kuvveti tozun inceliği arttıkça artmaktadır. Bunun yanında aktivatörlerin yapısı ve konsantrasyonunun da jeopolimerleşme reaksiyonundaki baskın faktör olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla reaksiyon ürünlerine kolayca karışan ve harç özelliklerinin iyileştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunan çözünmüş ve kısmen polimerize edilmiş silikon içerdiği için sodyum silikat, alkali çözelti için oldukça uygundur (Rickard,2010, Bakri, 2012). Bu tez çalışmasında basınç dayanımı ve eğilme testleri için ELE International makinası kullanılmıştır.

BÖLÜM 4
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 Metakaolenin Karakterizasyonu

4.1.1 XRF Sonucu

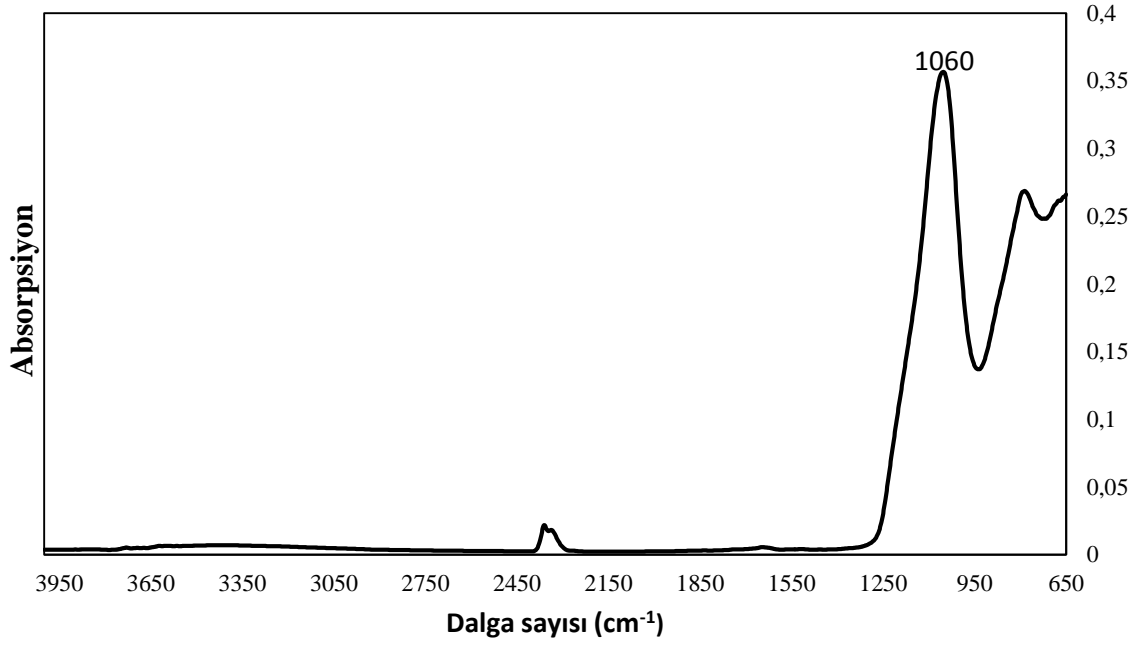
Deneyde kullanılan metakaolinin XRF sonucu Çizelge 4.1. de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Metakaolin XRF sonuçları

METAKAOLİN					
Bileşik	% Ağırlık	Standart Sapma	Element	% Ağırlık	Standart Sapma
SiO ₂	51.97	0.25	Si	24.30	0.12
Al ₂ O ₃	43.52	0.25	Al	23.03	0.13
Na ₂ O	0.969	0.048	Na	0.719	0.036
MgO	0.917	0.046	Mg	0.553	0.028
Fe ₂ O ₃	0.842	0.042	Fe	0.589	0.029
TiO ₂	0.563	0.028	Ti	0.338	0.017
Cl	0.502	0.025	Cl	0.502	0.025
K ₂ O	0.433	0.022	K	0.360	0.018
CaO	0.146	0.007	Ca	0.104	0.005
ZnO	0.0312	0.0016	Zn	0.0251	0.0013
P ₂ O ₅	0.0269	0.0014	Px	0.0117	0.0006
ZrO ₂	0.0185	0.0009	Zr	0.0137	0.0007
SO ₃	0.0149	0.0007	Sx	0.0060	0.0003
Cr ₂ O ₃	0.0087	0.0006	Cr	0.0060	0.0004
PbO	0.0069	0.0011	Pb	0.0064	0.0010
Ga ₂ O ₃	0.0062	0.0003	Ga	0.0046	0.0003
V ₂ O ₅	0.0059	0.0008	V	0.0033	0.0004
La ₂ O ₃	0.0041	0.0008	La	0.0035	0.0007
NiO	0.0036	0.0005	Ni	0.0028	0.0004
SrO	0.0025	0.0005	Sr	0.0021	0.0004
Rb ₂ O	0.0021	0.0005	Rb	0.0019	0.0004
MnO	0.0019	0.0004	Mn	0.0015	0.0003
CuO	0.0018	0.0004	Cu	0.0014	0.0003

4.1.2 FT-IR Sonucu

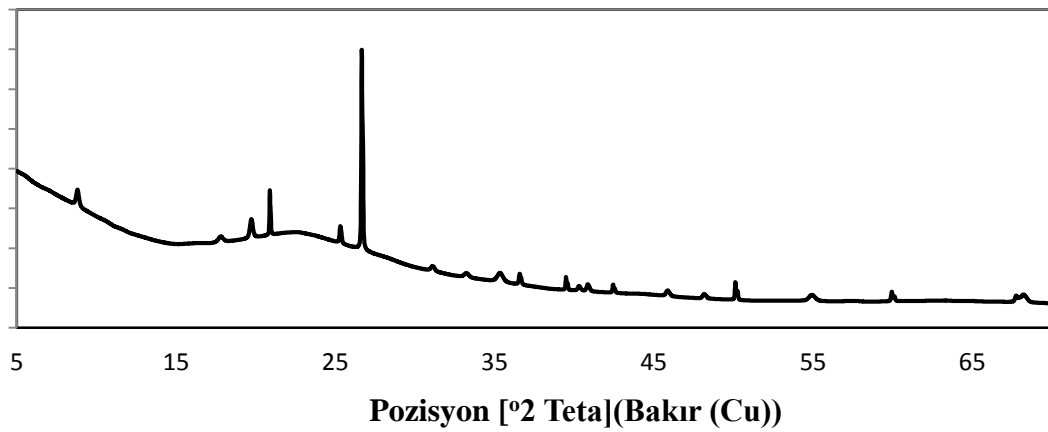
Deneyde kullanılan metakaolinin FT-IR sonucu Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Metakaolin FT-IR sonucu

4.1.2 XRD Sonucu

Deneyde kullanılan metakaolinin XRD sonucu Şekil 4.2.'de verilmiştir.



Şekil 4.2. Metakaolin XRD sonucu

4.2 Jeopolimerin Optimizasyonu

4.2.1 Mukavemet Sonucu

Jeopolimer malzemelerin optimizasyonu için farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarındaki J7, J3, J5, J9 örneklerine eğilme ve basınç mukavemet testleri yapılmıştır. Üretilen jeopolimer örneklerinin farklı Silisyum Alüminyum oranlarındaki mukavemet test sonuçları Çizelge 4.3., Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.' te gösterilmiştir.

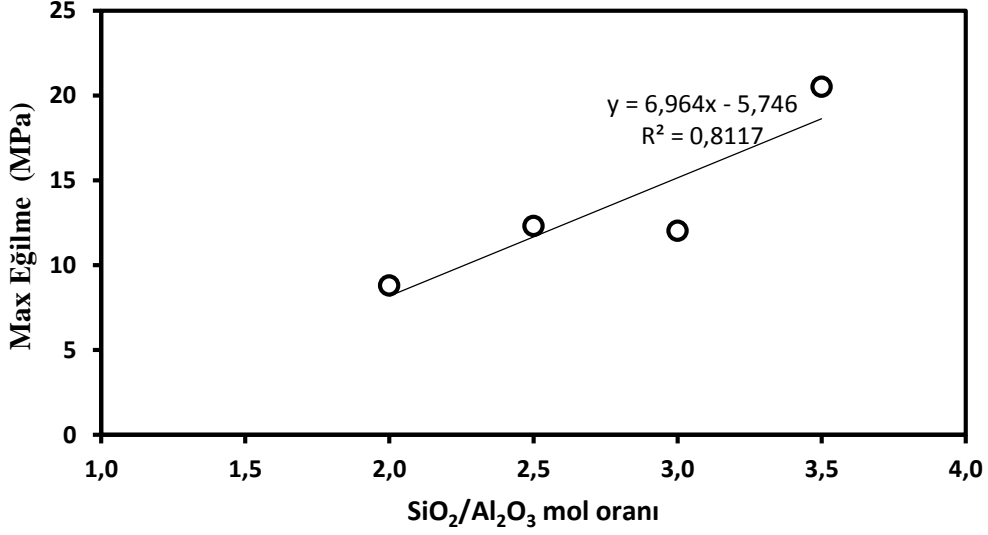
Çizelge 4.2. Jeopolimer molar oranları

KOD	MOL ORANLARI (Mol/Mol)			
	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	$\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$
J1	4,0	0,3	18,0	1,4
J2	3,3	0,3	18,0	0,9
J3	2,0	0,5	11,1	1,0
J4	2,5	0,4	11,0	0,9
J5	2,5	0,4	11,0	1,0
J6	3,0	0,3	12,5	0,9
J7	3,0	0,3	11,0	1,0
J8	3,1	0,3	13,0	1,0
J9	3,5	0,3	11,0	1,0
J10	2,4	0,2	20,5	0,5
J11	2,4	0,4	11,4	0,8

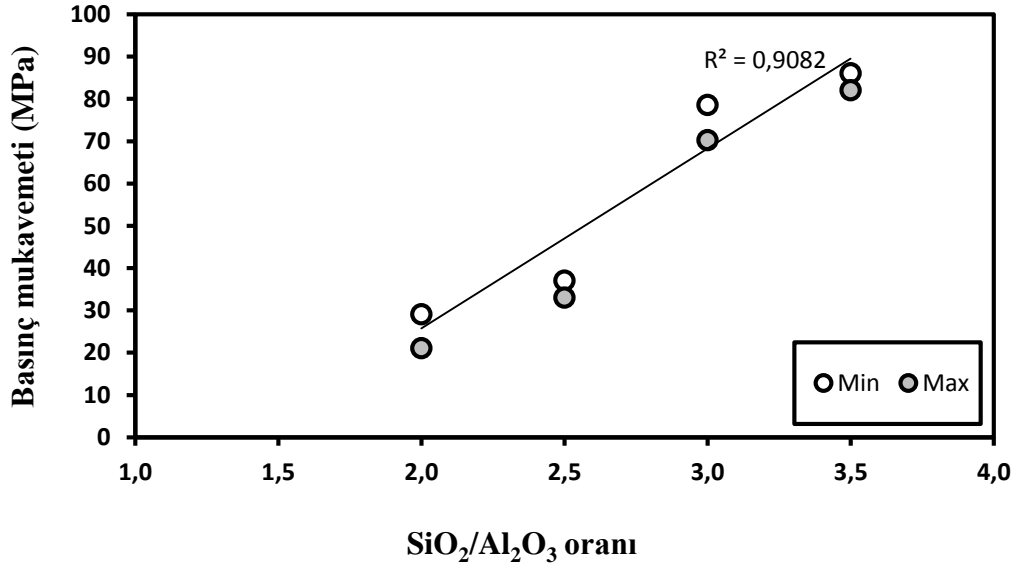
Çizelge 4.3. Farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarındaki jeopolimerlerin mukavemet test sonuçları

Kod	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	M/Al	Eğilme max(MPa)	Max basınç(MPa)
J3	2,0	1,0	8,80	25
J5	2,5	1,0	12,30	35
J7	3,0	1,0	12,02	74,36
J7*	3,0	1,0		74
J9	3,5	1,0	20,50	84
J4	2,5	0,9	8,01	20,765
J10	2,4	0,8	8,31	37,39
J10*	2,4	0,8		12,28
J11*	2,4	0,8	7,02	17,395

Çizelge 4.3.'te gösterilen M/Al oranı (Na/Al ya da K/Al) kullanılan alkali katyonun alüminyuma molar oranını vermektedir. J7*, J10* ve J11* örnekleri ise jeopolimerleşme süresince üstü açık ortamda bekletilmiş ve ortam koşullarının jeopolimerleşmeye etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.3. Jeopolimer örneklerinin eğilme mukavameti test sonuçları



Şekil 4.4. Jeopolimer örneklerinin basınç mukavameti test sonuçları

4.3 Jeopolimerin Karakterizasyonu

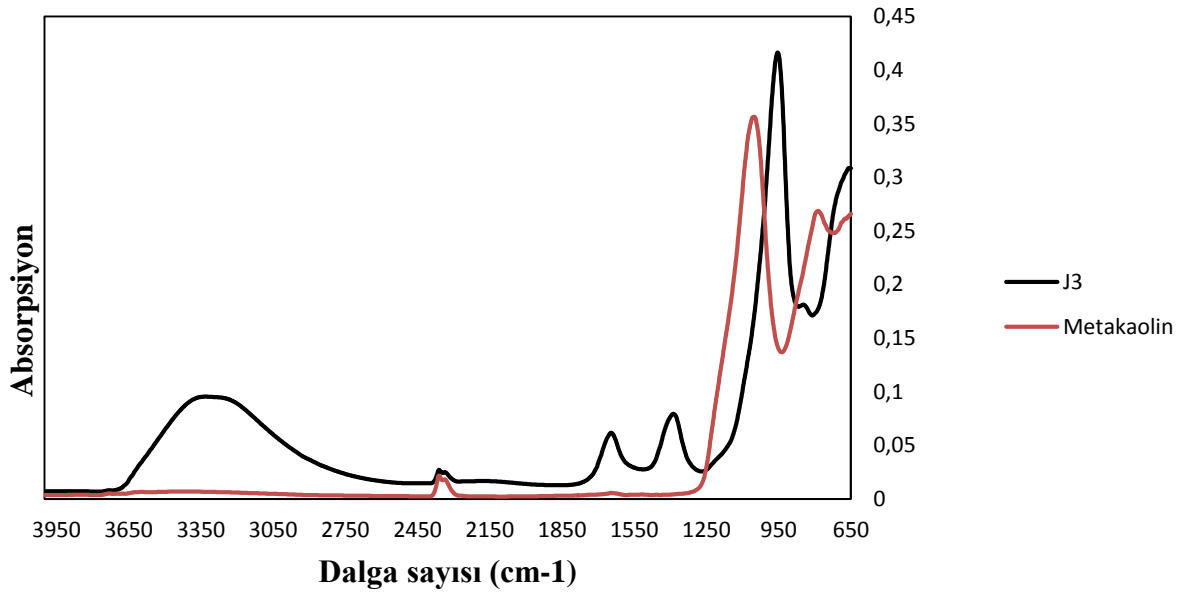
Jeopolimer malzemelerin karakterizasyonu için XRD, FT-IR, mukavemet testlerinden faydalanılmıştır.

4.3.1 FT-IR Sonuçları

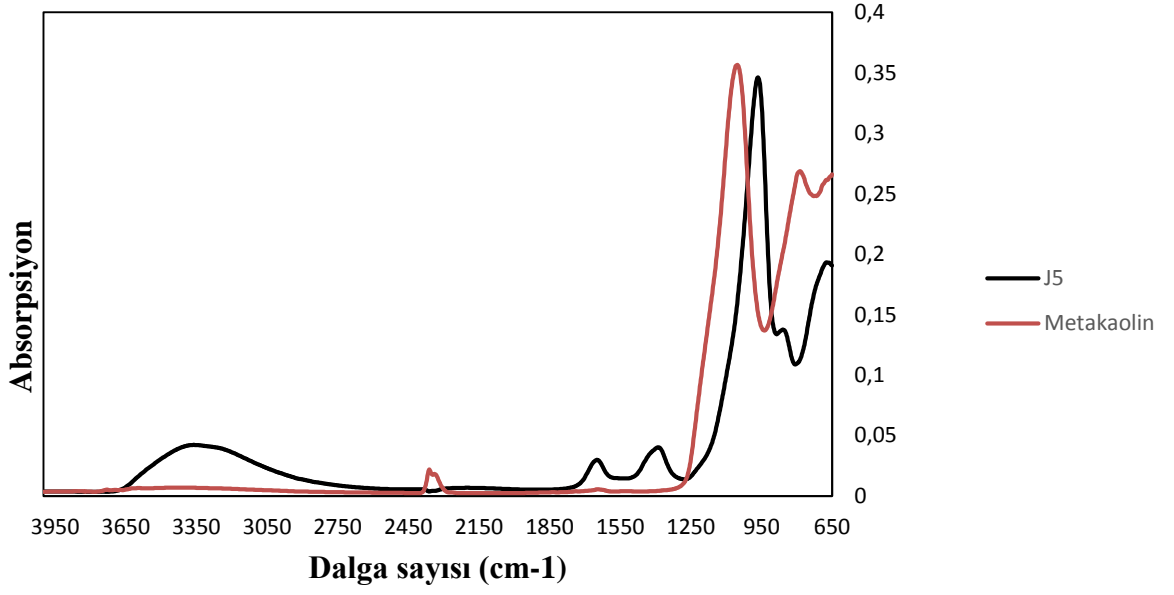
J3, J5, J7, J9 örnekleri için FTIR sonuçları sırasıyla Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7., Şekil 4.8.' de verilmiştir.

Çizelge 4.4. IR spekturumunda dalga sayısı ve bağlar

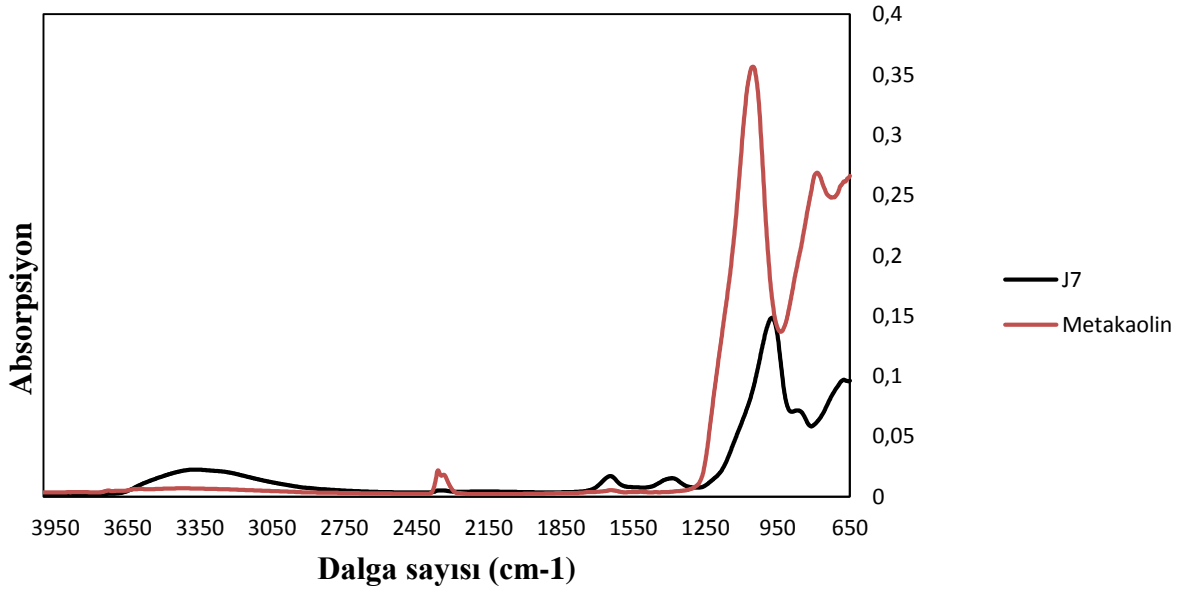
Dalga Sayısı cm^{-1}	Bağlar ve Açıklaması
3350	Güçlü OH Germe Titreşimi
1600-1650	H-OH Moleküler Bükülmesi
1400	Güçlü O=S=O
1000-950	Si-O-T (T= Si, Al) Tetrahedralları
950	Güçlü S=O Gerilmesi
875	Si-OH Bükülmesi
690	Si-O-Si / Si-O-Al Bükülmesi



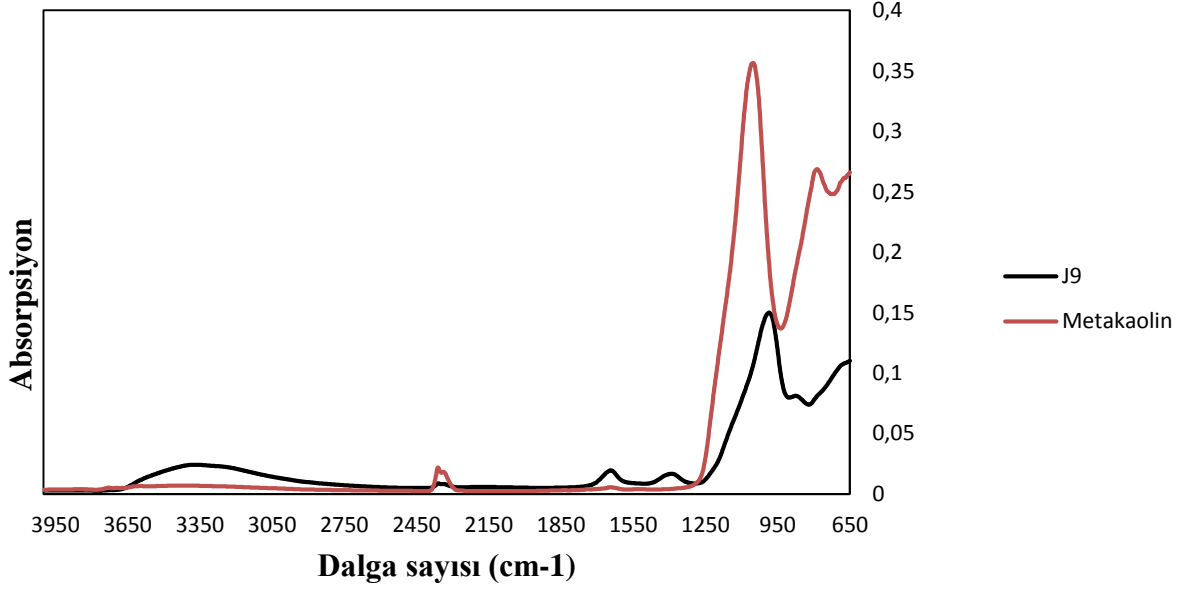
Şekil 4.5. J3 jeopolimeri FT-IR sonucu



Şekil 4.6. J5 jeopolimeri FT-IR sonucu



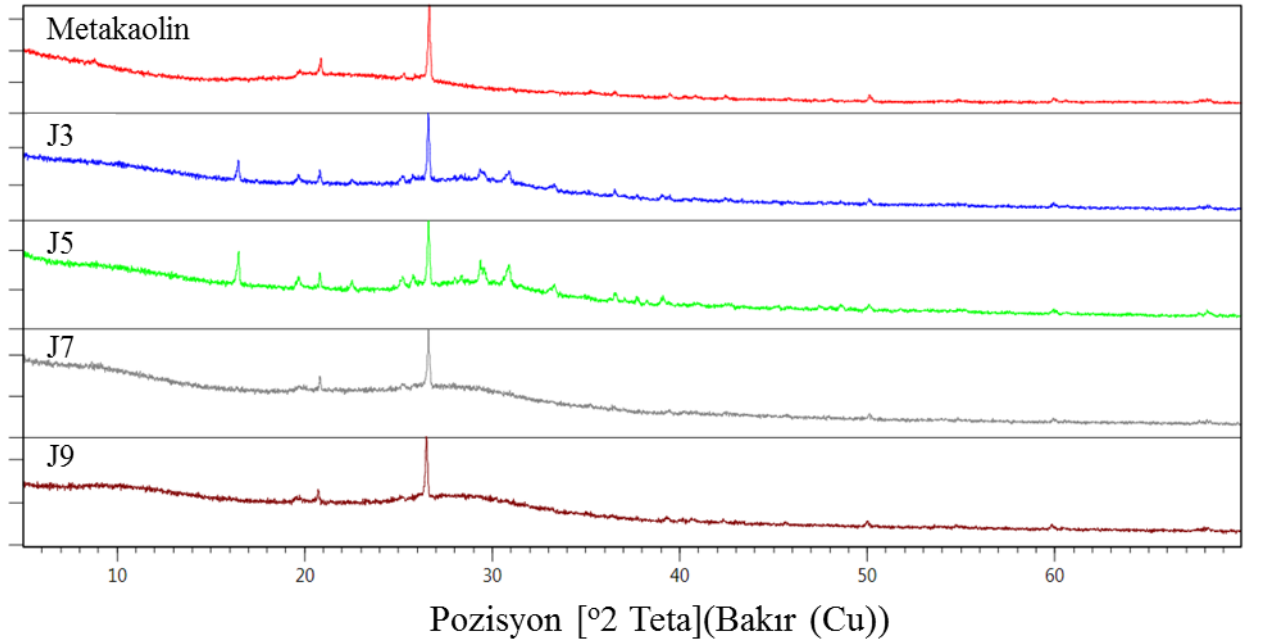
Şekil 4.7. J7 jeopolimeri FT-IR sonucu



Şekil 4.8. J9 jeopolimeri FT-IR sonucu

4.3.2 XRD Sonuçları

Jeopolimer örneklerin XRD'leri alınırken başlangıç açısı 5, bitiş açısı 70 seçilip anotta Cu kullanılarak 40 mA, 45 kV ile 25°C'de yapılmıştır.



Şekil 4.9. Metakaolin ve jeopolimerlerin XRD sonucu

4.3.3 Mukavemet Sonuçları

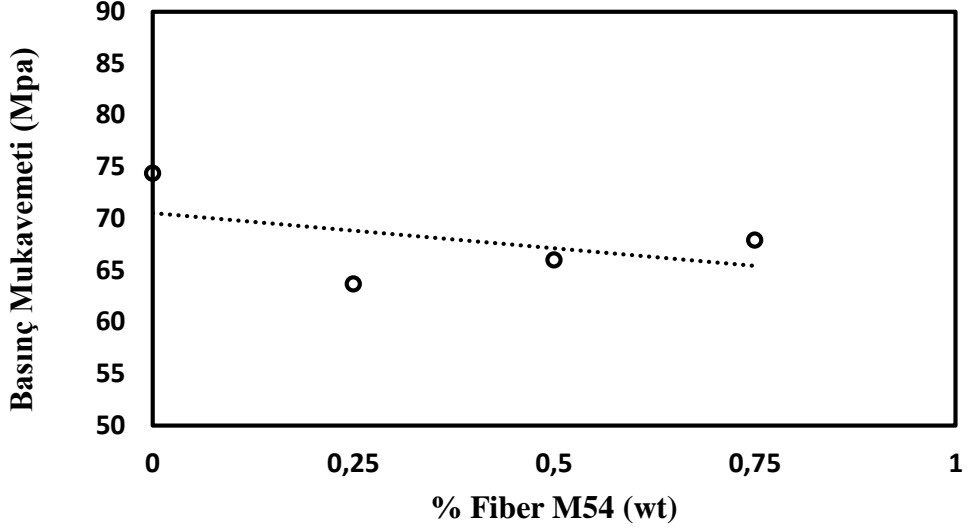
J7 örneğine farklı oranlarda M54, M50S, F6, F12 lifleri katılarak numunelere eğilme ve basınç mukavemet testleri yapılmıştır. Lif katkılı jeopolimer örneklerin mukavemet sonuçları Çizelge 4.5'te verilmektedir.

Çizelge 4.5. Lif katkılı J7 jeopolimer örneklerinin mukavemet sonuçları

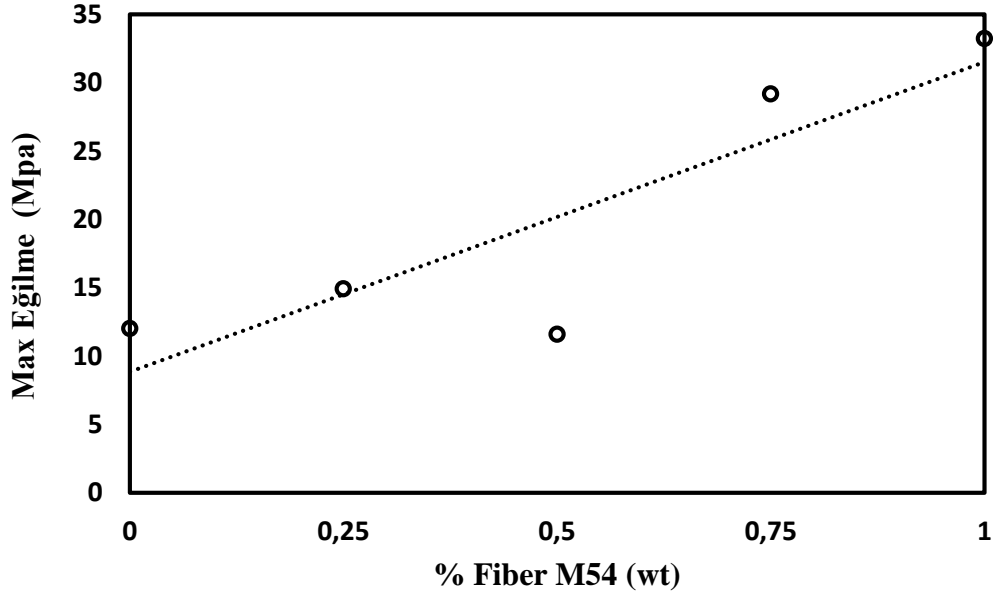
Fiber Yüzdesi	Fiber Türü	Max eğilme(MPa)	Max basınç(MPa)
0,25%	M54	14,92	63,68
	F6	6,54	76,84
	F12	6,16	77,77
	M650S	10,88	64,28
0,50%	M54	11,58	65,98
	F6	15,28	76,835
	F12	10,21	71,995
	M650S	9,3	43,895
0,75%	M54	29,18	67,915
	F6	20,37	91,74
	F12	17,33	81,015
	M650S	23,56	58
1%	M54	33,22	
	F6	21,08	84,3

4.3.3.1 M54 Lif Katkılı Jeopolimer

M54 lifleri ile güçlendirilmiş jeopolimer örneklerin mukavemet sonuçları Çizelge 4.5.'te verilmektedir. Bu sonuçlara göre artan lif oranına göre basınç grafiği ve eğilme grafiği sırasıyla Şekil 4.10. ve Şekil 4.11.'de verilmektedir.



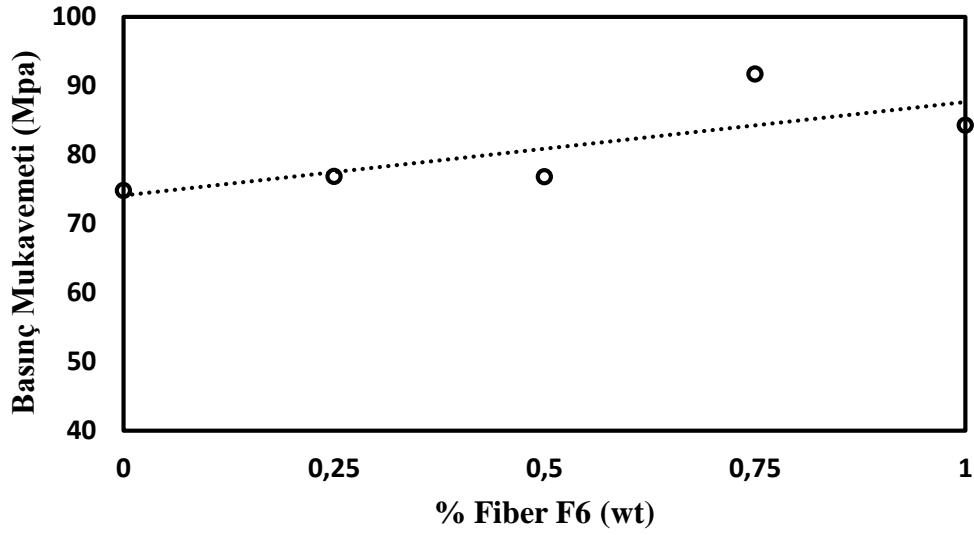
Şekil 4.10. J7 M54 jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu



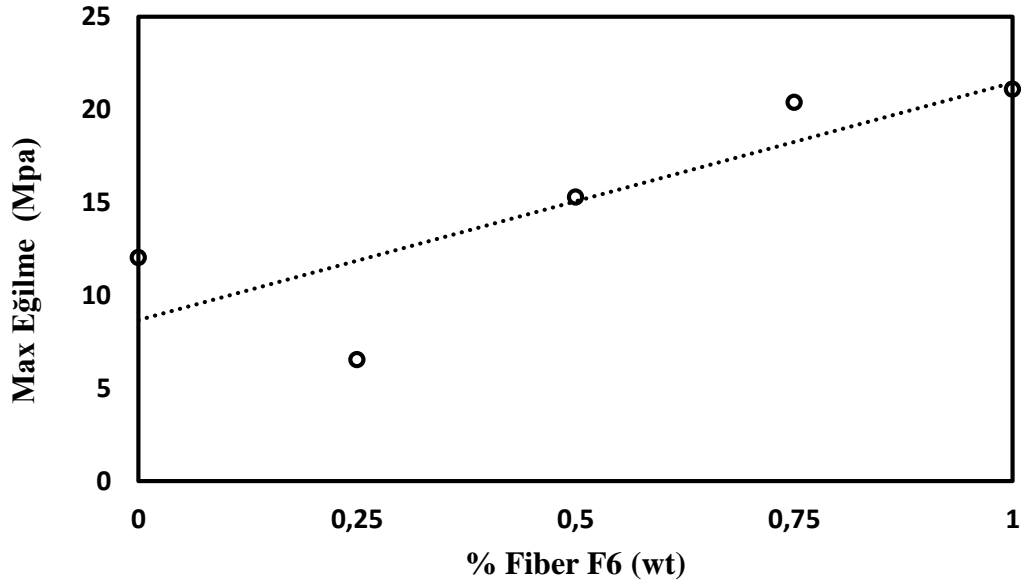
Şekil 4.11. J7 M54 jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu

4.3.3.2 F6 Lif Katkılı Jeopolimer

F6 lifleri ile güçlendirilmiş jeopolimer örneklerin mukavemet sonuçları Çizelge 4.5.'te verilmektedir. Bu sonuçlara göre artan lif oranına göre basınç grafiği ve eğilme grafiği sırasıyla Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'te verilmektedir.



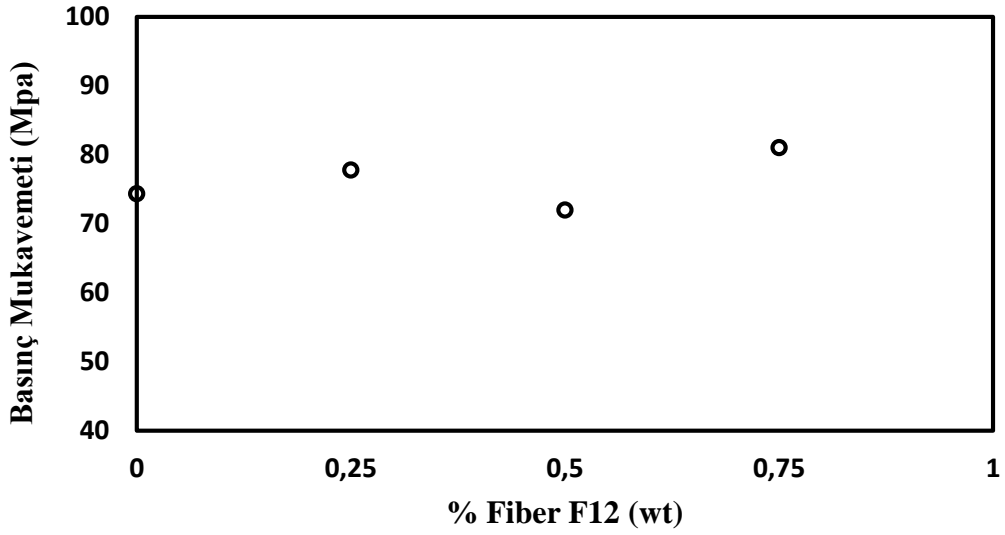
Şekil 4.12. J7 F6 jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu



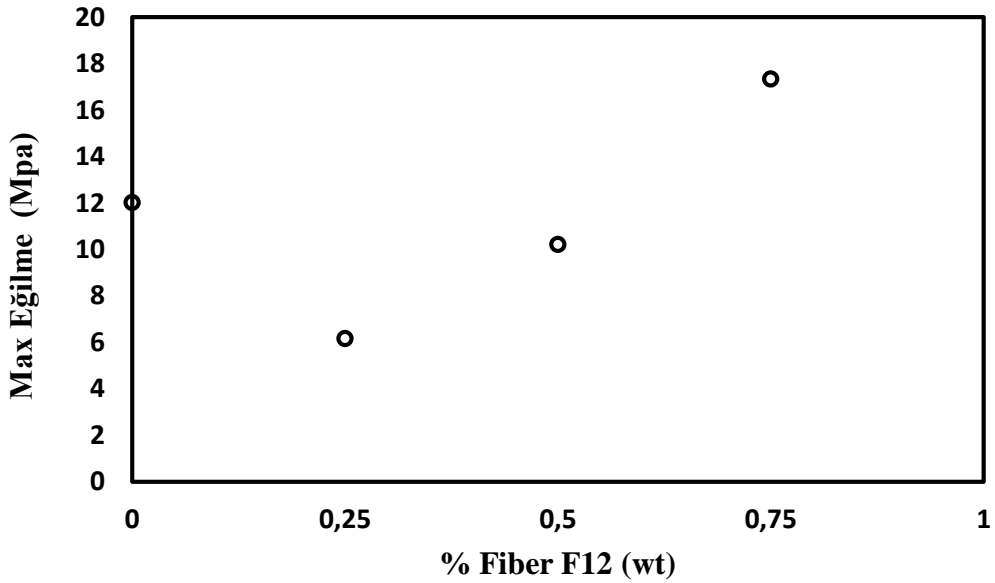
Şekil 4.13. J7 F6 jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu

4.3.3.3 F12 Lif Katkılı Jeopolimer

F12 lifleri ile güçlendirilmiş jeopolimer örneklerin mukavemet sonuçları Çizelge 4.5.'te verilmektedir. Bu sonuçlara göre artan lif oranına göre basınç grafiği ve eğilme grafiği sırasıyla Şekil 4.14. ve Şekil 4.15.'te verilmektedir.



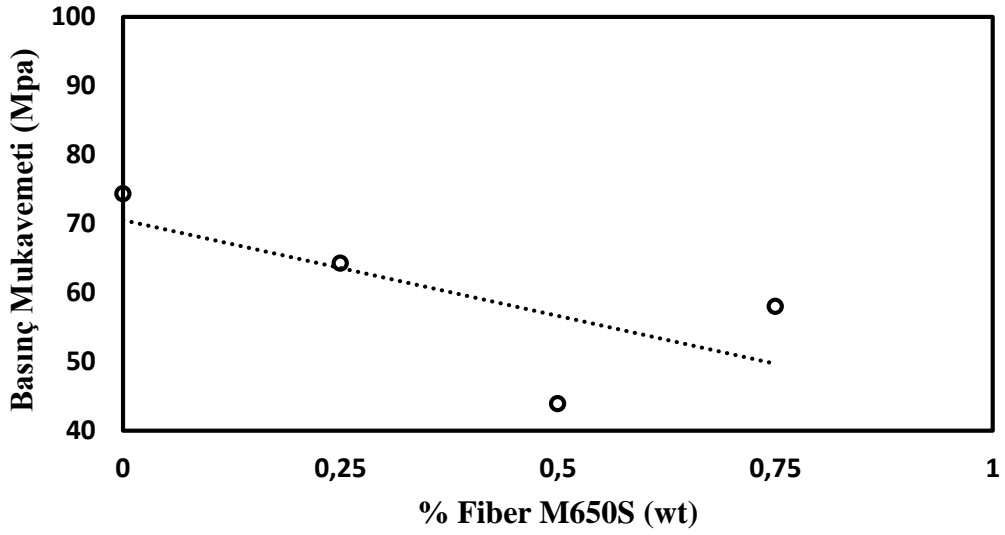
Şekil 4.14. J7 F12 jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu



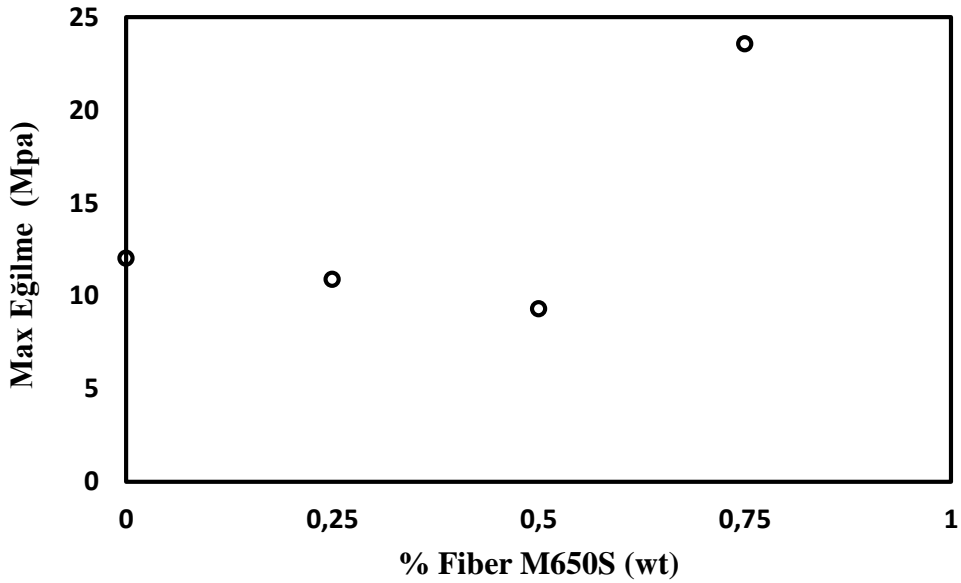
Şekil 4.15. J7 F12 jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu

4.3.3.4 M650S Lif Katkılı Jeopolimer

M650S lifleri ile güçlendirilmiş jeopolimer örneklerin mukavemet sonuçları Çizelge 4.5.'te verilmektedir. Bu sonuçlara göre artan lif oranına göre basınç grafiği ve eğilme grafiği sırasıyla Şekil 4.16. ve Şekil 4.17.'de verilmektedir.



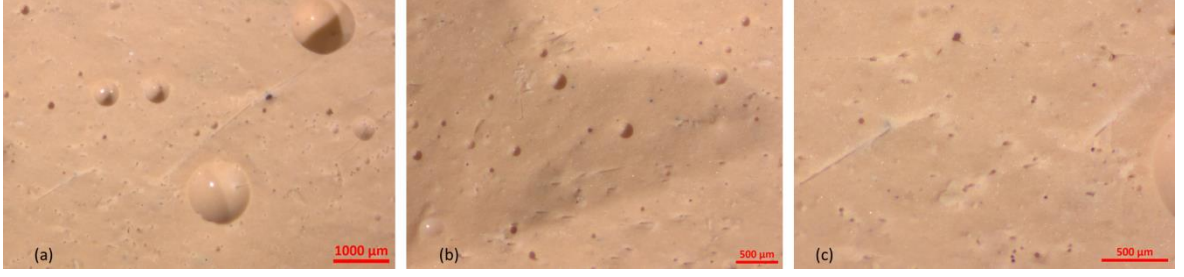
Şekil 4.16. J7 M650S jeopolimer örneğinin basınç mukavemeti test sonucu



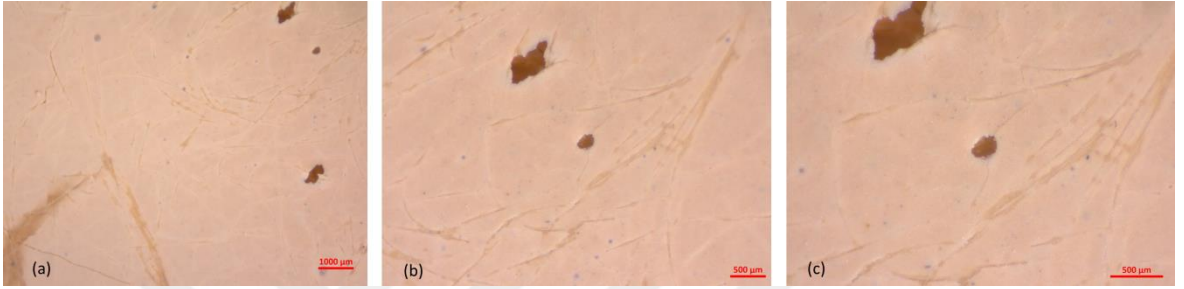
Şekil 4.17. J7 M650S jeopolimer örneğinin eğilme mukavemeti test sonucu

4.3.4 Mikroskop Sonuçları

F6 lif katkılı J7 örneğinin gözenekleri ZEISS Stemi 305 Axiocam 105 color mikroskobu ile çekilmiştir. Jeopolimer harca katılan % 0,25 F6 lif katkısı Şekil 4.18'de, % 0,50 F6 lif katkısı Şekil 4.19'da verilmektedir.

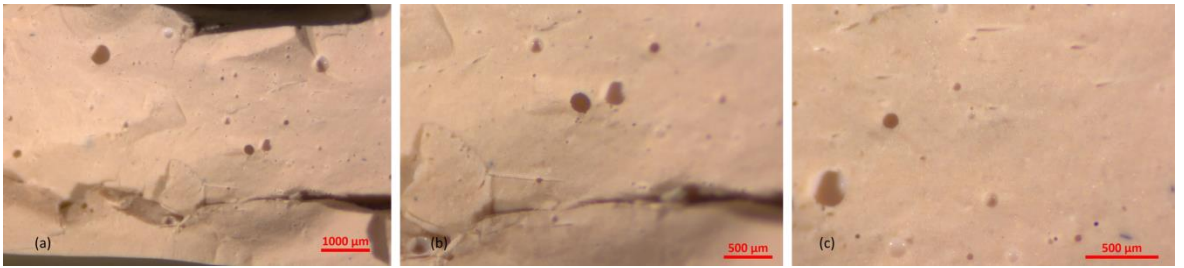


Şekil 4.18. % 0,25 F6 lif içeren J7 jeopolimer kalıbın farklı büyütmele mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.

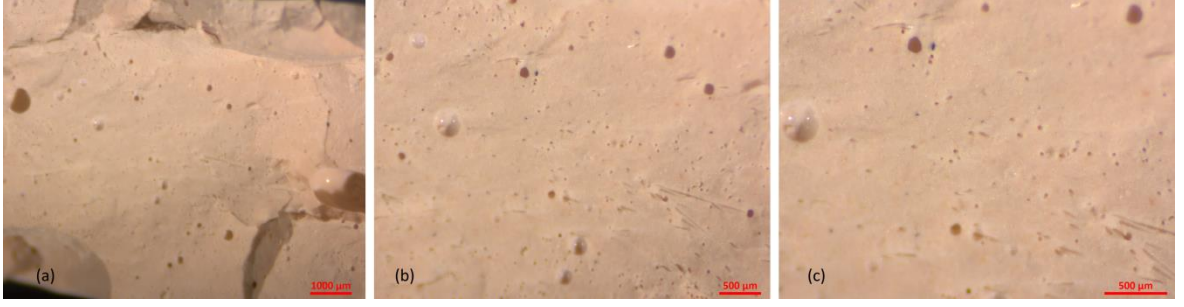


Şekil 4.19. % 0,50 F6 lif içeren J7 jeopolimer kalıbın farklı büyütmele mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.

F6 lif katkılı J8 örneğinin jeopolimer harcına katılan % 0,25 F6 lif katkısı Şekil 4.20'de, % 1 F6 lif katkısı ise Şekil 4.21'de sırasıyla 1x, 2x, 3x büyütülerek verilmiştir.



Şekil 4.20. % 0,25 F6 lif içeren J8 jeopolimer kalıbın farklı büyütmele mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.



Şekil 4.21. % 1 F6 lif içeren J8 jeopolimer kalıbın farklı büyütme mikroskop görüntüleri a) 1x b) 2x c) 3x.

4.4 Bulguların Tartışılması

OH Hidroksil iyonlarının ısınmaya bağlı bileşikten ayrılması dehidroksilasyon olarak adlandırılmaktadır. Jeopolimerde silisyum konsantrasyonu arttığında dehidroksilasyonun dehidrasyon oranına artışı gözlemlenmiştir. Bu durumda jeopolimer ağındaki fazla Si atomunun dehidroksilasyon işlemi dehidrasyon işleminden daha önemli kıldığı sonucuna varılmaktadır. Bu durum aynı zamanda alkali katyon ile de bağlantılıdır; sodyum iyonu dehidroksilasyonla kütle kaybında artışa neden olurken dehidrasyonla kütle kaybını azaltmaktadır. Aynı zamanda reaksiyona girmemiş hammaddelerin varlığı da jeopolimerlerin katı yapısını zayıflatmaktadır. Örneğin fazla su varlığında büyük gözenekler ve çatlaklar ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle jeopolimer reçete oranlarının doğru seçilmesi gereklidir.

Jeopolimerleşmede Silisyum konsantrasyonunun önemini görmek için ise 2-2,5-3-3,5 olmak üzere farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarında sırasıyla J3, J5, J7, J9 reçeteleri Çizelge 4.2'deki gibi hazırlanmıştır ve bu jeopolimer örneklerinin basınç mukavemeti test sonuçları Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'te verilmiştir.

Şekil 4.1' de literatürde (Lahoti 2018 ve Chen 2018) ve bu çalışmada üretilen jeopolimer örneklerinin basınç mukavemetleri verilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalara paralel olarak elde ettiğimiz mukavemet test sonuçları birbirini desteklemektedir. Yapılan mukavemet testlerinden $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı arttıkça viskozitede azalma gözlenirken basınç ve eğilme mukavemetlerinde de doğrusal bir şekilde artış olduğu görülmektedir. 2 ve 3,5 oranları arasında eğilmeye karşı dirençli olması yeterli olacak bir jeopolimer istenirse fazla kimyasal harcanmaması için 2,5 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı yeterli olacakken basınç dayanımı öncelikli ise $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3 olan bir jeopolimer reçetesi hazırlanmalıdır. Bu sebeple jeopolimerlerin kullanım alanlarına göre reçete seçimi oldukça önemlidir. Örneğin $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2,5 olan J5 jeopolimeri $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3 olan J7 örneği ile aynı eğilme

mukavemetine sahiptir. Ancak J7 reçetesi daha fazla Sodyum silikat içermekte ve daha fazla maliyete sebep olmaktadır. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 3,5 olan J9 jeopolimeri ise J7 ve J5'in 2 katı kadar yüksek bir eğilme mukavemeti değerine sahipken basınç mukavemetine bakıldığında J7 ile çok yakın değerlere sahip olduğu görülmelidir. Bu durumda fiyat-performans karşılaştırması yapılıncaya en iyi basınç ve eğilme mukavemet değerleri için J7 jeopolimer örneğinin ideal olduğu düşünülmüştür. Ekonomik olmasının yanı sıra gereksiz kimyasal kullanımının da önüne geçilerek üretilen jeopolimerin çevre dostu olması sağlanmaya çalışılmıştır.

$\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ oranı 2,5 olan J4 ve J5 jeopolimerlerinin; $\text{H}_2\text{O} : \text{Na}_2\text{O}$ oranları 11'de, $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ oranları da 0,4 te sabit tutulmuştur. J4 ve J5 örnekleri arasındaki fark reçetede $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ oranıdır. J5 jeopolimeri 1 : 1 sodyum alüminyum oranına sahipken J4'ün 0,88'dir. Yapılan mukavemet testlerinden moleküler yapı açıklamalarıyla paralel olarak 1 : 1 sodyum alüminyum oranının maksimum dayanımı verdiği görülmektedir. Alüminyum, dört koordineli olduğundan, yük dengelenmesi için her bir alüminyum iyonu için bir sodyum iyonu ve dolayısıyla 1 : 1 sodyum alüminyum oranı gereklidir. Mukavemet testlerinde de görüldüğü gibi $\text{SiO}_2 : \text{Al}_2\text{O}_3$ ve $\text{Na}_2\text{O} : \text{SiO}_2$ oranları arttıkça basınç dayanımında azalma görülmekte ve numunenin sodyum/alüminyum oranı 1 olduğunda ise maksimum dayanıma sahip olmaktadır.

Jeopolimerlerde ortamın sertleşme koşulunun mukavemet etkisini gözlemlemek için J10 örneği iki farklı ortam koşulunda jeopolimerleşmeye maruz bırakılmıştır. J10 örneklerinden biri üzeri kapalı su kaybını engelleyecek bir ortama diğeri ise üzeri açık oda sıcaklığındaki bir ortama bırakılmıştır. Yüzeyi açık olan J10 örneğinin eğilme mukavemeti, cihaz üzerinde okunamayacak kadar küçüktür, sıkıştırma mukavemeti de %60 oranında azalmıştır. Dolayısıyla J10 örneği jeopolimerleşme sırasında üstü açık ortamda bekletildiğinde mukavemetteki düşüş belirgin bir şekilde gözlemlenmektedir.

J10 ve J11 jeopolimerleri arasındaki mukavemet farkı alkali çözelti hazırlanırken KOH yerine NaOH kullanılmasından kaynaklanmıştır. J11 jeopolimeri, karışımda alkali olarak sadece NaOH içerirken ve J10 jeopolimeri NaOH ve KOH içermektedir. Kullanılan alkali maddeye bağlı olarak ortam koşullarının kürlenme üzerindeki etkilerini görebilmek için jeopolimerler üzeri açık ortamda sertleşmeye bırakılmıştır. Sodyum katyonu potasyumdan daha büyük bir hidrasyon küresine sahip olduğu için sodyum kullanılan jeopolimer karışımlarındaki serbest su miktarı da potasyum içeren karışımlara göre az olmaktadır. Bu nedenle yapılan deneylerde üstü açık ortamda sertleşen jeopolimer numuneler incelendiğinde potasyum hidroksitli alkali çözelti içeren jeopolimerlerin

Sodyum Hidroksitli alkali çözelti içeren jeopolimerlerden daha gevrek bir yapıya sahip olduğu mukavemet sonuçlarında da moleküler açıklamalara paralel olarak bulunmuştur. Potasyum - sodyum iyonlarının sahip olduğu serbest hidrasyon enerjisiyle açıklanan bu durum potasyum iyonunu AlO_4 'ün iç bölgelerine daha çok yaklaştırır ve böylelikle jeopolimer yapısını eğilmeye karşı daha kararlı hale getirmektedir. Dolayısıyla potasyumun küçük hidrasyon küresi, karışımda daha az miktarda serbest suya neden olur ve sodyum içeren J11'nin neden daha yüksek basınç direncine sahip olduğunu açıklar. Yapılan mukavemet testlerinden de anlaşıldığı gibi jeopolimerlerin basınç mukavemetleri farklı sertleşme koşulları altında değişmektedir. Önerilen jeopolimerleşme oda sıcaklığında ağzı kapalı bir ortamdır.

IR spekturumunda dalga sayısı $3600-1200\text{ cm}^{-1}$ arasını kapsayan bölge foksiyonel grup bölgesi olarak adlandırılırken, $1200-600\text{ cm}^{-1}$ arasını kapsayan bölge ise küçük yapısal değişiklikleri gösteren parmak izi bölgesi olarak adlandırılmaktadır. 3500 cm^{-1} 'de gözlenen geniş pik, yapıda alkol veya fenol olduğunu göstermektedir.

FT-IR grafiklerinde ortam değişimleri ya da ortamda fazla su bulunması shiftlere (sağa ya da sola kayma) yol açabilmektedir. Bu durum jeopolimerde buharlaşmayan suyun varlığını gösterebilmektedir. Ayrıca ham madde olan metakaolinin piklerindeki azalmanın az olduğu jeopolimerlerde yüksek verimde jeopolimerleşme gözlenmemişi düşünülmemiştir. J3, J5, J7, J9 örnekleri için FTIR sonuçları sırasıyla Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7., Şekil 4.8.' de verilmiştir.

J7 jeopolimer örneği için 3350 cm^{-1} güçlü OH germe titreşimi, $1600-1650\text{ cm}^{-1}$ H-OH moleküler bükülmesi, 1400 cm^{-1} C-O sodyum kalsiyum gerilmesi ve güçlü O=S=O bağlarını içermektedir. $1000-950\text{ cm}^{-1}$ 'de Si-O-Si ya da Si-O-Al tetrahedralleri görülmektedir. 875 cm^{-1} Si-OH bükülmesi, 690 cm^{-1} 'de ise Si-O-Si/Si-O-Al bükülmeleri görülmektedir.

J3 jeopolimerinin IR spekturumunda Çizelge 4.4.'ten çıkarılabildiği gibi 3350 cm^{-1} 'de güçlü OH gerilme titreşimi, 1400 cm^{-1} 'de güçlü O=S=O bağlarını, 950 cm^{-1} 'de güçlü S=O bağları gerilmesi görülebilmektedir. 970 cm^{-1} geniş bandı Si ya da Al merkezli SiO_4 , AlO_4 tetrahedrallerindeki Si-O, Al-O asimetrik atom titreşimine aittir. Ayrıca fazla belirgin olmayan 3650 cm^{-1} de gözlenen dar soğurma bandının O ve Na atomları ile çevrili O-H bağlarına ait olduğu düşünülmektedir.

M54 lifli katkılı jeopolimer eğilme sonuçları % 0,75 ve %1 lif oranı için oldukça yüksektir ancak eğilmedeki bu iyileşmenin sebebi kompozit malzemedeki mukavemet artışı değil lifin yoğunluğundan kaynaklanan lif mukavemetidir. Ayrıca M54 lifi

katıldığında basınç mukavemetindeki azalma üretilen kompozit jeopolimer malzemede mukavemet olarak istenen sonuçların anlinamadığını göstermektedir. Ancak aranan özellik eğilme gösterilecek dirençse M54 lifi jeopolimere % 0,75 oranında katıldığında iyi bir sonuç elde edilebilmektedir.

Jeopolimere katılan M650S lifi basınç mukavemetinde jeopolimerin bütünlüğünü bozduğu için düşüşe yol açmıştır. Benzer olarak jeopolimer kompozitte eğilme mukavemeti de azalmıştır ancak M650S lif katkılı jeopolimerin eğilme mukavemeti sonucu % 0,75 lif oranı için oldukça yüksek çıkmıştır.

F6 lif katkısı jeopolimerin basınç mukavemetinde grafikte gösterildiği gibi doğrusal bir artış sağlamıştır. En uygun lif katım oranı % 0,75 olarak bulunmuştur. Üretilen lif katkılı jeopolimerin eğilme basınç mukavemeti % 0,25 lif oranı dışında doğrusal bir artış göstermektedir. Lif oranı % 0,25 olan jeopolimer kompozitte eğilme mukavemetindeki düşüşün jeopolimerin bütünlüğünün bozulması ve bununla birlikte takviye edilen lif oranının lif özelliklerini ortaya çıkarmayacak kadar az olması gibi iki sebebi olduğu düşünülmektedir.

F12 lifi katılan jeopolimer kompozitlerde grafikte gösterildiği gibi basınç mukavemetinde % 0,75 lif katkısına kadar ciddi bir artış görülmemiştir. Ayrıca % 0,75'lik lif katkısına kadar eğilme mukavemetindeki düşüşün jeopolimerin bütünlüğünün bozulması ile ilgili olduğu ancak kütleye % 0,75 oranında lif katıldığında kompozitten istenen mukavemetin sağlandığı görülmüştür. F6 ve F12 lifleri aynı yapıda olmalarına rağmen liflerdeki uzunluk farkı liflerin jeopolimerin içinde farklı homojenlikte oldukları bu nedenle farklı mukavemet sonuçları verdiklerini göstermektedir. Bu nedenle lif katkılı jeopolimer bir malzemede öncelik liflerin yapıya olabildiğince homojen katılması ve bu sayede jeopolimerin kendi yapısını bozmamasıdır.

Jeopolimer gözenekleri katılan lif oranı %0,25 iken homojen , küçük ve fazlayken, %0,50'de azalmış, %1'de ise liflerin gözenekleri sardığı ve bu sayede jeopolimerin mukavemetini artırdığı mukavemet test sonuçlarında da paralel olarak görülebilmektedir. Şekil 4.18 ve Şekil 4.19 karşılaştırıldığında F6 liflerinin jeopolimerlerde oluşabilecek çatlakları ortadan kaldırdığı ve jeopolimerleşme süresince oluşan gözenekleri büyük ölçüde kapattığı düşünülmektedir.

Şekil 4.9'da verilen metakaolin ve farklı $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarındaki jeopolimerlerin XRD sonuçları incelendiğinde metakaolindeki kristalliğin jeopolimerlerde amorf yapıya dönüştüğü grafikteki 25 - 30 derece arasındaki eğrilerden anlaşılmaktadır. Kristallikte gözlemlenen azalma ve oluşan amorflik polimerleşmeyi kanıtlamaktadır. Metakaolin ve

diğer jeopolimerlerde de değişmeyen bir pik olan Kristobalit (SiO_2) piki silikanın kalsine olmasıyla oluşan yüksek saflıkta bir inert üründür. Başlangıç açısı 5, bitiş açısı 70 seçilip anotta Cu kullanılarak alınan XRD jeopolimer örneklerinde gözlemlenen bir başka durum ise $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranlarındaki değişimle ortaya çıkan ve tekrar kaybolan İllit, Mullit ve Gibsit piklerdir. $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı sırasıyla 2 ve 2,5 olan J3 ve J5 örneklerinde gözlemlenen seramik sanayiinde kullanıldığı bilinen yeni pikler $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ oranı sırasıyla 3 ve 3,5 olan J7 ve J9 örneklerinde görülmemektedir. Jeopolimerler arasındaki amorf ve kristalin fazlar incelendiğinde amorf fazda artma görünürken kristalin faz azalmaktadır. Bu durum jeopolimerleşmede kullanılan sodyum silikat veya sodyumun ortamda atık olarak kaldığını da düşündürmektedir. Ayrıca farklı silisyum içerikli jeopolimer yapılarında gözlemlenen bu değişim hazırlanan jeopolimer reçetelerinin sanayideki kullanım alanlarına bağlı olan değişimini açıklamaktadır.

BÖLÜM 5

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yüksek CO₂ emisyonu ve yüksek enerji gereksinimi gibi dezavantajlara sahip geleneksel çimento üretim metotları yerine, mekanik özellikleri geliştirilmiş, enerji tasarrufu sağlayacak ve çevre dostu olarak değerlendirilebilecek polimerik lif katkılı güçlendirilmiş jeopolimer kompozit malzeme üretimi incelenmiştir.

Bu tezin ana hedefi, farklı sıcaklıktaki iki ortam arasında ısı geçişini azaltacak, ısıtma-soğutma sistemlerinin istenen performansla işletilebilmesini ve böylece enerji tasarrufu sağlayacak polimerik lif katkılı güçlendirilmiş kompozit jeopolimer malzemelerin üretilmesidir. Bu amaçlar doğrultusunda farklı SiO₂/Al₂O₃, Na₂O/Al₂O₃, H₂O/Na₂O molar oranlarına sahip jeopolimer reçeteleri denenmiş ve mekanik karakterizasyon çalışmaları, basınç ve eğilme dayanımı testleri ile gerçekleştirilmiştir. XRF, XRD ve FTIR analiz metotları ile metakaolin ve jeopolimerlerin kristallenme dereceleri ve kristal yapılarındaki bağları incelenmiştir. Farklı Si/Al oranına sahip jeopolimerlerin XRD sonuçlarına bakılarak amorf fazı yüksek, kristallliği azalmış olan örneklerdeki jeopolimerleşmenin daha yüksek olduğu düşünülmüştür.

Artan Si/Al oranı ile basınç ve eğilme mukavemetlerinde artış olduğu görülmüş ve mukavemet testlerinin sonuçları incelenerek optimum SiO₂/Al₂O₃ oranına karar verilmiştir. Lif katılacak jeopolimer reçetesi SiO₂/Al₂O₃:3, Na₂O/Al₂O₃:1, H₂O/Na₂O:18 molar oranı ile sabitlenmiştir. Jeopolimer harca 4 farklı lif katılmış ve lif oranı ağırlıkça % 0,25 ile % 1 arasında tutulmuştur. En iyi mukavemet sonuçları jeopolimer yapıya en uyumlu ve en homojen şekilde katılan F6 ve F12 lif katkılı jeopolimer kompozitlerinde bulunmuştur. F6 lifi % 0,25 olarak katıldığında basınç mukavemetinde % 4, % 0,75 olarak katıldığında ise % 23'lük bir iyileşme görülmüştür. F6 lif katkılı jeopolimerlerin F12 lif katkılı örneklerden daha yüksek mukavemete sahip olması ise malzemenin jeopolimer yapıya uyumluluğunun yanında boyutlarıyla da doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir.

Çalışmaların F6 lifine benzer boyutlarda ve yangına dayanıklı liflerle devam ettirilmesi düşünülmektedir. Özellikle tünel gibi kapalı alanlarda yol kaplaması olarak yanıcı madde içeren asfalt kaplamalar yerine yanmaz bir malzeme olan jeopolimerler ve yangın esnasında oluşabilecek patlamaları önlemek için de polipropilen lifler seçilebilir. Bu çalışmada üretilen polimerik lif katkılı jeopolimer malzemelerin porlu yapısı ve düşük ısı iletimi özelliği ile binalarda yüksek ısı yalıtımı sağlanarak enerji giderlerinden tasarruf edilebilecektir.

KAYNAKLAR

- Ali H., Lynn P., Elina L., 2012. Emerging Energy-Efficiency and CO₂ Emission-Reduction Technologies for Cement and Concrete Production. A Technical Review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16: 6220–6238.
- Alzeer M., MacKenzie K.J.D., 2013. Synthesis and Mechanical Properties Of Novel Composites Of İnorganic Polymers (Geopolymers) With Unidirectional Natural Flax Fibres. Appl.Clay.Sci., 75 (6): 148-152.
- Ashadi H.W., Astutiningsih S., Nurjaya D.M., Swastika N., 2010. Durability of Geopolymer Concrete upon Seawater Exposure. Trans Tech Publications, Switzerland.
- Bakri A.M., Kamarudin H., Bnhussain M., Nizar I.K., Rafiza A.R., Zarina Y., 2012. The Processing, Characterization, And Properties Of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. Rev.Adv.Mater.Sci., 30: 90-97.
- Barbosa V.F.F., MacKenzie K.J.D., Thaumaturgo C., 2000. Synthesis and Characterisation of Materials Based on İnorganic polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers, Int. J. Inorg. Mater., 2, (4): 309-317.
- Bohlooli H., Nazari A., Khalaj G., Kaykha M.M., Riahi S., 2012. Experimental İnvestigations and Fuzzy Logic Modeling of Compressive Strength of Geopolymers with Seeded Fly Ash and Rice Husk Bark Ash. Compos. Part B, 43 (3): 1293-1301.
- CCANZ., 2009. Fibre Reinforced Concrete. Information Bulletin, IB39, 19. Retrieved from <http://www.cca.org.nz>.
- Cement and Concrete Institute, 2010. Fibre reinforced concrete. Information Bulletin, 6.
- Chen X., Niu Z., Wanga J., Zhua G.R., Zhou M., 2018. Effect of Sodium Polyacrylate on Mechanical Properties and Microstructure of Metakaolin-Based Geopolymer with Different SiO₂/Al₂O₃ Ratio. Ceramics International, 44: 18173–18180.
- Chindaprasirt P., Chareerat T., Sirivivatnanon V., 2007. Workability and Strength of Coarse High Calcium Fly Ash Geopolymer. Cem. Concr. Compos., 29 (3): 224.

- Criado M., Palomo A., Ferná'ndez-Jime'nez A., 2005. Alkali Activation of Fly Ashes. Part 1: Effect of Curing Conditions on the Carbonation of the Reaction Products. *Fuel*, 84: 2048–2054.
- Cui G., Li R.R., 2007. The Development Of Inorganic Non-Expansion Fire-Proof Coating: Current Progress And The Possibility., *Shanghai Coat.*, 45 (1): 52–55.
- Comrie D.C., Paterson J. H., Ritchey D.J., 1988. Geopolymer Technologies in Toxic Waste Management. Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- Dai X., Wen Z., 2002. Affecting Factors for Geopolymerisation Reaction, *J. Build. Mater.*, 5 (3): 284–288.
- Davidovits J., 1988b. Geopolymer Chemistry and Properties. Paper presented at the Geopolymer '88, First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, France.
- Davidovits J., 1991. Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials. *Journal of Thermal Analysis*, 37: 1633-1656.
- Davidovits J., 1994. Global Warming Impact on the Cement and Aggregates Industries. *World Resource Review*, 6: 263-278.
- Davidovits J., 1999. Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology. Paper presented at the Geopolymere '99 International Conference, Saint-Quentin, France.
- Davidovits J., 2015. False Values on CO₂ Emission For Geopolymer Cement/Concrete Published in Scientific Papers, Geopolymer Institute Library, Technical Paper, 24.
- Davidovits J., 2011. Geopolymer Chemistry and Applications. Institut Geopolymer, Saint-Quentin, France, (3).
- Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L. , Luckey G.C., Palomo A. , van Deventer J.S.J., 2007. Geopolymer Technology: the Current State of the Art. *Mater. Sci.*, 42: 2917-2933.
- Duxson P, Provis JL, Lukey G. C, Van Deventer J.S.J., 2007. The Role of Inorganic Polymer Technology in the Development of 'Green Concrete'". *Cement Concrete Research*, 37(12), 1590–1597.

- Essaidi N., Samet B., Baklouti S., Rossignol S., 2014. Feasibility of Producing Geopolymers from Two Different Tunisian Clays Before and After Calcination at Various Temperatures. *Appl. Clay Sci.*, 88–89: 221-227.
- Ferreira J.A.M., Capela C., Costa J.D., 2010. A Study of the Mechanical Properties of Natural Fibre Reinforced Composites. *Fibers Polym.*, 11 (8): 1181-1186.
- Gourley J. T., 2003. Geopolymers; Opportunities for Environmentally Friendly Construction Materials. Paper presented at the Materials 2003 Conference: Adaptive Materials for a Modern Society, Sydney.
- Gourley J.T., Johnson G.B., 2005. Developments in Geopolymer Precast Concrete. Paper presented at the International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete, Perth, Australia.
- Hammell J.A., Balaguru P.N., Lyon R.E., 2000. Strength Retention of Fire Resistant Aluminosilicate–Carbon Composites Under Wet–Dry Conditions. *Compos. Part B*, 31: 107-111.
- He P., Jia D., Wang S., 2013. Microstructure and Integrity of Leucite Ceramic Derived from Potassium-Based Geopolymer Precursor. *Journal of the European Ceramic Society*, 33: 689–698.
- Huntzinger D.N., Eatmon T.D., 2009. A Life-Cycle Assessment of Portland Cement Manufacturing: Comparing the Traditional Process with Alternative Technologies. *J. Clean. Prod.*, 17 (7): 668-675
- Jaarsveld J. G. S. v. & Deventer, J. S. J., 1996. The Potential Use of Geopolymeric Materials to Immobilise Toxic Metals Theory and Applications Part I. *Minerals Engineering*, 10: 659-669.
- Jansson A., 2008. Fibres in Reinforced Concrete Structures-Analysis, Experiments and Design. Department of Civil and Environmental Engineering Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, 66.
- Kipping F.S., 1927. Silicones. *J. Chem. Soc.*, 130: 104.

- Kriven W.M., Bell J.L., Gordon M., 2003. Microstructure and Microchemistry of Fully-Reacted Geopolymers and Geopolymer Matrix Composites, *Ceram. Trans.*, 153 (4): 227-250.
- Li X. , Duan C. , Ma B. , Huang J. , Zhao Z. , Yin H., 2013. Influence of Fibre on Cracking Performance of Metakaolin-Based Geopolymer. *J. Wuhan Univ. Tech.*, 35 (6): 7-12.
- Lahoti M., Wong K.K., Yang E., Tan K.H., 2018. Effects of Si/Al Molar Ratio on Strength Endurance and Volume Stability of Metakaolin Geopolymers Subject to Elevated Temperature. *Ceramics International* 44: 5726–5734.
- MacKenzie K.J.D., Welter M., 2014. Geopolymer (aluminosilicate) Composites: Synthesis, Properties and Applications. Victoria University of Wellington, New Zealand.
- McCaffrey R., 2002. Climate Change and the Cement Industry. *Global Cement and Lime Magazine (Environmental Special Issue)*, 15-19.
- Nematollahi B., Sanjayan J., Shaikh F.U.A., 2014. Comparative Deflection Hardening Behavior of Short Fiber Reinforced Geopolymer Composites. *Constr. Build. Mater.*, 70: 54-64.
- Noushini A., Hastings M., Castel A., Aslani F., 2018. Mechanical and Flexural Performance of Synthetic Fibre Reinforced Geopolymer Concrete. *Construction and Building Materials*, 186: 454–475.
- Rangan B.V., 2010. Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. In *Proceedings of Proceedings of the International Workshop on Geopolymer Cement and Concrete*, Mumbai, India. Allied Publishers Private Limited.
- Rangan B.V., Hardjito D., Wallah S.E., Sumajouw D.M.J., 2006. Properties and Applications Of Fly Ash-Based Concrete. *Materials Forum*, 30: 170-175.
- Reddy B.S.K., Varaprasad J., Reddy K.N.K., 2010. Strength and Workability of Low Lime fly-ash Based Geopolymer Concrete. *Indian J. Sci. Tech.*, 3(12): 1188.
- Rickard W.D.A., Riessen A.V., Walls P., 2010. Thermal Character of Geopolymers Synthesized from Class F Fly Ash Containing High Concentrations of Iron and a-Quartz. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, (7), 1.

- Roy D.M., 1999. Alkali-Activated Cements, Opportunities and Challenges, *Cem. Concr. Res.*, 29 (2): 249-254 .
- Rosas-Casarez C.A., Arredondo-Rea S.P., Gómez-Soberón J.M., Alamaral-Sánchez J.L., Corral-Higuera R., Chinchillas-Chinchillas M.J., Acuña-Agüero O.H.. 2014, Experimental Study of XRD, FTIR and TGA Techniques in Geopolymeric Materials. *International Journal of Advances in Computer Science & Its Applications*, (4).
- Sathia R., Babu K.G., Santhanam M., 2008. Durability Study of Low Calcium Fly Ash Geopolymer Concrete. (The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA).
- Sabbatini A., Vidal L., Pettinari C., Sobrados I., Rossignol S., 2017. Control of Shaping and Thermal Resistance of Metakaolin-Based Geopolymers. *Materials and Design*, 116: 374–385.
- Seçkin Ö.C., 2017. Structural Characteristics of Borax-Metakaolin and Boraxfly Ash Based Geopolymer Systems. *Chemical Engineering*. Middle East Technical University, Turkey.
- Tamburini S., Natali M., Garbin E., Panizza M., Favaro M., Valluzzi M.R., 2017. Geopolymer Matrix for Fibre Reinforced Composites Aimed at Strengthening Masonry Structures. *Construction and Building Materials*, 141: 542–552.
- Qi X., Peng X., Xu G., Huang T., He F., 2009. Development of Ultra-Thick and Geopolymeric Fire-Proofing Coating for Steel Structure. *New Build. Mater.*, 36 (12): 5–8.
- Wan Q., Rao F., Song S., García R.E., Estrella R.M., Patino C.L., Zhang Y., 2017. Geopolymerization Reaction, Microstructure and Simulation of Metakaolin-Based Geopolymers at Extended Si/Al Ratios. *Cement and Concrete Composites*, 79: 45–52.
- Wu B., Fang S., 2011. Experiment on Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Used for CFRP Strengthened Concrete Structure. *Earthq. Resis. Eng. Retrof.*, 33 (4): 32–41.
- Wu B., Duan J., Wen B., 2014. Preparations of New Fireproof Coating and Fire-Resistance Tests on Composite Slabs Filled with Demolished Concrete Blocks and Fresh Concrete. *China Civ. Eng. J.*, 37 (2): 82–92.

- Yaşın S., 2010. Alunitli Kaolinler ile Jeopolimer Sentezi. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi, Türkiye.
- Zhu G., Wang C., Gao L., 2013. Thermal Stability of High Strength Alkali Activated Geopolymers. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 41 (9): 1175–1179.
- Zhang Z., Yao X., Zhu H., 2010a. Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete 1. Basic properties. *Applied Clay Science*, 49: 1–6.
- Zhang Z., Yao X., Zhu H., 2010b. Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete 2. Microstructure and Anticorrosion Mechanism. *Applied Clay Science*, 49: 7–12.
- Zhang Z., Yao X., Zhu H., 2012. Potential Application of Geopolymers as Protection Coatings for Marine Concrete 3. Field Experiment. *Applied Clay Science*, 67–68: 57–60.
- Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H., 2015. *Cement Concrete Composites Mechanical, Thermal Insulation, Thermal Resistance and Acoustic Absorption Properties of Geopolymer Foam Concrete*. Elsevier.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı: Burcu KARTAL

Doğum Yeri: İstanbul

Doğum Tarihi: 19.04.1993

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi: Yıldız Teknik Üniversitesi Kimya Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Enerji Kaynakları ve Yönetimi Anabilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller: İngilizce, Almanca

BİLİMSEL FAALİYETLERİ

a) Yayınlar -SCI -Diğer

b) Bildiriler -Uluslararası -Ulusal

Kartal B., Cengiz U. "pH-Sensitive Liquid Marbles" 2nd Joint Science Congress of Materials and Polymers (ISCMP-II), ALBANIA, Nov. 9-12, 2018

Kartal B., Cengiz U., "Production of Polymeric Fiber Reinforced Geopolymer Composite Material" 3rd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT2018), TURKEY, Sep 20-22, 2018

Kartal B., Cengiz U., Mutlu, Ö. "Fabrication of Superhydrophobic Surface Using Fluoro-Styrene Copolymers by Spraying Method" 3rd International Conference on Organic Electronic Material Technologies (OEMT2018), TURKEY, Sep 20-22, 2018

c) Katıldığı Projeler

Kartal B., Cengiz U., "pH Duyarlı Sıvı Bilye Sentezi" Bağımsız Araştırma Projesi, 2018

Kartal B., Cengiz U., "Polimerik lif katkılı güçlendirilmiş jepolimer kompozit malzeme üretimi" Bağımsız Araştırma Projesi, 2018

İŞ DENEYİMİ

Abdi İbrahim İlaç San. – Stajyer Mühendis - 2015

Tusaş/Tai Türk Havacılık Ve Uzay San. – Stajyer Mühendis – 2015

İLETİŞİM

E-posta Adresi: burcukartal17@gmail.com

