T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI BAĞLAYICI ve LİF İÇEREN GEOPOLİMER BETONLARIN MEKANİK ve DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ömer Faruk KURANLI

DANIŞMAN
Prof. Dr. Mücteba UYSAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2020

Bu çalışma, 27.05.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İnşaat Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Mücteba UYSAL(Danışman)
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

Doç. Dr. Gebrail BEKDAŞ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Anıl NİŞ
İstanbul Gelişim Üniversitesi
Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, FBA-2019-3558 numaralı Yıldız Teknik Üniversitesi BAP projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım boyunca bana her zaman destek olan ve akademik çalışma geleneğini anlamam adına bana birçok fırsat tanıyan değerli hocam Sn. Prof. Dr. Mücteba UYSAL'a,

Çalışmalarımın tümünde daha iyi çalışabilmek ve çalışmamızın kapsamını genişletmek adına her türlü desteğini ve bilgisini esirgemeyen çok değerli hocam Sn. Doç. Dr. Orhan CANPOLAT'a

Bilgi tecrübe, ilgi ve yardımlarını her daim benimle paylaşan ve tez çalışmalarım boyunca beni her zaman motive eden çok değerli hocam Sn. Dr. Yurdakul AYGÖRMEZ'e

Değerli hocalarım Sn. Dr. Anıl NİŞ, Sn Dr. Mukhallad Al-MASHHADANI ve Furkan ŞAHİN'e

Tez çalışmam boyunca berber çalıştığım, birbirimizin nazını çektiğimiz değerli arkadaşım Mele Tidjani ABBAS'a

Bu uzun ve bazen sıkıntılı geçen yüksek lisans çalışma periyodumda, bana maddi ve manevi destek olan, hatta bazen bırakma noktasına geldiğimde beni azami motive eden, aziz dostum ve ağabeyim Yusuf Sabri ŞİMŞEK'e

Tez periyodu boyunca her türlü fedakarlıklarını esirgemeyen, manevi dualarını her daim arkamda hissettiğim çok kıymetli annem Kadriye, ablalarım Elif Zeynep ve Nurefşan KURANLI'ya

Çalışma sürecim boyunca, hayattar ve eşsiz manzaralı çalışma ortamı sunan, içerisinde çok değerli dostlarımın olduğu TÜRKİYE TASARIM VAKFI ailesine

Ayrıca sağladıkları imkan ve gösterdikleri çabalardan ötürü İSAM Kütüphanesine teşekkür ederim.

Nisan 2020 Ömer Faruk KURANLI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**
TABLO LİSTESİ ..... **xii**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xiv**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **3**
2.1 GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİNE GENEL BAKIŞ 3
2.1.1 Tanım 3
2.1.2 Geopolimerizasyon 3
2.2 GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİNİN TARİHİ 5
2.3 GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİNİN UYGULAMARI 7
2.4 GEOPOLİMER SENTEZİ 12
2.4.1 Alüminoslikat Kaynakları 13
2.4.1.1 Uçucu Kül *13*
2.4.1.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu *15*
2.4.1.3 Kırmızı Çamur *17*
2.4.1.4 İnce Agrega *17*
2.4.1.5 İri Agrega *18*
2.4.2 Alkali Aktivatörler 18
2.4.2.1 Alkali Hidroksit Solüsyonları *19*
2.4.2.2 Alkali Silikat Solüsyonları *19*
2.5 GEOPOLİMER BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİ 20
2.6 GEOPOLİMER BETONDA KÜRLEME İŞLEMİ 20
2.7 GEOPOLİMER BETONUN PRİZ SÜRESİ 20
2.8 GEOPOLİMER BETONDA HİSRATASYON ISISI 22
2.9 GEOPOLİMER BETONDA BASINÇ DAYANIMI 23
2.9.1 Cüruf Esaslı Geopolimer Betonda Basınç Dayanımı 27

2.9.2 Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonun Basınç Dayanımı 27
2.9.3 Cüruf-Uçucu Kül Karışımlı Geopolimer Betonda Basınç Dayanımı 30
2.10 GEOPOLİMER BETONUN YARMADA ÇEKME DAYANIMI 31
2.10.1 Cüruf Esaslı Geopolimer Betonun Yarmada Çekme Dayanımı 32
2.10.2 Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonda Yarmada Çekme Dayanımı..... 33
2.10.3 Cüruf-Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonda Yarmada Çekme Dayanımı..... 33
2.11 GEOPOLİMER BETONDA EĞİLME DAYANIMI..... 35
2.12 GEOPOLİMER BETONDA YÜKSEK SICAKLIK..... 38
2.13 LİFLİ GEOPOLİMER BETON..... 40
2.13.1 Lifli Geopolimerlerde Basınç Dayanımı..... 40
2.13.2 Lifli Geopolimerlerde Yarmada Çekme Dayanımı..... 42
2.13.3 Lifli Geopolimerlerde Eğilme Dayanımı 43
2.13.4 Lifli Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Etkisi..... 46
3. MALZEME VE YÖNTEM 48
3.1 GİRİŞ..... 48
3.2 MALZEMELER..... 48
3.2.1 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu..... 48
3.2.2 Uçucu Kül 48
3.2.3 Agrega..... 49
3.2.4 Kimyasal Aktivatörler..... 49
3.2.5 Polipropilen (PP) Lif..... 50
3.2.6 Poliamid (PA) Lif..... 51
3.2.7 Çelik (ST) Lif..... 52
3.2.8 Akışkanlaştırıcı Katkı..... 53
3.3 BETON KARIŞIMLARI VE ÜRETİMLERİ 53
3.3.1 Karışım Oranları..... 54
3.3.2 Alkali Aktivatörlerin Hazırlanması..... 55
3.3.3 Kalıplar..... 55
3.3.4 Geopolimer Betonun Üretilmesi ve Dökümü 56
3.3.5 Kürleme..... 56
3.4 DENEY YÖNTEMLERİ..... 57
3.4.1 Basınç Dayanımı Deneyi..... 57
3.4.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi 58
3.4.3 Eğilme Dayanımı Deneyi..... 59

3.4.3.1 Eğilme Dayanımı-Deplasman Kontrolü *59*
3.4.4 Birim Ağırlık Boşluk Oranı ve Su Emme Deneyleri 60
3.4.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi 61
3.4.6 Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi 62
4. BULGULAR 64
4.1 FİZİKSEL ÖZELLİKLER 64
4.1.1 Birim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Sonuçları 64
4.2 BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI 67
4.3 ULTRASES GEÇİŞ HIZI DENEYLERİ 69
4.4 YARMADA ÇEKME DAYANIMI SONUÇLARI 70
4.4.1 Basınç Dayanımı-Yarmada Çekme Dayanımı İlişkisi 72
4.5 EĞİLME PERFORMANSI 75
4.5.1 Eğilme Dayanımı Sonuçları 76
4.5.2 Eğilme Dayanımı-Deplasman Grafikleri 78
4.6 YÜKSEK SICAKLIK DENEYLERİ SONUÇLARI 82
4.6.1 Basınç Dayanımı Sonuçları 82
4.6.2 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları 89
4.6.3 Ağırlık Kaybı Sonuçları 92
5. TARTIŞMA VE SONUÇ 94
5.1 GENEL 94
5.2 SONUÇLAR 94
Kaynaklar 98
ÖZGEÇMİŞ 108

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Çözünmüş alüminosilikatların yeniden örgütlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşması ve jel formasyonu başlangıcı, (c) polimerizasyon (Sing & Middendorf, 2020) 4

Şekil 2.2: Geopolimerizasyon süreci (Singh, 2018) 4

Şekil 2.3: Geopolimerizasyon sürecinin bir diğer gösterimi (Singh, 2018). 5

Şekil 2.4: Termal korumalı geopolimer-karbon kompozit tasarımı Benetton B194 modeli üzerinde 1994 yılında uygulanmıştır (Davidovits, 2006). 9

Şekil 2.5: AV8B-Harrier uçakları operasyonel dikey iniş ve kalkışlarında yüzeyde ciddi sıcaklık meydana getirmektedir (Vickers, et al., 2015). 10

Şekil 2.6: Geopolimer prosesi (Sing & Middendorf, 2020). 13

Şekil 2.7: Birleşik Devletler'de uçucu külün uygulama alanlarının yüzdelik gösterimi (Amran, et al., 2020). 15

Şekil 2.8: Geopolimer betonda NaOH molaritesine bağlı olarak priz süresi (Umniati, et al., 2017, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi). 21

Şekil 2.9: Geopolimer betonda cüruf içeriğinin priz süresine etkisi (Pilehvar, et al., 2018, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi) 22

Şekil 2.10: Sabit NaOH/uçucu kül oranında kum/uçucu kül oranının geopolimer betonda etkisi (Shevkovtsova, et al.,2014, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi). 23

Şekil 2.11: Na_2SiO_3/NaOH oranının basınç dayanımına etkisi (Joseph & Mathew, 2012). 25

Şekil 2.12: NaOH molaritesinin basınç dayanımına etkisi (Joseph & Mathew, 2012) 25

Şekil 2.13: Na_2SiO_3/Uçucu Kül oranlarının basınç dayanımlarına etkisi (Kotwal, et al., 2014, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi) 26

Şekil 2.14: NaOH/Uçucu kül oranının basınç dayanımına etkisi (Kotwal, et al., 2014, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi) 26

Şekil 2.15: Su/GP Katısı oranının uçucu kül esaslı geopolimer beton basınç dayanımına etkisi (Ding, et al., 2016). 28

Şekil 2.16: Uçucu kül esaslı geopolimer betonda kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Ding, et al., 2016). 29

Şekil 2.17: Farklı cüruf/uçucu kül oranlarında geopolimer betonun basınç dayanımı (S10 %10 oranında S15 ise %15 oranında cüruf katılımını temsil etmektedir.) (Lee & Lee, 2013) 30

Şekil 2.18: Uçucu kül-cüruf kullanım oranlarına göre basınç değerleri. (S20 %20, S25 %25 ve S30 %30 cüruf katılımı temsil etmektedir (Lee & Lee, 2013)..... 31

Şekil 2.19: Cüruf esaslı geopolimer betona ait yapılmış farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisi ve bu ilişkide standartların uyumluluğu (Yang, et al., 2012, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi). 32

Şekil 2.20: Uçucu kül esaslı geopolimer betona ait yapılmş farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanmı ilişkisi ve bu ilişkide standartların uyumluluğu. (Sarker, et al., 2013, Ryu, et al., 2013, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi)..... 33

Şekil 2.21: Uçucu kül esaslı geopolimer betona ait yapılmış farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanmı ilişkisi ve bu ilişkide standartların denklemleri ile araştırmacı denklemlerinin sonuçlar ile uyumluluğu. (Sofi, et al., 2007, Lee & Lee, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi)..... 34

Şekil 2.22: Özet uçucu kül-cüruf esaslı geopolimer betona ait yapılmış farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanmı ilişkisi (Ding, et al., 2016)..... 35

Şekil 2.23: Uçucu kül esaslı geopolimer beton (şekilde GPC) ve geleneksel Portland çimentolu betonun (şekilde OPC) yük-deplasman eğrisi altındaki davranış farkları (Sarker, et al., 2013). 36

Şekil 2.24: Uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimer betonun uzun süreli eğilme dayanımlarının değişimi. (Arie, et al., 2017) 37

Şekil 2.25: Uçucu kül-cüruf bağlayıcı oranlarına göre eğilme dayanımındaki değişim (Manjunatha, et al,, 2014) 38

Şekil 2.26: Geopolimer ve OPC ile üretilmiş betonun artırılmış yüksek sıcaklıktaki basınç ve çekme dayanımlar (Fan, et al., 2018, Hassan, et al., 2019'da bahsedildiği gibi) 39

Şekil 2.27: Lif çeşitlerine ve oranlarına göre geopolimer harçların basınç dayanımı (Al-Masshadani, et al., 2018)..... 41

Şekil 2.28: Çelik (MSF) ve polipropilen (PPF) lifli geopolimer kompozitte lif oranına basınç dayanımı değişimi (Ranjbar, et al., 2016). 41

Şekil 2.29: Lif tipi ve oranlarına göre eğilme dayanımındaki değişim (Al- Masshadani, et al., 2018)..... 44

Şekil 2.30: Uçucu kül esaslı geopolimer betonda 7 ve 56 günde çelik lif kullanımındaki eğilme dayanımı değişimi (Ranjbar, et al., 2016) 44

Şekil 2.31: Uçucu kül esaslı geopolimer betonda 7 ve 56 günde polipropilen lif kullanımındaki eğilme dayanımı değişimi (Ranjbar, et al., 2016) 45

Şekil 2.32: Polipropilen (PP) lif oranına göre eğilme dayanımı değişimi (Guo & Pan, 2018) 46

Şekil 2.33: Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerin (Cs) kontrol numunelerine (Cr) oranının sıcaklığa bağlı değişimi ve PVA lif oranlarına göre davranışı (Tanyıldız & Yonar,2016). 47

Şekil 3.1: Çalışmada kullanılan polipropilen lifler. 51

Şekil 3.2: Çalışmada kullanılan poliamid lifler. 52

Şekil 3.3: Çalışmada kullanılan çelik lifler. 53

Şekil 3.4: Oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılan geopolimer beton numuneleri. 57

Şekil 3.5: Basınç dayanmı testi. 58

Şekil 3.6: Eğilme gerilmesi deplasman kontrolü deneyi. 60

Şekil 3.7: Etüv kurusu ağırlığı eldesi için numunelerin etüve yerleştirilmesi. 61

Şekil 3.8: Doygun kuru yüzey ağırlığı eldesi için numunelerin suya yerleştirilmesi. 61

Şekil 3.9: Ultrases geçiş hızı deneyi. 62

Şekil 3.10: Yüksek sıcaklık öncesi numunelerin fırına yerleştirilmesi ve deney sonu 63

Şekil 4.1: Geopolimer numunelerin su emme-boşluk oranı ilişkisi. 66

Şekil 4.2: Birim ağırlık, porozite ve su emme sonuçları. 66

Şekil 4.3: Basınç Dayanımı sonuçları. 68

Şekil 4.4: Ultrases geçiş hızları sonuçları. 70

Şekil 4.5: Yarmada çekme dayanımı sonuçları. 72

Şekil 4.6: 90 günlük eğilme dayanımları sonuçları. 77

Şekil 4.7: Eğilme dayanımı-deplasman grafiği 79

Şekil 4.8: Eğilme dayanımı-deplasman grafiği (daraltılmış yatay eksen). 80

Şekil 4.9: 50S50FA08PP serisinin yük deplasman testi sonrası görüntüsü. 81

Şekil 4.10: 100S08ST serisinin yük deplasman testi sonrası görüntüsü. 81

Şekil 4.11: 90 gün ve yüksek sıcaklık dayanımları. 85

Şekil 4.12: Yüksek sıcaklıkta göreceli basınç dayanımları. 85

Şekil 4.13: 900 derece sıcaklıkta 100S08PP serisi numunesi. 88

Şekil 4.14: 600 derece sıcaklıkta 50S50FA04PA serisi. 88

Şekil 4.15: 300 derece sıcaklıkta 100S (solda) ve 50S50FA04ST (sağda). 89

Şekil 4.16: Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı sonuçları. 90

Şekil 4.17: Yüksek sıcaklık deneyi sonrası serilerde ağırlık kaybı sonuçları. 93

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1: Geopolimer teknolojisi için yüksek performans uygulama alanları (Vickers, et al., 2015). 11

Tablo 2.2: Alkali aktivatör ve alüminoslikat kaynakları (Sing & Middendorf, 2020), (Amran, et al., 2020). 12

Tablo 2.3: Uçucu külün (düşük kalsiyumlu) ve portland çimentosunun genel bileşim tablosu (U.S Departmant of Transportation, 2017). 15

Tablo 2.4: Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (Amran, et al., 2020). 16

Tablo 3.1: Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi. 48

Tablo 3.2: Uçucu külün kimyasal bileşimi. 49

Tablo 3.3: Sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özellikleri. 50

Tablo 3.4: Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri. 50

Tablo 3.5: Polipropilen liflerin teknik özellikleri (Kordsa, 2020) 50

Tablo 3.6: Poliamid liflerin teknik özellikleri (Kordsa, 2020) 51

Tablo 3.7: Çelik liflere ait teknik özelikler. 52

Tablo 3.8: Akışkanlarştırıcı katkıya dair teknik özellikler (BASF, 2020) 53

Tablo 3.9: Beton karışım kodları. 54

Tablo 3.10: %100 Cüruf bağlayıcı ile üretilen numunelerin karışım oranı. 54

Tablo 3.11: %50+%50 Cüruf bağlayıcı ile üretilen numunelerin karışım oranı. 55

Tablo 3.12: Liflerin 1 m3 karışımda kullanım oranları. 55

Tablo 4.1: Geopolimer beton numunelerinin birim ağırlık, porozite ve su emme sonuçları. 65

Tablo 4.2: Basınç dayanımı sonuçları. 68

Tablo 4.3: Ultrases geçiş hızı sonuçları. 69

Tablo 4.4: Yardama çekme dayanımı sonuçları. 71

Tablo 4.5: ACI 318 koduna göre yarmada çekme dayanımları. 73

Tablo 4.6: Sofi ve diğ. yaklaşımı ile basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisi. 74

Tablo 4.7: Lee ve Lee yaklaşımı ile basınç dayanımı yarmada çekme dayanımı ilişkisi. 75

Tablo 4.8: 90 günlük eğilme dayanımları. 77

Tablo 4.9: Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımları ve basınç dayanımı değişimleri. 84

Tablo 4.10: Yüksek sıcaklıkta göreceli basınç dayanımları. 86

Tablo 4.11: Serilerin kontrol serisine nazaran her bir yüksek sıcaklık sınıfındaki dayanım değişimleri. 87

Tablo 4.12: Yüksek sıcaklıkta ultrases geçiş hızı değerleri. 90

Tablo 4.13: Yüksek sıcaklıklarda 90 gün ultrases geçiş hızına nazaran ultrases geçiş hızı kayıpları (%)..... 91

Tablo 4.14: Yüksek sıcaklıkta ağırlık kaybı..... 92

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
NaOH	: Sodyum Hidroksit
SiO_4^{4-}	: Silikat
AlO_4^{5-}	: Alüminat
Na_2SiO_3	: Sodyum Silikat
KOH	: Potasyum Hidroksit
$Ca(OH)_2$	: Kalsiyum Hidroksit
SiO_2	: Silikon Dioksit
Al_2O_3	: Alüminyum Dioksit
Fe_2O_3	: Demir Oksit
CaO	: Kalsiyum Oksit
MgO	: Magnezyum Oksit
SO_3	: Kükürt Trioksit
Na_2CO_3	: Sodyum Karbonat
f_{ct}	: Beton çekme dayanımı
f'_c	: Beton basınç dayanımı
f_{ck}	: Beton silindirik karakteristik basınç dayanımı
f_{cm}	: Ortalama basınç dayanımı
f_{ctm}	: Ortalama çekme dayanımı
$f_{ct.sp}$	: Yarmada çekme dayanımı
C_s	: Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numuneler
C_r	: Kontrol numuneleri

Kısaltmalar	Açıklama
PP	: Polipropilen Lif
ST	: Çelik Lif
PA	: Poliamid Lif
GPÇ	: Geleneksel Portland Çimentosu
PVA	: Polivinil Alkol Lif

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI BAĞLAYICI ve LİF İÇEREN GEOPOLİMER BETONLARIN MEKANİK ve DURABİLİTE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Ömer Faruk KURANLI

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Mücteba UYSAL

Beton düşük maliyeti, kolay şekil alabilmesi, yüksek dayanımı, durabilitesi ve kolay tedarik edilebilmesi gibi birçok yönüyle inşaat malzemeleri arasında kullanımı en yaygın malzeme konumundadır. Bu artı özellikleriyle birlikte beton büyük bir tüketim alanı oluşturmuş ve sudan sonra en çok tüketilen ikinci madde konumunda olmuştur. Beton malzemesinin bütün bileşenleri arasında agregaları birbirine bağlayan Portland Çimentosu ana bileşim maddesi konumundadır. Ancak Geleneksel Portland Çimentosu'nun (GPÇ) üretilmesi atmosfere yüksek oranda sera gazı salınımına yol açtığı için büyük çevresel etkiye sahiptir. Portland çimentosu üretimi ya da eldesi esnasında yüksek miktarda yakıt kullanımını yani yoğun enerjili işlemleri gerekmektedir. Bu durum yüksek miktarda CO_2 salınımına sebep olmaktadır. Çevreci olmayan bu gerçekler beton sektöründe yeni sürdürülebilir, daha az portland çimentosu katkılı ve çimento bütünleyici malzemelerin (SCM) kullanımına ve arayışına sebep olmuştur.

Geopolimer teknolojisi ile üretilmiş beton bağlayıcı olarak çimentodan tamamen farklı bağlayıcılar kullanarak beton içerisinde çimentosuz bir malzeme olanağı sunarak çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 salınımını azaltmaktadır ve çimento bağlayıcılı betona alternatif bir seçenek olmaktadır.

Geopolimerler jeolojik orijinallikte olan metakaolin gibi yada endüstriyel atık olarak uçucu kül, cüruf, taban külü zengin slika ve alümin içeren malzemelerin alkalilerle (Sodyum yada Potasyum bazlı) sentezlenmesi ile elde edilmektedir. Geopolimerler bu yönüyle uçucu kül,

cüruf gibi atık malzeme kullanarak hem geri dönüşüme hem de sera gazı salınımının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Geopolimer beton üretiminin %60 oranında daha az enerji gerektirdiği ve Portland Çimentosu ile üretilmiş betona kıyasla %80 oranında daha az CO_2 salınımın gerçekleştiği tespit edilmiştir

Bu çalışmada geopolimer teknolojisi ile üretilen geopolimer betonların farklı bağlayıcı, farklı lifler ve farklı lif oranlarında mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. Geopolimer betonların üretiminde ana bağlayıcı olarak cüruf ve uçucu kül kullanılmıştır. Lif cinsi olarak polipropilen, çelik ve poliamid lifler kullanılmıştır. Çalışmanın sonunda mekanik ve durabilite özelliklerine dair güçlü sonuçlar elde edilmiştir.

Nisan 2020, 126 sayfa.

Anahtar kelimeler: Geopolimer, Geopolimer Beton, Cüruf, Uçucu Kül, Alkali Aktivasyon, Lifli Geopolimer Beton

SUMMARY

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF GEOPOLYMER CONCRETE CONTAINING DIFFERENT BINDERS AND FIBERS

Ömer Faruk KURANLI

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Mucteba UYSAL

Concrete is the most common material among construction materials with its low cost, easy form, high strength, durability and easy supply. With these plus features, concrete created a large consumption area and became the second most consumed substance after water. Portland cement, which connects aggregates among all components of concrete material, is the main ingredient. However, the production of Traditional Portland Cement has a high environmental impact as it causes high greenhouse gas emissions to the atmosphere. During Portland cement production, high amount of fuel usage and intensive energy processes are required. This situation causes a high CO_2 emission. These non-environmental facts have led to the search and use of new sustainable, less portland cement added and cement complementary materials in the concrete industry.

Concrete produced with geopolymer technology provides a cement-free material in concrete by using different binders from cement. Thus, CO_2 emissions from cement production are reduced and an alternative option to cement-bonded concrete is created.

Geopolymers are produced by synthesizing materials such as metacaolin with geological origin or as industrial waste with alkali (Sodium or Potassium based) containing fly ash, slag, base ash rich in silica and alumina. With this aspect, geopolymers contribute to both recycling and reduction of greenhouse gas emission by using waste material such as fly ash and slag. Ithas

been determined that geopolymer concrete production requires 60% less energy and 80% less CO2 emission occurs compared to concrete produced with Portland Cement.

In this study, the mechanical and durability properties of geopolymer concrete produced with geopolymer technology in different binders, different fibers and different fiber ratios were investigated. Slag and fly ash are used as the main binder in the production of geopolymer concretes. Polypropylene, steel and polyamide fibers are used as fiber types. At the end of the study, strong results were obtained regarding the mechanical and durability properties.

April 2020, 126 pages.

Keywords: Geopolymers, Geopolymer Concrete, Slag, Fly Ash, Alkali Activation, Fiber Geopolymer Concrete

1. GİRİŞ

İnsanoğlunun geçmişten bugüne bilimsel çalışmalar vasıtasıyla biriken bilgisi, bilimin dinamizmi ve ihtiyaçların getirdiği teşvik sayesinde elde ettiği teknolojik ilerlemeler olduğu yerde kalmamış ve sürekli gelişmiştir. Öncesinde çağlar boyunca genel olarak yapılarda kireç ve puzolonik bağlayıcılar kullanılırken, 1800'lü yıllarda betonun çağdaş kronolojisi başlamış olup 1824 yılında İngiliz araştırmacı Josep Aspdin'in Portland Çimentosu'nu icadı ile betonun kullanımının önü büyük ölçüde açılmıştır. İlk hazır beton üretimine 1903 yılında Almanya'da başlanmıştır. Hemen ardındaki yıllarda dünya üzerindeki birçok ülke tarafından hazır beton kullanımına başlanılmış ve bugün halen devam etmektedir (Baradan, 2015). Beton düşük maliyeti, kolay şekil alabilmesi, yüksek dayanımı, durabilitesi ve kolay tedarik edilebilmesi gibi birçok yönüyle inşaat malzemeleri arasında kullanımı en yaygın malzeme konumundadır (Shaikh, 2016). Bu artı özellikleriyle birlikte beton büyük bir tüketim alanı oluşturmuş ve sudan sonra en çok tüketilen ikinci madde konumunda olmuştur (Davidovits,2008). Beton malzemesinin bütün bileşenleri arasında agregaları birbirine bağlayan Portland Çimentosu ana bileşim maddesi konumundadır (Shaikh, 2016). Ancak Geleneksel Portland Çimentosu'nun (GPÇ) üretilmesi atmosfere yüksek oranda sera gazı salınımına yol açtığı için büyük çevresel etkiye sahiptir (Hardjito, et al., 2004). Portland çimentosu üretimi yada eldesi esnasında yüksek miktarda yakıt kullanımını yani yoğun enerjili işlemleri gerekmektedir. Bu durum yüksek miktarda CO_2 salınımına sebep olmaktadır. Malhotra ve Mehta (2002) çimento üretiminin küresel ısınmanın ana sebebi olan CO_2 salınımda %5 oranında etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ali ve diğ. (2011) çimento endüstirisinin bu orana katkısını %7'i kadar olduğunu vurgulamaktadırlar. Malhotra ve Mehta (2002) bir çalışmasında bir ton çimento üretiminin atmosfere yaklaşık olarak bir ton salınım yaptığını ifade etmişlerdir. Çimentonun doğaya ve çevreye negatif etkisi bugün beton endüstrisini en zorlayan sorunlardan biri haline getirmiştir. Günümüzde artan nüfus ve şehirleşme sayesinde inşaat sektöründe betonun kullanımın artışı kaçınılmaz olarak değerlendirilmektedir. Bu gerçek beton sektöründe yeni sürdürülebilir, daha az Portland Çimentosu katkılı ve çimento bütünleyici malzemelerin (SCM) kullanımına ve arayışına sebep olmuştur (Shaikh, 2016). McCaffrey (2002) çimento endüstrisindeki CO_2 salınımının beton içerisindeki çimentonun tamamen değiştirilmesi, yerine başka bir malzeme kullanılması ya da azaltılmasıyla kontrol altına alınabileceğini belirtmiştir. Sonuç olarak

betonda çimentoya alternatif bir malzeme kullanılması hususu ciddi bir ihtiyaç haline gelmiştir. Geopolimer terimi ilk olarak Joseph Davidovits tarafından 1970'li yılların sonlarına doğru tanıtılmıştır. Geopolimer sulu çözelti içerisinde SiO_4 ve AlO_4'ün tetrahedral polikondensasyonu ile sentezlenen inorganik bir polimer sınıfıdır (Davidovits, 2011) Davidovits'e göre geopolimerler çok sayıda amorf ile yarı kristalin faz içeren polimerik üç boyutlu slikon-oksijen-alüminyum materyalidir (Davidovits,2011). Geopolimer teknolojisi ile üretilmiş beton bağlayıcı olarak çimentodan tamamen farklı bağlayıcılar kullanarak beton içerisinde çimentosuz bir malzeme olanağı sunarak çimento üretiminden kaynaklanan CO_2 salınımını azaltmaktadır ve çimento bağlayıcılı betona alternatif bir seçenek olmaktadır. (Davidovits, 2011). Geopolimerler jeolojik orijinallikte olan metakaolin gibi yada endüstriyel atık olarak uçucu kül, cüruf, taban külü zengin slika ve alümin içeren malzemelerin alkalilerle (Sodyum yada Potasyum bazlı) sentezlenmesi ile elde edilmektedir. Geopolimerler bu yönüyle uçucu kül, cüruf gibi atık malzeme kullanarak hem geri dönüşüme hem de sera gazı salınımının azaltılmasına katkı sağlamaktadır. Yapılan bir çalışmada uçucu kül esaslı geopolimer üretiminin %60 oranında daha az enerji gerektirdiği ve Portland Çimentosu ile üretilmiş betona kıyasla %80 oranında daha az CO_2 salınımın gerçekleştiği tespit edilmiştir (Duxson, et al., 2007) (Chindaprasirt, et al., 2007). Bugüne kadar geopolimer beton alanında birçok çalışma yapılmıştır. Songpiriyakij ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmalarda geopolimerlerin aderans kuvvetinin yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Temuujin ve diğ. (2011) geopolimerlerin asid direncinin, Zhoa ve diğ. (2011) ise yangın dirençlerinin iyi olduğunu göstermişlerdir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1 GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİNE GENEL BAKIŞ

2.1.1 Tanım

Geopolimerler inorganik bağlayıcı sınıfındadırlar. Geopolimerler alüminoslikat kaynağının (uçucu kül vb.) hidroksit, silikat, alüminat veya karbonat içeren alkali aktivatörler ile ortam ya da yüksek sıcaklıklarda (90 C° gibi) karışıtırılması ile sentezlenmektedir. Reaksiyon ürününde esas olarak 3D yapı oluşturan, birbirine bağlı SiO_4^{4-} ve AlO_4^{5-} tetrahedrallerinden oluşan alüminoslikat fazıdır (Weerdt, 2011).

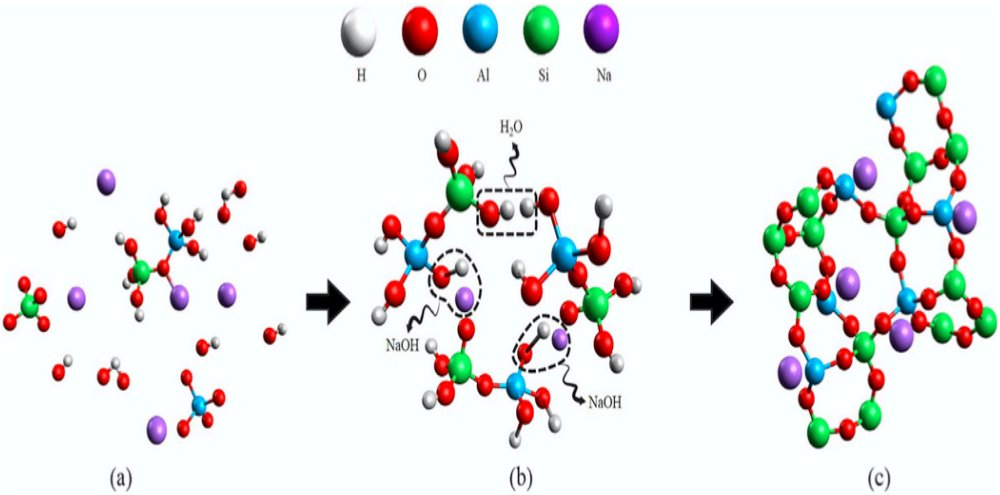
2.1.2 Geopolimerizasyon

Joseph Davidovits 1978 yılında ilk defa "geopolimer" terimini kullanarak literatürde yeni bir terim kazandırmıştır. Geopolimerler alüminosilikat içeren bazı atık malzemeler ile (uçucu kül, metakaolin gibi) alkalilerin (OH içerikli) polikondensasyon reaksiyonu sonucu oluşturulan inorganik bir polimerdir. Geopolimerler amorf yapıdan SiO_4^{4-} ve AlO_4^{5-} tetrahedral kombinasyonu ile oluşturulan yarı kristalin alüminosilikat çerçeve yapısıdır. Geopolimerizasyonda kimyasal yapı tetrahedral tabakadaki alüminyumun silisyuma ikamesi ile ve Na^+ iyonlarını varlığı ile elektriksel nötrlüğünü korumaktadır. Geopolimerizasyonun priz alma ve sertleşme mekanizması halen tamamıyla anlaşılmış değildir (Sing & Middendorf, 2020).

Geopolimerizasyon alüminosilikat içeren hammaddelerin (uçucu kül gibi) alkali çözeltiler içerisinde çözündürülmesi ve alüminat ve silikat monomerlerinin oluşumuna yol açmaktadır. Bu monomerler daha sonrasında oligomerlere (polimerlere göre çok daha az monomer içeren küçük polimer grubu) ve daha sonrada geopolimerlere dönüşmektedir (Sing & Middendorf, 2020).

Geopolimerizasyon işlemi çözünme, yeniden düzenlenme ya da organize olma, yoğunlaşma ve polimerizasyon süreçlerini içermektedir. Çözünme ve yeniden örgütlenme birçok oligomer formu oluşturmaktadır. Oligomerler bağlanarak büyük polimer zincirlerini oluştururlar. Oligomerler bağlandığında OH grupları ile bir oksijen atomunu paylaşarak suyu serbest

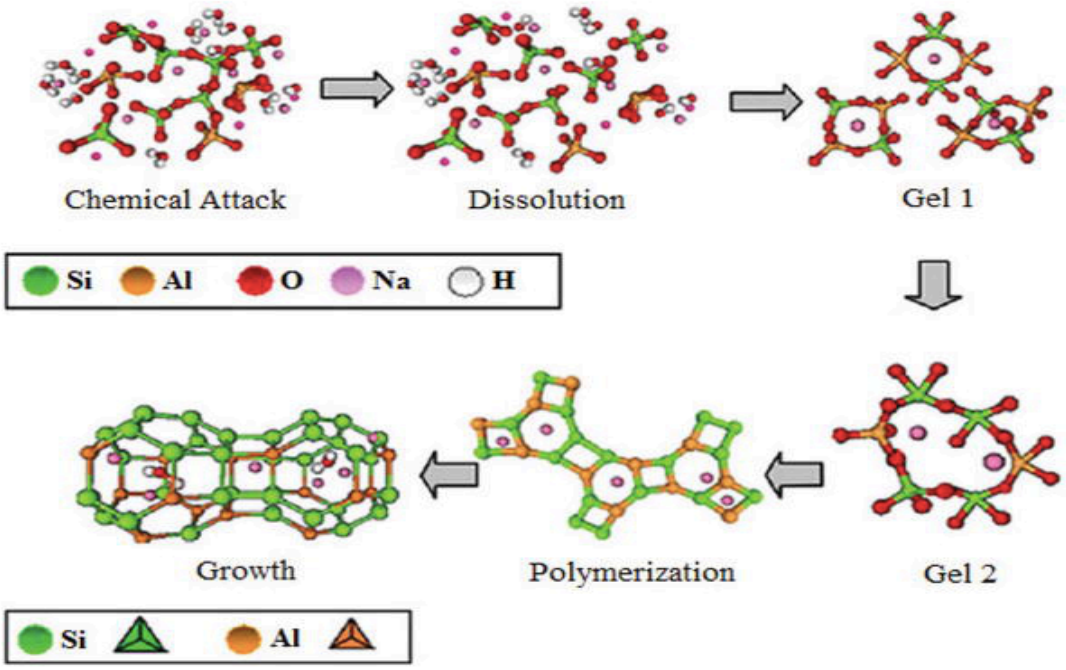
bırakmaktadırlar. Geopolimerizayon şeması Şekil 2.1, 2.2 ve 2.3'te gösterilmektedir (Sing & Middendorf, 2020).



Şekil 2.1: Çözünmüş alüminosilikatların yeniden örgütlenmesi, (b) oligomer yoğunlaşması ve jel formasyonu başlangıcı, (c) polimerizasyon (Sing & Middendorf, 2020)



Şekil 2.2: Geopolimerizasyon süreci (Singh, 2018)



Şekil 2.3: Geopolimerizasyon sürecinin bir diğer gösterimi (Singh, 2018).

2.2 GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİNİN TARİHİ

'Geopolimer' terimi 1970'li yıllarda Fransız bilim insanı ve mühendis Prof. Joseph Davidovits tarafından literatüre kazandırılmıştır. Katı materyal sınıfına uygulanarak alüminoslikat ve alkali çözeltilerinin reaksiyonu ile sentezlenmiştir. Geopolimer teknolojisi aslen Avrupa'da ortaya çıkan yangın serisini takiben organik termoset polimerlere karşı yangına dayanlıklı bir alternatif malzeme üretmek için geliştirilmiştir. Ürün bazlı olarak ilk çalışma ve örnekler yolcu gemilerinde yangın koruması için kaplamalar, karbon fiber kompozitler için yüksek sıcaklığa dayanıklı reçine, ahşap yapılarda termal koruma, ısıya dayanıklı yapışkan, ısıya dayanıklı refraktör olarak ortaya çıkmaktadır. Ancak geopolimer teknolojisindeki ve bağlayıcısındaki birincil uygulamalar zamanla inşaat sektörü ile yer değiştirip geopolimer teknolojisinin en öncelikli kullanım disiplini haline gelmiştir. Bu durumun genel sebebinin ilk başlarda güvenilir, yüksek performanslı geopolimerlerin kömür yakımından elde edilen uçucu külün alkali aktivasyonu üretilebileceğinin gözlemlenmesi olarak ifade edilmektedir (Provis & van Deventer, 2009).

Katıların alkali aktivasyonu ile elde edilen inşaat malzemelerinin sentezi, portland çimentolu olmayan uygulamaların öncüsü olan ve genel olarak yüksek kalsiyumlu metalürjik bir bağlayıcı niteliğindeki cürüf ile ilk olarak 1940 yılında Purdon tarafından ispat edilmiştir. Cüruf kullanımı ile icra edilen alkali aktivasyondaki temel ayrımın üretilen kalsiyum-slikat hidrat jellerinin olduğu ifade edilmektedir. Alkali aktivasyonla üretilen genel olarak tek boyutlu zincirler sunarken, geopolimer jeller üç boyutlu alkali aluminoslikat iskelet yapısı sunmaktadır. Geopolimer teknolojisinde kalsiyumun oynadığı rol araştırma altında olup önem ifade etmektedir (Provis & van Deventer, 2009). Alkali-aktive cüruf çimentosu 1950'li yılların başlarında geniş ölçekli olarak inşaat sektöründe kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulamanın alışılagelmiş gerekliliği %1.5 NaCl ve %1.5 Sodyum Hidroksit'in (NaOH) fırın cürufuna eklenmesi olarak ortaya çıkmaktaydı (Davidovits, 2011).

1957 yılında Sovyet Sosyalist Cumhuriyetler Birliği İnşaat Mühendisliği Kiev Enstitüsünde çalışan Victor Glukhovsky adında bir bilim insanı alkali-aktive edilmiş cüruf bağlayıcısındaki problemler üzerine çalışmalar yapmıştır. Glukhovsky bu araştırmalarıyla 1960'lı ve 1970'li yıllarda hem kalsiyum-slikat hidrat hem de kalsiyum ve sodyum alümino-slikat hidrat (zeolit)'ın katılaşma ürünü olduğunu tespit ederek literatüre büyük bir katkı yapmıştır. Glukhovsky aynı zamanda kaya ve kil minerallerinin zeolit (alümino-slikat hidrat) formunu almak için alkali işlemleri esnasında reaksiyona girdiğini belirtmiştir. Glukhovsky bu teknoloji ile üretilen betonları 'toprak slikat beton' yada 'zemin slikat beton' bağlayıcıları ise 'zemin, toprak çimentosu' olarak adlandırmıştır (Davidovits, 2011).

1949 yılında Borchert ve Keidel 100 C° 'de konsantre edilmiş NaOH solüsyonu içerisinde kaolinit mineralini tepkimeye sokarak hidrosodalit (Na-PS) hazırlamışlardır (Davidovits, 2011).

1963 yılında Howell kaolinit minerali yerine kalsine edilmiş kaolinit, yani metakaolin kullanarak hidrosodalit formasyonu eldesininin önüne geçmiş ve A tipi Zeolit elde etmiştir (Davidovits, 2011).

1972 yılında Jean Paul Latapie ve Michel Davidovics adlarında bilim insanlarının oluşturduğu bir seramikçi grubu su geçirmez seramiklerin karolarının 450 C°' den daha düşük sıcaklıklarda, başka bir deyişle pişirme olmadan üretilebileceğini doğrulamışlardır (Davidovits, 2011).

Paris Doğa Tarihi Müzesi çalışanları Besson, Caillere ve Henin 1969 yılında 100 C°'de ve konsantre edilmiş NaOH solüsyonunda çeşitli phyllosilikat'lardan (kaolinit, halosit vb.) hidrosodalit eldesi için çalışmalar yapmışlardır (Davidovits, 2011).

1972 yılında Joseph Davidovits çalıştığı CORDI laboratuvarında 1970-72 yılları arasında Fransa'da gerçekleşen katostrofik yangınlarından dolayı organik polimer kimyası üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir. Yaşadığı zamanda jeokimyanın mineral bağlayıcı ve mineral polimer üretme araştırmalarından çok uzakta olduğunu açık bir şekilde gören Davidovits amorf veya yarı kristal üç boyutlu sliko-alüminat mataryeller geliştirerek 'geopolimer' (geosentez sonucu gerçekleşen mineral polimerler) diye tabir ettiği yeni bir malzeme geliştirmiştir (Davidovits, 2011).

Davidovits ilerleyen yıllarda patent literatürüne alümünoslikat geopolimerler ile ilgili çalışmalar yayınlamıştır. Geopolimer çalışmalarına dair en değerli ve özet mahiyetindeki çalışma Davidovits ve Orlinski tarafından 1988 düzenlenen geopolimer konferası ve 1991 yılında Davidovits tarafından yayınlanan bir inceleme makalesi olarak gösterilmektedir. Bu çalışmadan kısa bir süre sonra Palomo ve Glasser 1992 yılında metakaolin esaslı geopolimerler hakkında detaylı bir bilimsel çalışma yayınlamışlardır. Rahier ve diğerleri de bilahare 1996 yılında üç parçadan oluşan metakaolin esaslı geopolimerler hakkında yayın yapmışlarıdır. Bu çalışmalar birbirini takip eden on yıllık süreçlerde temel olarak metakaolin esaslı geopolimerleri daha geniş ve derin anlamak adına faklı gruplar tarafından İspanya'da Palomo (1999), Granizo ve Blanco (1998), Yeni Zelanda'da Barbosa (2000), MacKenzie (2003), Almanya'da Kaps ve Buchwald (2002,2006) ve Avustralya'da Yip ve Van Deventer (2003), Duxton (2005) gibi birçok araştırmacı tarafından yürütülmüştür. 1999 ve 2005 yılında Davidovits tarafından düzenlenen geopolimer konferansları geopolimerdeki hem teknik gelişmeleri hem de küresel büyümeler hakkında değerli bilgiler elde edinimini sağlamıştır (Provis & van Deventer, 2009).

Geopolimer teknolojisine yönelik hem endüstriyel hem de akademik çalışmalar bugün halen artmakta ve ilgi çekmektedir.

2.3 GEOPOLİMER TEKNOLOJİSİNİN UYGULAMARI

Geopolimerler birçok alanda uygulanmaktadır. Bu uygulamalar:

- Isıya dayanıklı ahşap paneller
- İzolasyonlu panel ve duvarlar
- Dokoratif taş eserleri
- Termal izolasyon için köpük geopolimer panel
- Düşük teknolojili inşaat malzemeleri
- Düşük enerjili seramik karolar
- Termal şok refraktörü
- Alüminyum döküm uygulamaları
- Geopolimer çimento ve beton
- Altyapı tamiri ve güçlendirme için ısı dirençli ve yanmaz kompozitler
- Yanmaz yüksek teknoloji uygulamaları (Uçak kabin içi, motorporları)
- Yüksek teknoloji reçine sistemleri

şeklinde özet olarak sıralanmaktadır (Davidovits, 2011).

1982 yılında Davidovits ve Davidovics Cordi-Geopolymere laboratuvarında geopolimer matris kompoziti geliştirmeye başlamışlardır. Bu çalışmadaki ana hedef döküm ve plastik işlem endüstrilerinin küçük üretim ilerlemelerinde ağır metal kalıpların yerine geopolimer matris döküm kalıp ve desenleri oluşturmaktır. Ürünlerin hedef çalışma sıcaklığı menzili 200 ila 350 C^o arasında kullanılmıştır (Davidovits, 2011).

1990 yılında Amerikan Federal Havacılık yönetimi geopolimer kompoizitlerin uçaklarda kabin içi yangın dirençli olarak kullanılması için bir değerlendirme programı başlatmıştır. Amerikan Fedaral Havacılık İdaresi'ne göre kabin ve kargo bölümünü kapsayan bütün büyük kazalar yanmaz geopolimer kompozitler ile önlenebilecektir (Davidovits, 2011). Bu sebeple çalışmaları takiben uçak kabini ve kargo iç mekanları için ilk yanıcı olmayan kumaş laminat geopolimer kompozit, 18 Kasım 1998'de ABD'nin Atlantic City kentinde, Federal Havacılık İdaresi tarafından desteklenen Uluslararası Uçak Yangın ve Kabin Güvenliği Araştırma Konferansı'nda tanıtmıştır (Davidovits, 2006).

1994 yılında Davidovits ve arkadaşları yarış araçları için ısı kalkanı vazifesi gören geopolimer-karbon kompoziti geliştirmişlerdir. Geopolimer-karbon kompozit bir yarıştaki ısı gerilmelerine 2 ila 3 saat arasında 600 derecede dayanabilecek şekilde dizayn edilmiştir. Buna benzer daha karmaşık bir dizayn 1999 yılında Amerika'da düzenlenen İndy-Car organizasyonunda

mücadele eden All Amerkan Racesrs takımı tarafından tanıtılmıştır. Geopolimer-karbon laminat sisteminin beklenilenden çok daha iyi olduğu ve sadece bir yarış için değil bütün sezon yarışları boyunca hasar almadan kullanılabileceği görülmüştür (Davidovits, 2011). Formula 1 takımları bu yeni teknolojiyi şasilerine adapte etmiştir. 1994 ve 1995 Formula 1 sezonlarında Benetton-Renault Formula 1 Sport Car takımı titanyum ekzos boru sistemi yerine termal korumalı karbon-geopolimer kompozit tasarlayıp şaside kullanmışlardır. Bu teknoloji aracın diğer takımlara üstünlük kurmasına yardım ederek hem Michael Schumacher'in hem de Benetton-Renault'un iki dünya şampiyonluğu kazanmasına pay sahibi olmuştur (Davidovits, 2006).



Şekil 2.4: Termal korumalı geopolimer-karbon kompozit tasarımı Benetton B194 modeli üzerinde 1994 yılında uygulanmıştır (Davidovits, 2006).

Geopolimer teknolojisi için inşaat dışı diğer alanlarda birçok ticari ve endüstriyel uygulamalar mevcut olsa da geopolimerlerin geniş ölçekte inşaat metaryali olarak uygulanması noktasında örnekler azdır (Weerdt, 2011). Potensiyel vaat eden uygulama alanları beton ve harç olarak gösterilmektedir (Vickers, et al., 2015).

Geopolimer teknolojisi Avrupa ve Avustralya'da hızla ilerlemesine karşın ulaşım altyapsında geopolimer betonun geniş ölçekte uygulaması söz konusu değildir. 1990'lı yıllarda Pyrament adında bilinen portland çimentosu ile harmanlanmış geopolimer çimentosu Kuzey Amerika ülkelerinde değişik varyasyonlarda başarılı bir şekilde kaldırım tamiri için kullanılmıştır (CPTP, 2010).

Pyrament'e ek olarak Amerikan Ordusu dikey iniş ve kalkışlarda (VTOL) uçakların ürettiği ısıya dayanacak kapasitede geopolimer kaplama uygulamaktadır (CPTP, 2010). Amerikan Ordusu envanterine yeni teknoloji AV8B (Harrier) dikey iniş ve kalkış (VTOL) yapabilme özellikli uçakların katılmasıyla birlikte beton iniş rampalarında yüzey çatlaması ve kavlanmalar, asfalt rampalarda aşınmalar söz konusu olmuştur. AV8B uçaklarının egzoz çıkış sıcaklığı yaklaşık 700 derecedir. AV8B uçaklarının bu egzoz çıkış sıcaklığı değeri yüzeyde yaklaşık 450 C°'lik sıcaklığa sebep olmaktadır. Yeni nesil dikey kalkış ve iniş özellikli F35B uçakları ise AV8B uçaklarından yaklaşık 205 C° daha fazla egzoz çıkış sıcaklığına sahip olduğu düşünüldüğünde yüzey sıcaklığının AV8B uçaklarına nazaran iki kat daha yüksek olması beklenmektedir. Geopolimerlerin yüksek sıcaklıklara dayanma kabiliyetleri, iç yangın direnci özellikleri ile birleştiğinde bu ve bunun gibi birçok askeri pazarların açılmasına sebebiyet verecektir (Vickers, et al., 2015).



Şekil 2.5: AV8B-Harrier uçakları operasyonel dikey iniş ve kalkışlarında yüzeyde ciddi sıcaklık meydana getirmektedir (Vickers, et al., 2015).

Yakın zamanda geopolimer çimentonun kullanılarak geniş ölçekli demiryolu traversi üretimi yapılmıştır. Paloma ve diğ. üretimde geopolimer betonun erken dayanım, boyutsal kararlılık ve ön germeli kablolar ile matris arasındaki taması konusundaki üstünlüğü konusunda bir rapor yayınlamışlardır (Weerdt, 2011).

Avustralya'da 'The Zeobond Group' adında Prof. Jannie van Deventer tarafından kurulan ve ticari olarak çalışan geopolimer beton üreticisi bir firma bulunmaktadır. Firma hazır ve prekast

olmak üzere yaya kaldırımı, garaj yolu, ev döşemesi ve duvar elementleri inşaatlar için 'E-crete' adını verdikleri geopolimer beton üretmektedirler. Firma geopolimer betonun CO_2 emisyon değerlerinde %50-60 oranında geleneksel betona nazaran daha az salınım yaptığı belirtmektedir. Firma ayrıca geopolimer betonun gelişmiş yangın direnci olduğunu belgelemiştir (Weerdt, 2011).

Geopolimer teknolojisi için potansiyel yüksek perfomans uygulamaları Tablo 2.1'de gösterilmektedir (Vickers, et al., 2015).

Tablo 2.1: Geopolimer teknolojisi için yüksek performans uygulama alanları (Vickers, et al., 2015).

İnşaat
• Kanalizasyon arıtması, setler için kimyasal direnç, döşeme kaplaması • Güneş enerjili ısı transfer elementleri • Gaz ve petrol kuyudibi çimentolaması • Mevcut geleneksel portland çimentolu yapılar, ahşap ve çelik için ısı dayanım kaplamaları • Demiryolu traversleri • Lağım suyu, kanalizasyon boruları • Asansör komponentleri, yüksek yapılar için pasif yangın koruması • Tünel kaplaması
Askeri
• Yangına dayanıklı yakıt depolama setleri • Egzoz gazı termal yalıtımı, Dikey kalkış ve iniş rampaları, zırhlanmış araçlar, askeri gemilerin türbin motor egzozu • Askeri denizcilik: yangına dirençli bileşenler • Cephane depolama setleri
Madencilik
• Kazılmış kısımların yeniden dolgusu • Geotermal dolgu (grouting) • Tünel astarlaması • Enerji üretimi için prefabrik komponentler (kimyasal ve yangın dirençli)
Zararlı Atık Yönetimi

- Nükleer atık depolaması
- Toksik metal enkapsülasyonu
- Su saflaştırması

2.4 GEOPOLİMER SENTEZİ

Geopolimer sentezi için temel olarak iki bileşen grubu söz konusudur (Sing & Middendorf, 2020), (Amran, et al., 2020):

1. Alkali aktivatör
2. Alüminoslikat kaynağı

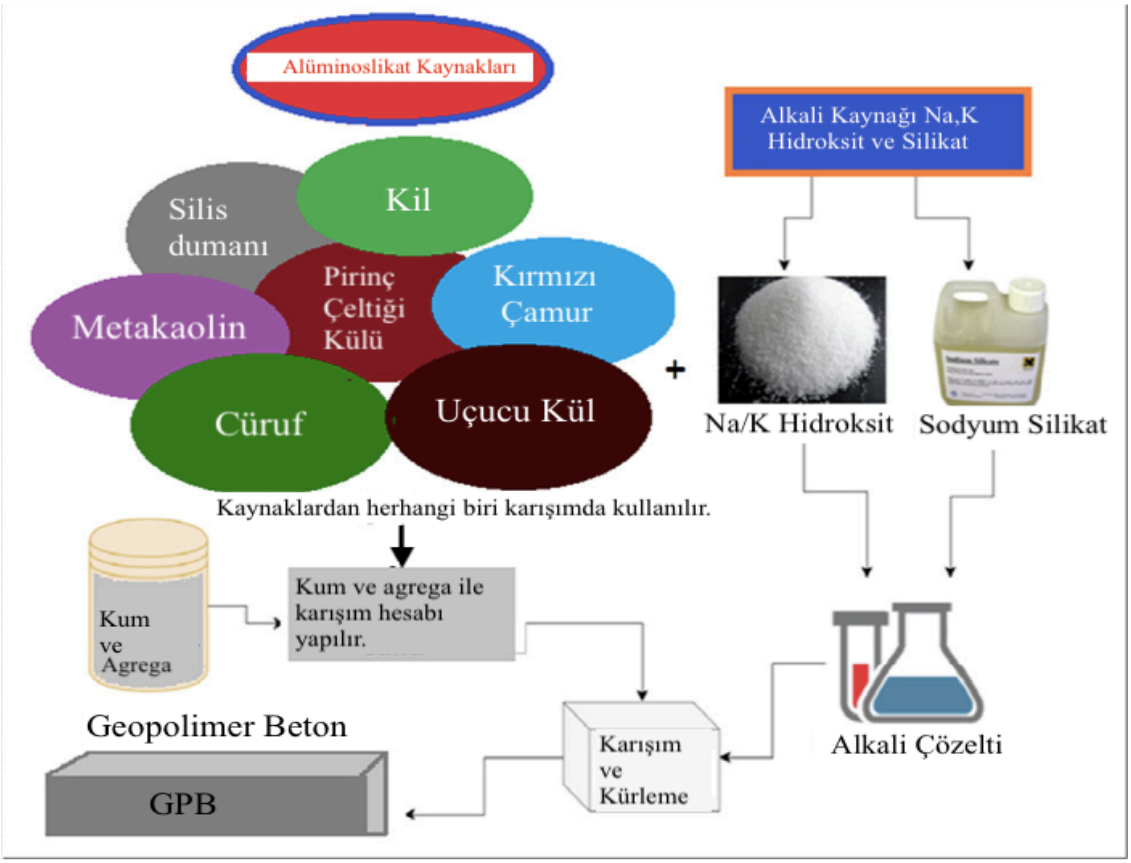
Sentez için gerekli bu iki bileşen grubuna ait olan bazı malzemeler Tablo 2.2'de gösterilmektedir.

Tablo 2.2: Alkali aktivatör ve alüminoslikat kaynakları (Sing & Middendorf, 2020), (Amran, et al., 2020).

Alüminoslikat Kaynağı	Alkali Aktivatörler
• Uçucu kül • Yüksek fırın cürufu • Metakaolin • Kırmızı Çamur • Silis Dumanı • Palm yağı külü • Pirinç çeltiği külü	• Sodyum hidroksit (NaOH) • Sodyum silikat (Na_2SiO_3) • Potasyum hidroksit (KOH) • Potasyum silikat (K_2SiO_3) • Kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) • Diğer silikatlar

Geopolimerler inorganik polimerlerdir. Geopolimer sentezinde iki çeşit materyal: alüminoslikatlar ve Alkali aktivatörler'ler kullanılmaktadır. Geopolimer dizilimi yada formasyonu alüminosilikat bağlayıcılarının (uçucu kül, cüruf vb.) konsantre sıvı alkali solüsyonları (alkali aktivatörler) ile reaksiyona girmesi sonucunda gerçekleşmektedir.

Geopolimer prosesi silikat ve alüminat'ların çözünmesini ve polikondenzasyon reaksiyonlarını içermektedir (Sing & Middendorf, 2020). Geopolimerizasyon prosesi Şekil 2.6' da gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Geopolimer prosesi (Sing & Middendorf, 2020).

2.4.1 Alüminoslikat Kaynakları

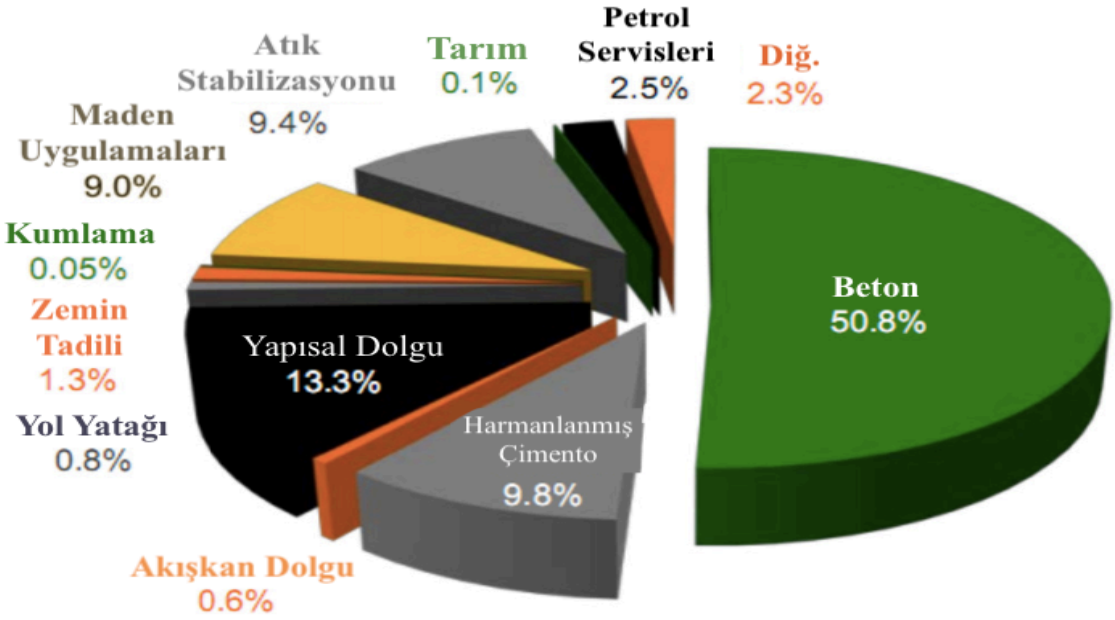
2.4.1.1 Uçucu Kül

Geopolimerler kömür yakımından elde edilen ve bir yan ürün olan düşük kalsiyumlu uçucu kül kullanımı ile sentezlenebilmektedir. Uçucu kül pulverize yakıt külü olarak tanımlanmaktadır. Uçucu kül kazandan üflenen baca gazları ile birlikte ince parçacıkları içeren kömür yanmasının bir yan üründür. Uçucu kül sık sık geleneksel portland çimentolu betonda ikameli olarak kullanılmaktadır. Geleneksel beton ile kıyaslandığında uçucu kül daha yüksek dayanıma ve durabilite özellikleri göstermektedir. Uçucu kül ile üretilen betonlar daha az geçirimli, alkali-slika reaksiyonlarına karşı daha direnci daha etkilidir. Bu sebeple servis ömrü uzamakta ve

maliyet azalmaktadır. Uçucu kül kimyasal kompozisyonu açısından silikon (Silisyum: SiO_2) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) değerleri kütlece %80'ini oluşturan ve Si:Al oranı 2 olan düşük kalsiyumlu uçucu küller olumlu olarak geopolimer beton üretiminde kullanılmaktadır. Uçucu külün demir oksit (Fe_2O_3) oranları tipik olarak %10 ila %20 arasında değişirken, kalsiyum oksit (CaO) içeriği %5'ten küçüktür. Karbon içeriği kızdırma kaybının tasarımda ağırlıkça belirlenmesi ışığınca %2'den küçüktür. Uçucu kül portland bazlı betonlara kıyasla bazı ülkelerde %20 ila %60 arasında daha ucuz kalmaktadır. Bununla birlikte uçucu kül uzun mesafelere çok nadiren nakledilmektedir. Bu durum lokal bazda portland çimentolu betonun daha ucuza bulunmasına sebep olabilmektedir. Uçucu külün kullanılması aynı zamanda arazi alanlarının muhafazası, suyun azalması, enerji tüketimi ve sera gazı etkileri gibi çevresel problemler ile başa çıkılması gibi konularda pozitif etkiye sahiptir. Bu durumda uçucu kül kullanımı 1 ton çimento üretiminde 1 ton karbondioksit salınımı yapan portland çimentolu betonların üretimini azaltmakta diğer bir ifadeyle 1 ton uçucu kül kullanımı 1 ton karbon dioksit salınımı azaltmaktadır. Raporlar beton üretimi için bütün bir yıl uçucu kül kullanmanın dünya çapındaki araçların yaydığı karbondioksitin %25'ini ortadan kaldırmaya eşdeğer olduğunu belirtmektedir. Uçucu kül partiküllerinin genel olarak ortalama büyüklükleri ve blain yüzey alanı sırasıyla 9μm ve ve 0.37 m^2/g değerlerindedir. Uçucu külün bu oldukça küçük partikül yapısı geopolimer betonun yoğunluğunu artırmakta ve donma direncini artırmaktadır (Amran, et al., 2020). Uçucu kül üretimi teknolojideki çevre dostu iyileştirmeler ve ekonomik iyileştirmelerdeki önemli rolünden dolayı ehemmiyet kazanmıştır. Uçucu kül metaryali aynı zamanda zemin iyileştirmesi, atık uzaklaştırma ve zeolit üretimi gibi faaliyetlerde de kullanılmaktadır. Uçucu külün Birleşik Devletler'de kullanım alanları Şekil 2.7'de gösterilmektedir. Uçucu kül son yıllarda geopolimerlerin üretilmesinde alternatif materyal haline gelerek reaktivite, karışımdaki ortaya çıkışı ve diğer karakteristikleri açsından yeni bir çimento yada hidrate çimentoya benzeyen bir bağlayıcı konuma oturtulmaktadır (U.S Departmant of Transportation, 2017).

Tablo 2.3: Uçucu külün (düşük kalsiyumlu) ve portland çimentosunun genel bileşim tablosu (U.S Departmant of Transportation, 2017).

Bileşenler	Uçucu Kül	Portland Çim.
SiO_2	55	23
Al_2O_3	26	4
Fe_2O_3	7	2
CaO	9	64
MgO	2	2
SO_3	1	2



Şekil 2.7: Birleşik Devletler'de uçucu külün uygulama alanlarının yüzdelik gösterimi (Amran, et al., 2020).

2.4.1.2 Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu

Öğütülmüş yüksek fırın cürufu bir yan üründür. Cüruf 1500 °C sıcaklıkta demir üretimi için demir cevheri, kok kömürü ve kireçtaşı karışımlarının yakılması ile elde edilmektedir. Erimiş cüruf içeriğinin %40'ını yaklaşık CaO (Kalsiyum oksit) ve %30-%40 arasında SiO_2 (silikon dioksit). Bu kimyasal kompozisyon geleneksel portland çimentosunun kimyasal kompozisyonuna oldukça yakındır. Demir cevheri demire dönüştüğünde artık ya da tortu kısım demir eldesinin üzerinde yüzen cürufu meydana getirmektedir. Cüruf genellikle erimiş bir sıvı halde dökümden alınmaktadır. Cüruf erimiş sıvı halden alındıktan sonra üretimi için büyük hacimde ve hızlı bir şekilde su verme işlemi yapılmaktadır. Su verme işlemi cürufun

çimentomsu özelliklerini artırmakta ve küçük cüruf parçacıklarını ortaya çıkarmaktadır. Su verme işleminin akabininde cüruf malzemesi kurutularak toz ya da pudra kıvamında ince bir forma getirilmektedir. Cüruf geleneksel portland çimentolu betonda %35-%70 oranları arasında çimento ile değiştirilerek kullanılabilmektedir. Cüruf malzemesi geopolimer beton üretiminde ince öğütüldüğünde ve diğer materyaller ile kombine edildiğinde üstün özellikler sergilemektedir. Malzemenin cam içeriği hacminin %85'ini aşmaktadır. Özgül ağırlığı 2.7'den 2.90'a kadar değişmekte iken (geleneksel portland çimentosundan düşüktür) birim hacim ağırlığı ise 1200 kg/m^3 ila 1300 kg/m^3 arasındadır (Amran, et al., 2020). Tablo 2.4'te kimyasal kompozisyon gösterilmektedir.

Tablo 2.4: Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu (Amran, et al., 2020).

Oksitler	ASTM C989 tarafından belirlenmiş miktarlar (%)
Silikon Dioksit, SiO_2	40.0
Alüminyum Oksit, Al_2O_3	13.5
Kalsiyum Oksit, CaO	39.2
Magnezyum Oksit, MgO	3.6
Demir Oksit, Fe_2O_3	1.8
Kükürt Trioksit, SO_3	4
Sülfit, S	1.0-1.9
Kızdırma Kaybı	0.0

Cürufun kimyasal kompozisyonu geleneksel çimentoya diğer mineral katkılardan daha fazla benzerlikler göstermektedir. Boşlukların doldurulması, uzun vadeli dayanım, betonun sülfat ve alkali silika reaksiyonu direnci, geçirimlilik ve hidratasyon prosesi esansında ısı üretimi gibi özellikler için cüruf kullanılabilmektedir. Geopolimer betonda cürufun ilavesi geopolimer matrisi, karakteristiği ve reaksiyonu üzerine etki etmektedir. Bu etki eklenen cüruf miktarına göre değişmektedir (%5-%50). 27 °C'de reaksiyonun cüruf tarafından kontrol edildiği bulunmuştur. 27 °C'deki reaksiyon cürufun alkali aktivasyonu sebebiyle C-S-H jellerinin çözünmesi ve çökelmesi ile reaksiyona katkı sağlamaktadır. Ayrıca, geopolimer üretiminde, cüruf içinde bulunan alüminyum ve silikon, agregaları bağlayan geopolimer macunu üretmek için bir sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltileri karışımı ile aktive edilmektedir. Geopolimer betonda artırılmış cüruf kullanımı oranın betonun ultrases geçiş hızı, asid direnci

ve basınç dayanımını tüm kür rejimlerinde artırabileceği sonucuna varılabilmektedir (Amran, et al., 2020).

2.4.1.3 Kırmızı Çamur

Kırmızı çamur alüminyum taşının (boksit) alüminyum oksite rafine edilmesi için Bayer işleminin bir yan ürünü olarak ortaya çıkmaktadır. Sıradan bir alüminyum üretim tesisi alümünyum üretim miktarının bir ila iki katı oranı kadar kırmızı çamur üretmektedir. Kırmızı çamur kendisine kırmız rengi vermesini sağlayan %30 ila %60 arasında demir oksiti içermektedir. Kırmızı çamur son derece bazik olmakla beraber baz değer aralığı 10-13 pH arasında değişmektedir. Çimento üretiminde yıllık 2 ila 3 megaton kırmızı çamur kullanılmaktadır. Malzeme aynı zamanda yol tabanı ve yol temeli olarak yol inşalarında ve demir üretiminde kullanılmaktadır. Kırmızı çamurun katı bileşenleri esas olarak alümina (alüminyum oksit), demir oksit (çoğunlukla hematit) ve bazı toksik ağır metallerden meydana gelmektedir. Üretimde kullanılan orijinal boksit eğer radyoaktif içeriyor ise kırmızı çamur da bir miktar radyoaktiflik içerebilmektedir. Kırmızı çamurun yüksek alkalinitesi ve su içeriği düşünüldüğü zaman malzemenin güvenli ve ekonomik imhası yada ortadan kaldırılması alüminyum rafinerileri için büyük çevresel endişelere sebep olmaktadır. Geopolimer betonda kırmızı çamurun kullanılması reaksiyonun yoğunluğunu ve reaksiyonun bünyesel ıslahatını geliştirmektedir. Bununla birlikte hem basınç dayanımı hem priz süresinde iyileşme göstergelerinin numunelerde %5 ila %20 oranları arasında kırmızı çamur kullanıldığında ortaya çıktığı rapor edilmektedir. Bu sebeple kırmızı çamurun geopolimer betona düşük oranda kullanımının daha yüksek solüsyona ve elastisite modülü, kırılma şekil değiştirme ve basınç dayanımına pozitif etkisi olan sodyum tri-silikatların kullanımına yol açabilmektedir. Kırmızı çamurun düşük katkısı geopolimer betonda daha reaktif silisyuma ve geopolimerizasyon reaksiyonun kolaylaşmasına sebep olmaktadır (Amran, et al., 2020).

2.4.1.4 İnce Agrega

Geopolimer betonda ince agrega %35-45 oranlarında bir katılımda bulunmaktadır. İnce agregalar genellikle kum ocaklarından çıkarılmaktadır. Granit endüstrisi atıklarından olan ve yıllık 12.2 milyon ton gibi yüksek seviyelere ulaşabilen granit tozu geopolimer betonda ince agrega olarak kullanılabilmektedir. Geopolimer betonda ince agreganın içeriğinin toplam agrega içerğine uygun tercihi oranının 0.35 olduğu ve bu oranın poisson oranı, elastisite

modülü, yarmada çekme ve eğilme dayanımı dayanımlarını normal betona göre %19-45 oranları arasında geliştirdiği görülmüştür (Amran, et al., 2020).

2.4.1.5 İri Agrega

Geopolimer betonda betondan üretilmiş geri dönüşümlü agrega, yığma, asfalt, karo ve diğer atıklar iri agrega olarak kullanılabilmektedir. Literatürde geri dönüşümlü agregaların kısmı olarak doğal iri agrega ile değişimli olarak %15, %30 ve %50 oranında kullanılabildiği görülmektedir. Betonun kullanımının artışı doğal agregaların daha fazla çıkarılmasına sebebiyet vermekte ve bu durum tersine olarak doğal ekosistemi kötü yönde etkilemektedir. İnşaat ve yıkımlardaki ortaya çıkan atıklar birçok araştırmacıyı depo alanlarının azaltılması ve mevcut mineral, doğal agregalara olan bağlılığı azaltma gayesiyle atıkların geri dönüşümünün kazandırılması için yeni metotlar keşfetmeye ilham vermektedir. Bilindiği üzere iri ve ince agrega yaklaşık olarka betonu %75 ile %80 oranlarında ihtiva etmektedir. İnşaat ve inşaat tıkımı atıkları bu oranlar içerisinde beton üretiminde kullanılabilmektedir. Bu fikir yeni olmamasına karşın, araştırmacılar geopolimer betonda geri dönüşümlü agrega içerikli betonun özelliklerini araştırmışlar ve bu özelliklerin doğal agrega içerikli geopolimer beton özelliklerinden aşağı olduğu konusunda uzlaşmışlardır. Geopolimer betonda geri dönüşümlü agrega kullanımının durabilite mekanik özellikleri üzerine az sayıda yapılmış çalışma bulunmaktadır (Amran, et al., 2020).

2.4.2 Alkali Aktivatörler

Kullanılan en yaygın alkali aktivatörler alkali hidroksit ve alkali silikat solüsyonlarıdır (Weerdt, 2011). Alkali sıvı sistemi için Na_2CO_3, NaOH, Na_2SO_4 gibi alkali aktivatörler kullanılmaktadır (Amran, et al., 2020). Alkali sıvının cinsi ve konsantrasyonu geopolimerizasyon prosesini kontrol etmektedir. Geopolimer reaksiyonu için kullanılan alkalilerin aktivasyon potansiyeli aşağıdaki gibidir (Sing & Middendorf, 2020):

Na_2SiO_3 (Sodyum silikat) > NaOH (Sodyum hidroksit) > NaOH+Na_2CO_3 (Sodyum hidroksit ve sodyum karbonat) > KOH (Potasyum hidroksit)

Farklı derecede sodyum silikat solüsyonları ticari olarak mevcuttur. Alkali solüsyon 24 saat öncesinden hazırlanarak farklı konsantrasyonlarda (8-16 mol arası) kullanılabilmektedir. Alkali aktivatörler katı veya sıvı bir şekilde uygulanabilmektedir (Sing & Middendorf, 2020).

2.4.2.1 Alkali Hidroksit Solüsyonları

En geniş ve yaygın şekilde kullanılan alkali hidroksit aktivatörleri KOH (potasyum hidroksit) ve NaOH (sodyum hidroksit)' tır. Diğer elde hazır tedarik edilebilen alkali hidroksitler LiOH (Lityum Hidroksit), RbOH (Rubidyum hidroksit) ve CsOH (sezyum hidroksit) gibi geopolimer üretiminde nadir kullanılan hidroksit aktivatörleridir (Weerdt, 2011).

Sodyum, potasyumdan daha ucuz bir elementtir. Ancak sodyum hidroksit, potasyum hidroksitle kıyaslandığında birtakım dezavantajlara sahiptir. Sodyum hidroksit sıcaklığın düşmesiyle çözünürlük ya da erime özelliğinde dramatik bir düşüş göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda sodyum hidroksit kullanımı solüsyonda çökelmelere sebebiyet vermektedir. Potasyum hidroksitin çözünürlüğü bahsedilen sıcaklıklara bağımlılık göstermemektedir. Sodyum hidroksit, potasyum hidoksit solüsyonuna kıyasla benzer konsantrasyonlarda daha viskoz olma eğilimindedir. Bu durum taze karışımda reolojik özellikleri bozulmasına sebep olmaktadır (Weerdt, 2011).

Hem potasyum hidroksit hem sodyum hidroksit kristalin zeolit yapısının oluşumuna sebebiyet vermektedir. Kristalizasyon en hızlı sodyum hidroksit kullanımında ortaya çıkmaktadır. Alkali hidroksit aktivasyonun yüksek aşındırıcı doğası ve çözünmesi esnasında yüksek sıcaklık salınımından dolayı (10 molar sodyum hidroksit solüsyonu sıcaklığı 90°C'ye kadar çıkmaktadır) kullanıcıya dost olmadığının dikkate alınması gerektiği not edilmelidir. Alkali hidroksit solüsyonunda bir diğer dezavantaj artan molarite ile artan viskozite olarak gösterilmektedir (Weerdt, 2011).

2.4.2.2 Alkali Silikat Solüsyonları

Alkali silikat solüsyonları Na_2O veya K_2O, Si_2O ve su karışımlarını içermektedir. Çözülmüş silikanın (silikon dioksit yada SiO_2) bir parça asidik olduğu unutulmamalıdır. Silika , monomerik silika örnek gösterilebilir ve alkali kondisyonları altında zayıf bir asid gibi davranmaktadır. Bu sebeple solüsyonu aktive eden silikatın ph değeri 11-12 arasında tamponlanmıştır. Alkali silikat aktivatörünün viskozite değerinin Si/Na oranı arttıkça arttığı bilinmektedir. Sodyum silikat geopolimerizasyon prosesinde kullanılan en yaygın silikat aktivatörüdür (Amran, et al., 2020).

2.5 GEOPOLİMER BETONUN İŞLENEBİLİRLİĞİ

Chindaprasirt ve diğ. (2013) Uçucu kül esaslı geopolimer betonunun işlenebilirliğini incelemişlerdir. Sonuçların Na_2SiO_3/NaOH ve NaOH konsantrasyonuna bağlı olmak üzere 115-135 mm arasında olduğu belirtilmiştir. Yine Chidaprasirt ve diğ. yaptıkları çalışmalarda geopolimer betondaki kusma miktarının portland çimentolu betona nazaran daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Rangan ve Hardjito (2005) geopolimer betondaki işlenebilirliğin naftalin bazlı süperakışkanlaştırıcı kullanıldığında arttığını gözlemlemişler ve sıvı akışkanlaştırıcı miktarının uçucu kül kütle oranının %2-%4 oranında olmasını önermişlerdir. Shadnia ve diğ. (2015) farklı alkali aktivatör/uçucu kül oranlarında geopolimer betonun işlenebilirliğinin NaOH molaritesi düşmesine bağlı olarak arttığını göstermişlerdir. Ramujee ve Potharaju (2017) geopolimer betonun işlenebiliriliğinin birçok faktöre bağlı olduğunu belirtmişler ve bunların alkali solüsyonu/uçucu kül oranı, uçucu kül inceliği, Sodyum Slikat/Sodyum Hidroksit oranı, sıvı/uçucu kül oranlar olduğunu ifade etmişlerdir. Mehta ve Siddique (2017) geopolimer betonun çeşitli NaOH molaritesinde ve farklı SiO_2/Al_2O_3 oranlarında işlenebilirliğini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda geopolimer betonun işlenebilirliğine NaOH molaritesinin ciddi etkisi olduğu görülmektedir.

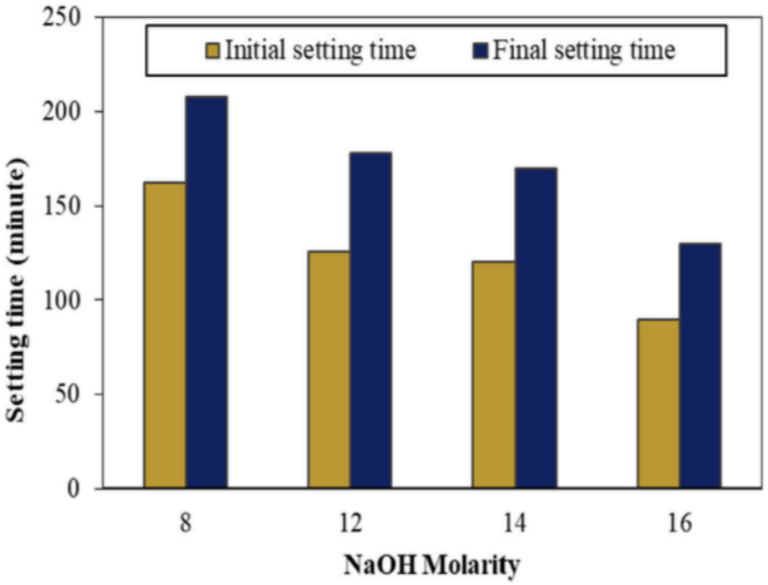
2.6 GEOPOLİMER BETONDA KÜRLEME İŞLEMİ

Priz Süresi geopolimer betonda alkali çözeltisi kütle oranı olarak alkali sıvısı/uçucu kül gibi birçok faktöre dayanmaktadır. Ancak geopolimer beton için Al Bakri ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada kürleme ısısının en önemli faktör olduğu belirtilmiştir. Chanh ve diğ. (2019) kürleme ısısı arttıkça geopolimer betondaki priz süresinin azalacağını ifade etmişlerdir. Kürleme esnasında, geopolimer beton geopolimerizasyon işlemini tecrübe etmektedir. Sıcaklığın artması sebebiyle polimerizasyon daha hızlı gerçekleşmekte ve geopolimer beton dayanımının %70'ini 3 ila 4 saat arasında kazanmaktadır (Al Bakri, et al., 2011).

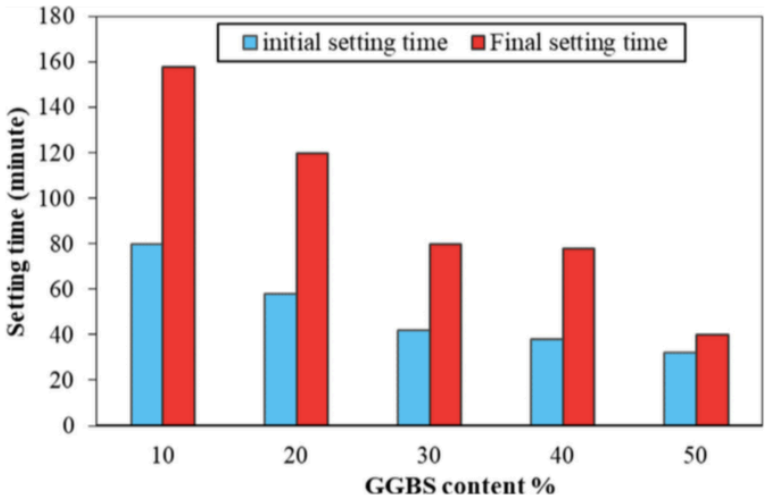
2.7 GEOPOLİMER BETONUN PRİZ SÜRESİ

Priz süresi ifadesi betonunun dökümlenme, kompakte olması ve rijit bir hale gelip erken dayanımını kazanmasına kadar geçen süre için kullanılmaktadır. ASTM C807 (2008) ve British Stadards İnstitution (2009) standardınca Vicat iğnesi betonun priz süresini test etmek için kullanılmaktadır (Hassan, et al., 2019). Jumrah ve diğ. (2011) geopolimer beton üretiminde alkali aktivatör/uçucu kül ve Na_2SiO_3/NaOH oranlarının neredeyse hiç etkisi olmadığını

belirtmişlerdir. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda ise geopolimer betonun priz süresinin NaOH molaritesinden etkilendiği ve NaOH molaritesindeki azalmanın priz süresini geciktirdiği belirtilmiştir (Antoni, et al., 2017). Şekil 2.8 NaOH molaritesi azalmasına bağlı olarak geciken priz süresini göstermektedir. Malwaki ve diğ. (2016) erken ve geç priz sürelerinin geopolimer betondaki cürüf kullanımının artırılmasıyla azalacağının belirtmişlerdir. Al-Majidi ve diğ. (2016) geopolimer beton üretiminde uçucu külün cüruf ile kullanımın priz süresini kayda değer bir şekilde etkilediğini belirtmektedirler. Pilehvar ve diğerleri (2018) tarafından yapılan çalışmalar diğer sonuçları desteklemektedir (Bkz: Şekil2.9).



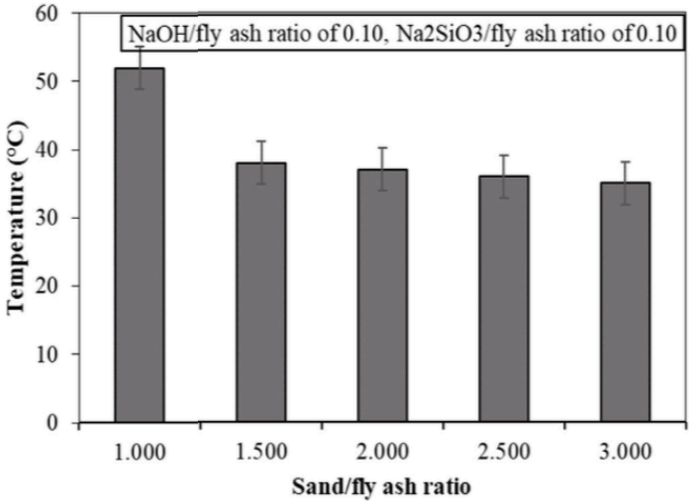
Şekil 2.8: Geopolimer betonda NaOH molaritesine bağlı olarak priz süresi (Umniati, et al., 2017, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi).



Şekil 2.9: Geopolimer betonda cüruf içeriğinin priz süresine etkisi (Pilehvar, et al., 2018, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi)

2.8 GEOPOLİMER BETONDA HİSRATASYON ISISI

Geopolimer beton yüzey sıcaklığının alkali çözeltisi ve uçucu kül arasındaki geopolimerizasyondan kaynaklı Portland çimetolu betonlara nazaran nispeten daha sıcak olduğu belirtilmektedir (Zhang, et al., 2016). Shekhovtsova ve Kearsley (2014) bir çalışmasında sabit ince agraga/uçucu kül değerinde Na_2SiO_3/Uçucu Kül oranın artmasına bağlı olarak hidratasyon ısısının arttığını belirtmişlerdir. Yine Shekhovtsova ve Kearsley (2014) sabit NaOH/Uçucu kül oranında hidratasyon ısısını farklı kum/uçucu kül oranlarında incelemişler ve artan oran ile hidratasyon ısının düştüğünü Şekil 2.10'daki gibi göstermektedirler.



Şekil 2.10: Sabit NaOH/uçucu kül oranında kum/uçucu kül oranının geopolimer betonda etkisi (Shevkovtsova, et al.,2014, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi).

Almuhsin ve diğ. (2018) geopolimer betonda karışımdan sonraki yüzey sıcaklığının 32 ila 54 C° aralığında değiştini belirtmişlerdir. Öte yandan Akçaözoğlu ve diğ. (2017) sadece cürüf ile üretilmiş geopolimer betondaki hidratasyon ısının 27 ila 40 C° belirtmişlerdir. Cürüf ile üretilen bu geopolimer betonlarda maksimum sıcaklığa ulaşma süresi maksimum 29 saat iken minimum 8 saat aralığında değişmiştir.

2.9 GEOPOLİMER BETONDA BASINÇ DAYANIMI

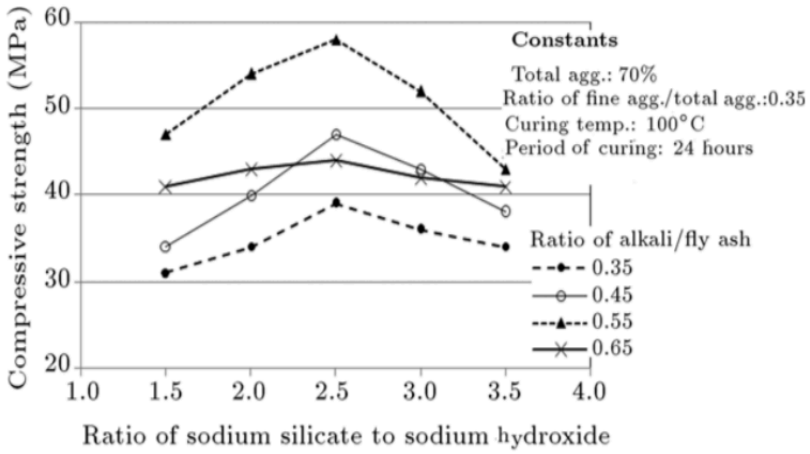
Basınç dayanımı bütün beton türleri için temel bir özellik olmakla beraber kürleme süresi ve kür ısısı gibi faktörlere bağlıdır. Kür süresi ve ısısı arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. 60 ^{o}C -90 ^{o}C kür ve 24-72 saat kür süresi aralığında 40 ila 50 mPa aralığında basınç dayanımları elde edilebilmektedir (Chanh, 2008). Wallah ve Rangan (2006) uçucu kül esaslı geopolimer betonun kırılma ve davranışının neredeyse Portland çimentolu betonla benzer olduğunu ve pik stres değerinin $24x10^{-4}$ ten $26x10^{-4}$ e kadar değiştiğini ifade etmişlerdir. Geopolimer betonun basınç dayanımı partikül büyüklüğü dağılımı, uçucu kül gibi kaynak bağlayıcılara ve kür rejimine önemli ölçüde bağlıdır. Uçucu külün inceliği arttıkça geopolimer betonu basınç dayanımının arttığı gözlemlenmiştir (Al-Bakri, et al., 2010). Isı uygulanmış kürlemede düşük kalsiyumlu uçucu kül geopolimer betonun tüm dayanımını bir gün sonra kazandığı ve bir günden sonra herhangi bir dayanım kazanmadığı literatürde aktarılmıştır. Bununla birlikte geopolimer betonun oda sıcaklığında kür işleminde sonra Portland çimentolu beton ile aynı dayanımı

kazandığı görülmektedir (Ammar, et al., 2019). Bütün kür rejimlerinde ortam yada yüksek ısı kürü fark etmeksizin uzun vadede aynı dayanımları üretmektedir (Rangan, 2008)

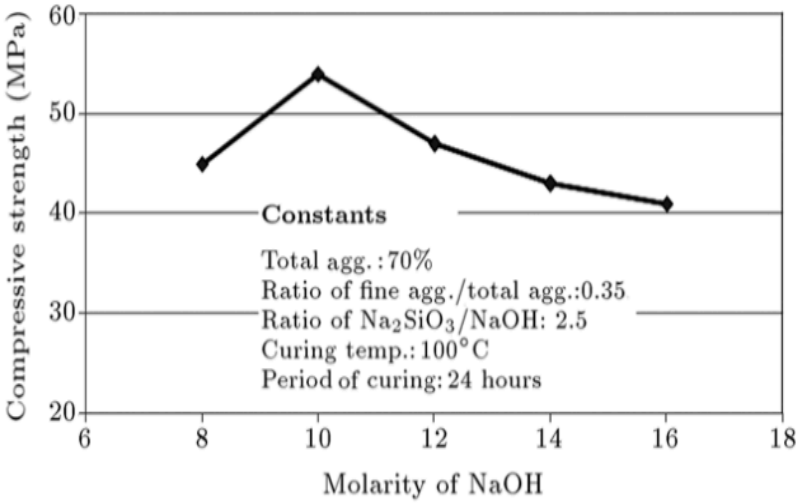
Su/Geopolimer katısı oranının geopolimer betonda basınç dayanımına etkisi gözlenmiş ve geleneksel portland çimentolu betondaki su/çimento oranı ve basınç dayanımı ilişkisine benzer ters bir ilişki olduğu belirlenmiştir. Geopolimer katısı bağlayıcının kütlesi, sodyum slikatın kütlesi ve sodyum hidroksitin kütlesi toplamı olarak hesaplanmıştır. Uçucu kül ve cürüf karışımlı bir geopolimer karışımda optimum basınç dayanımı için cürüf/uçucu kül oranının 35:65 olmasını önerilmiş ve bu oranın cüruf ve uçucu külün reaktifliği ile de değişkenlik gösterebileceği ifade edilmiştir (Ammar, et al., 2019). Assi ve diğ. (2016) bazı yüksek reaktif ince uçucu küllerin yüksek dayanım eldesi için cürüf ilavesine ihtiyaç bırakmadığını belirtmektedirler.

Geopolimer beton üretimi için çeşitli kaynak malzemelerin kullanılması ve bu kaynak kullanımlarının beraber kullanımındaki oranlarının belirlenmesi basınç dayanımlarını önemli derecede etkilemektedir (Ammar, et al., 2019). Ismail ve diğ. (2013) farklı sodyum hidroksit/sodyum slikat oranlarında erken beton dayanımlarını gözlemlemek için geopolimer beton üretiminde kaynak bağlayıcı olarak metakaolin ve palm yağı yakıtı külü kullanmışlardır. Al-mashhadani ve diğ. (2018) yaptığı çalışmalarda palm yağı yakıtı külünün partikül şeklinin ve yüzey alanının geopolimer beton basınç dayanımına önemli derece etki ettiğini bulmuştur. Petermann ve Saedd (2010) palm yağı yakıtı külü ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun metakaolin ile doğru oranlarda kullanımının basınç dayanımında iyi sonuçlar verebileceğini bulmuşturlar. Naskar ve Charaborty (2016) yaptığı bir çalışmada %30 palm yağı yakıtı külü ve %70 oranında öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullandığı karışımında 66 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Geopolimer beton üretiminde Na_2SiO_3/NaOH basınç dayanımına önemli derecede etki etmektedir. Joseph ve Mathew (2012) agrega içeriğinin uçucu kül esaslı geopolimer betona etkisini araştırdıklarında her biri farklı alkali/uçucu kül karışım oranında Na_2SiO_3/NaOH değerine bağlı olarak basınç dayanımında önemli farklılıklar gözlemlemişlerdir. Şekil 2.11' da görüldüğü gibi her biri farklı alkali/uçucu kül karışım oranında 2.5 Na_2SiO_3/NaOH oranı için basınç dayanımın pik yapmaktadır. Yine Joseph ve Mathew (2012) hazırladıkları karışımlarda NaOH molaritesi etkisini gözlemlemişlerdir. 8,10,12,14 ve 16 molar NaOH değerleri arasında en yüksek basınç dayanımını Şekil 2.12'de görüldüğü gibi 12 molar NaOH kullanımında elde etmişlerdir. Benzer çalışmalar bu durumu

destekler niteliktedir. Nuaklon ve diğ. (2016) yaptıkları çalışmalarda iyi bir basınç dayanımı için optimum NaOH değerinin 12 molar olduğunu sonuçlarında göstermişlerdir.

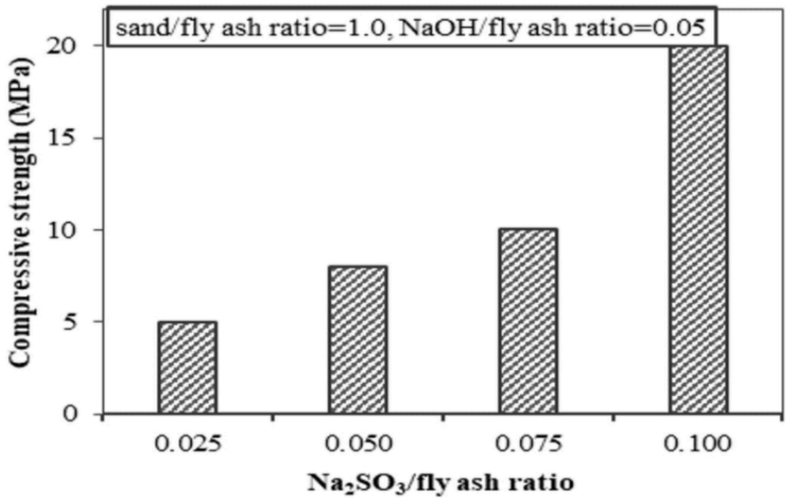


Şekil 2.11: Na_2SiO_3/NaOH oranının basınç dayanımına etkisi (Joseph & Mathew, 2012).



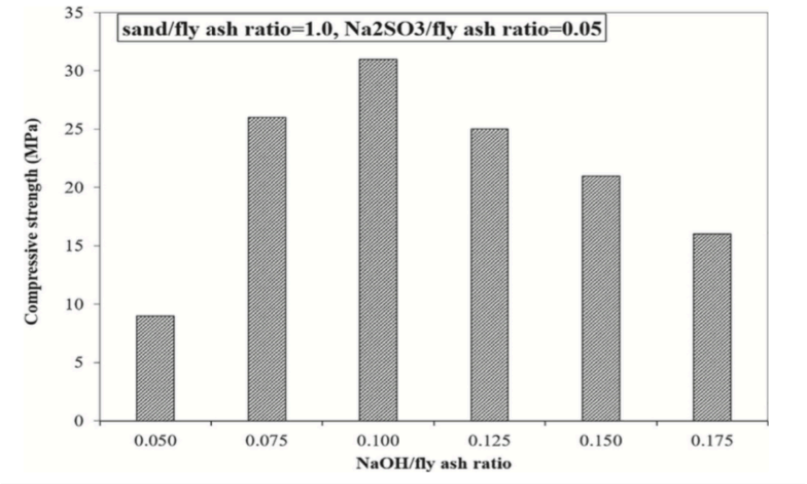
Şekil 2.12: NaOH molaritesinin basınç dayanımına etkisi (Joseph & Mathew, 2012)

Basınç dayanımında NaOH/uçucu kül oranının ve Na_2SiO_3/Uçucu Kül oranlarının basınç dayanımlarına etkisi Şekil 2.13 ve 2.14' te gösterilmektedir (Kotwal, et al., 2014).



Şekil 2.13: Na_2SiO_3/Uçucu Kül oranlarının basınç dayanımlarına etkisi (Kotwal, et al., 2014, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi).

Na_2SiO_3/Uçucu Kül oranını arttıkça geopolimer betondaki basınç dayanımı da artmaktadır. NaOH/uçucu kül oranında ise basınç dayanımı 0.100 değerlerine kadar maksimum dayanımı göstermekte ve değer arttıkça basınç dayanımı düşmektedir (Kotwal, et al., 2014).



Şekil 2.14: NaOH/Uçucu kül oranının basınç dayanımına etkisi (Kotwal, et al., 2014, Ammar, et al., 2019'da bahsedildiği gibi).

2.9.1 Cüruf Esaslı Geopolimer Betonda Basınç Dayanımı

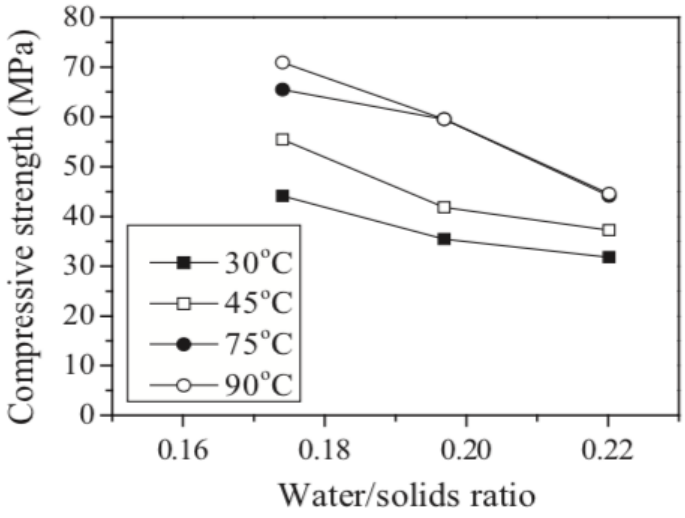
Cüruf esaslı geopolimer beton yüksek erken dayanım ve hızlı dayanım kazanımı özelliği göstermektedir. Cüruf esaslı geopolimer beton 1 günlük basınç dayanımında 60 MPa ve 1 yıllık basınç dayanımdan 100 MPa seviyelerinde dayanım gösterebilmektedir. Cüruf esaslı geopolimer betonda yüksek dayanım iki faktöre dayandırılmaktadır: erken dayanımı veren artırılmış ph değerindeki hidrasyon hızı ve yoğun, homojen ara yüz geçiş bölgesi (ITZ) yani bağlayıcı ve arayüz geçiş bölgesindeki (ITZ) minimum dayanımdır (Ding, et al., 2016).

Cüruf esaslı geopolimer beton kürleme kondisyonlarına oldukça duyarlıdır. Bakharev ve diğ (Bakharev, et al., 1999, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi) yüksek ısı ile kürledikleri cüruf esaslı geopolimer betonda oda şartlarında elde edilmiş cüruf esaslı geopolimer betonlara nazaran daha erken dayanım kazandığını bulmuşlardır. Collins ve Sanjayan (2001) havuz kürüne maruz bırakılan cüruf esaslı geopolimer betonun basınç dayanımının 400 güne kadar, mühürlenmiş yada kaplanmış numunelerin 90 güne kadar geliştiğini ancak ortam hava şartlarına maruz bırakılan beton numunelerinin ise belirli bir süreden sonra dayanımlarının matrix içerisindeki micro çatlaklardan dolayı gerilemeye başladığını belirtmişlerdir.

Cüruf esaslı geopolimer betonda basınç dayanımı Na_2O yüzdesi arttıkça artmaktadır (Chi, 2012). Aynı zamanda sodyum silikat çözeltisinin desteklenmiş sodyum silikat çözeltili cüruf esaslı geopolimer betona nazaran erken basınç dayanımını daha hızlı kazandırmaktadır (Ding, et al., 2016).

2.9.2 Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonun Basınç Dayanımı

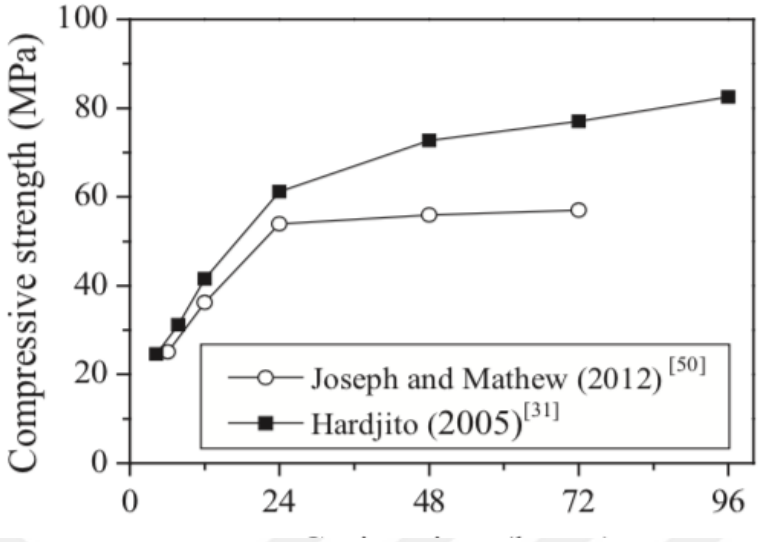
Uçucu kül yüksek aktivasyon enerjisi gerektiren bir bağlayıcıdır. Uçucu kül esaslı geopolimer betonda erken dayanımı artırmak için yüksek kür sıcaklığı gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda (bkz: Şekil 2.15) uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımının su/geopolimer katısı oranının artmasıyla azaldığı keşfedilmiştir (Su toplam değeri Sodyum slikat ve sodyum hidroksit çözeltilerine katılan su miktarına eşit iken, geopolimer katısı değeri uçucu kül,sodyum slikat ve sodyum hidroksit katısına eşittir.) (Ding, et al., 2016).



Şekil 2.15: Su/GP Katısı oranının uçucu kül esaslı geopolimer beton basınç dayanımına etkisi (Ding, et al., 2016).

Geopolimer beton ve Portland çimentolu beton bağlayıcılarındaki kimyasal işleyişler tamamen farklı olmasına rağmen olan uçucu kül esaslı geopolimer betonlar basınç dayınımı açısından portland çimentolu betondaki su/çimento oranı arasındaki ilişkiye benzer özellik sergilemktedir. Bunlara ek olarak kür sıcaklığı arttığında uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımının arttığı Şekil 2.16'da görülmektedir. Ancak yine Şekil 2.16'da görüldüğü gibi kür sıcaklığının 75-95 C° arasında değişmesi dayanım kazanımında pek önem arz etmemektedir (Ding, et al., 2016).

Uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımı uzun kür süresinde daha yüksek sonuçlar verdiği ancak Şekil 2.9'da gösterildiği gibi bu dayanım kazanımın 48 saatlik süreden sonra dikkatede değer kazanımlar olmadığı belirtilmektedir (Ding, et al., 2016).



Şekil 2.16: Uçucu kül esaslı geopolimer betonda kür süresinin basınç dayanımına etkisi (Ding, et al., 2016).

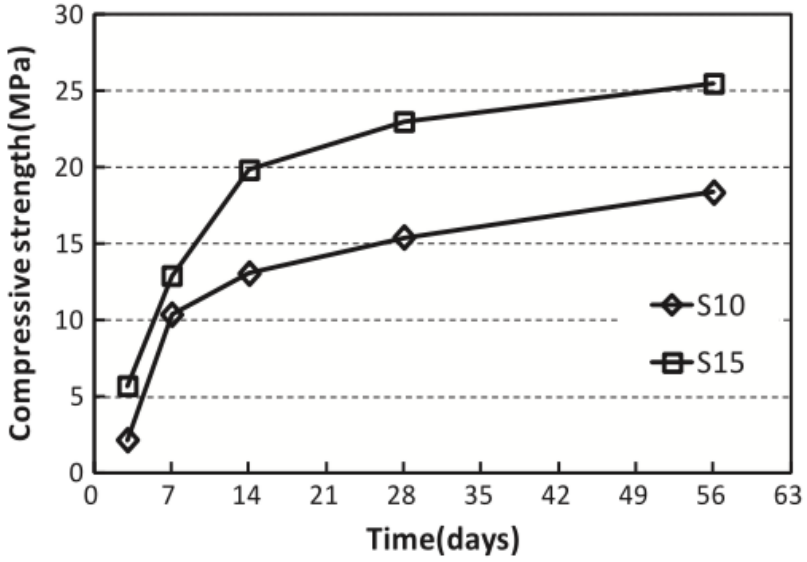
Uçucu kül esaslı geopolimer betonda yüksek molaritede NaOH kullanımı yüksek basınç dayanımı sonuçları vermektedir. Bunun sebebi yüksek pH değerinin uçucu kül yüzeyindeki camsı zincirin kırılmasını artırması ve bunun sonucunda beton dayanımını sağlayan içsel Si ve Al'nin reaksiyonunun bu kırılma sonucu desteklenip jel formu fazına geçmesi olarak açıklanmaktadır (Ding, et al., 2016). Joseph ve Mathew (2012) yaptıkları bir çalışmada cüruf esaslı geopolimer beton için optimum değeri Şekil 2.12'deki gibi göstermektedirler. Bu davranış esas olarak geopolimer sentezinde NaOH konsantrasyonun çözünmeye, hidrolize ve kondenzasyon reaksiyonuna sağladığı pozitif etkiden kaynaklanmaktadır. Ancak alkali konsantrasyonun belirli bir orandan sonra artışı silikat taneciklerinin kondenzasyonunu engellemekte basınç dayanımını düşürmektedir (Weng & Sagoe-Crenstil, 2007)

Sodyum silikat ve sodyum hidroksit kütlesi oranları uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımına önemli derecede etki etmektedir. Şekil 2.11'de görülebileceği gibi basınç dayanımı sodyum silikat/sodyum hidroksit kütle değeri 2.5 değerine kadar artmakta ve sonrasında düşmektedir. Basınç dayanımındaki 2.5 değerine kadar olan artış sodyum silikat miktarından etkilenen geopolimerin mikro yapısındaki değişimle açıklanmaktadır. Öte yandan 2.5 değerinden sonraki basınç dayanımındaki düşüş ise sodyum silikat oranın sodyum hidroksit oranına yüksekliğinden, yani; sodyum hidroksit miktarının geopolimer dizilimi esnasında

çözünme işleminin tamamlanmasında yetersiz kalmasından kaynaklanmakdır (Joseph & Mathew, 2012)

2.9.3 Cüruf-Uçucu Kül Karışımlı Geopolimer Betonda Basınç Dayanımı

Cüruf-Uçucu kül geopolimer betonda cüruf/uçucu kül oranlarına bağlı olarak basınç dayanımı değişmektedir (Lee & Lee, 2013).



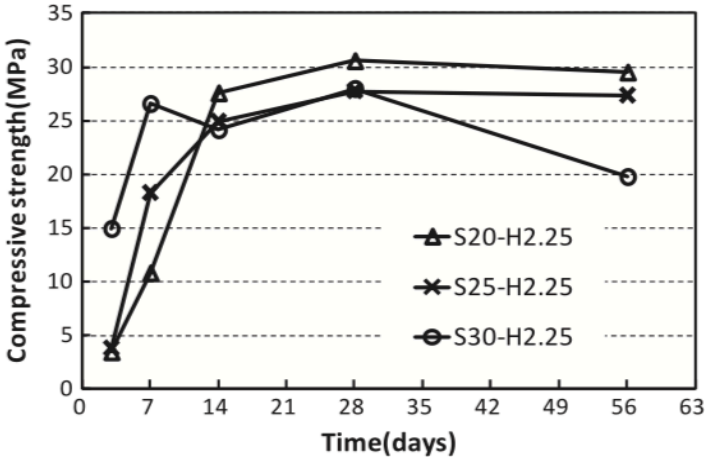
Şekil 2.17: Farklı cüruf/uçucu kül oranlarında geopolimer betonun basınç dayanımı (S10 %10 oranında S15 ise %15 oranında cüruf katılımını temsil etmektedir.) (Lee & Lee, 2013)

Şekil 2.17'de görüldüğü gibi (S10 %10 oranında, S15 ise %15 cüruf katılımını temsil etmektedir.) uçucu kül-cürüf karışımındaki cüruf oranı %10 değerinden %15'e arttıkça basınç değeri 15 MPa'dan 23 MPa'ya yükselmektedir.

%100 uçucu kül ile üretilen geopolimer beton ile daha önce yapılan çalışmalar oda sıcaklığında reaktivitenin çok düşük olduğu göstermektedir. Bu durumdan dolayı bazı çalışmalarda yüksek sıcaklıkta kürleme yöntemi seçilmiştir (Lee & Lee, 2013). Ancak N.K.Lee ve H.K Lee yaptığı bir çalışmada basınç dayanımını yüksek CaO içeren bir bağlayıcı olan cürüf ekleyerek elde etmişlerdir. Cüruf bağlayıcısının kullanılması CaO'nun amorf yapıdaki Ca-Al-Si jeli formundan meydana gelen geopolimer jelin gücünü yada dayanımını geliştirmesinden kaynaklanmaktadır. Kumar ve diğ. (2010) cüruf eklenmesiyle meydana gelen artışın jel fazlarının (C-SH ve A-S-H) diziliminden ve mikro yapının kompaktlığından (sıklığından)

dolayı sonuçlanabileceğini ve oda sıcaklığında gerçekleşen (27^{O}C) alkali aktivasyonda uçucu kül/cüruf karışımında cüruf bağlayıcısının baskın olduğunu, 60^{O}C'lik sıcaklıkta ise uçucu kül-cürüf etkileşiminin baskın olduğunu belirtmektedirler. Lloyd ve diğ. (2009) bir çalışmasında uçucu kül-cüruf bağlayıcılı geopolimer betonda kalsiyumun microanalizini göstererek kalsiyumun (cüruf içeriği) erken dayanımdaki temel etken olduğu sonucuna varmışlardır.

Uçucu kül-cüruf esaslı geopolimer betonda cüruf katkısı optimum bir değere dayanmaktadır. Şekil 2.18'de N.K Lee ve H.K Lee yaptıkları bir çalışmada karışım için optimum cürüf katılımın %20 olduğunu belirtmektedirler.



Şekil 2.18: Uçucu kül-cüruf kullanım oranlarına göre basınç değerleri. (S20 %20, S25 %25 ve S30 %30 cüruf katılımı temsil etmektedir (Lee & Lee, 2013).

2.10 GEOPOLİMER BETONUN YARMADA ÇEKME DAYANIMI

Betonun çekme dayanımı performansında oldukça kırılgan bir malzeme özelliği göstermektedir. Portland çimentolu geleneksel betonun çekme dayanımı (f_{ct}) geniş bir şekilde araştırılmıştır. Portland çimentolu betonun çekme dayanımı geleneksel yarmada çekme dayanımı testine tabi tutularak yada basınç dayanımı (f'_c) kullanılarak hesaplanmaktadır (Ding, et al., 2016).

ACI 318 kodu f_{ct}'nin yarmada çekme dayanımı (MPa) ve f'_c'nin basınç dayanımı (MPa) olduğu denklem 2.1'i kullanarak betonun çekme dayanımının basınç dayanımı ile elde edilebileceğini belirtmektedir (Ding, et al., 2016).

$$f_{ct} = 0.56\sqrt{f'_c} \tag{2.1}$$

Tam tersine ortalama çekme dayanımı ile ile f_{ck}'nın silindirik karakteristik basınç dayanımı arasındaki ilişki Eurocode 2 standardı tarafından önerilmiş ve f_{ck}'nın karakteristik basınç dayanımı, f_{cm}'nin ortalama basınç dayanmı (MPa), f_{ctm}'nin ortalama çekme dayanımı (MPa) ve $f_{ct.sp}$'nin ise yarmada çekme dayanımı olduğu denklem 2.2,2.3 ve 2.4'ü kullanarak hesaplanabileceği belirtilmiştir (Ding, et al., 2016).

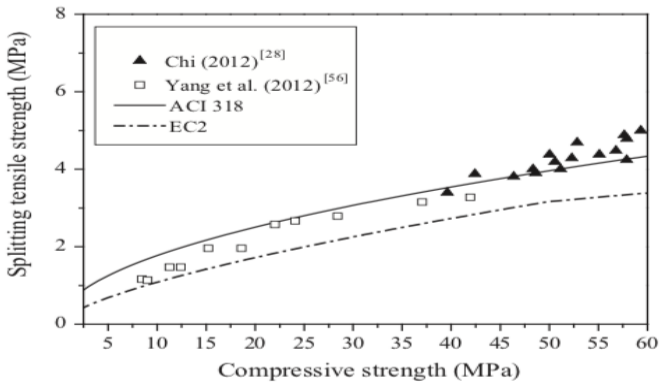
$$\begin{cases} f_{ctm} = 0.3{f_{ck}}^{2/3}, \leq 50MPa \\ f_{ctm} = 2.12xln\left(1 + \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)\right), f_{ck} \geq 50\ MPa \end{cases} \tag{2.2}$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \tag{2.3}$$

$$f_{ctm} = 0.9f_{ct.sp} \tag{2.4}$$

2.10.1 Cüruf Esaslı Geopolimer Betonun Yarmada Çekme Dayanımı

Yang ve diğ. (Yang, et al., 2012, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi) farklı su/bağlayıcı oranlarında ve kalsiyum hidroksit aktivatöründe cürüf esaslı geopolimer betonun yarmada çekme dayanımnı çalışmışlardır. Yaptıkları çalışmada elde ettikleri yarmada çekme dayanımlarının Eurocode 2 standardından öngörülerinden daha yüksek olduğunu ancak ACI 318 standardı ile uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır. (bkz: Şekil 2.19)

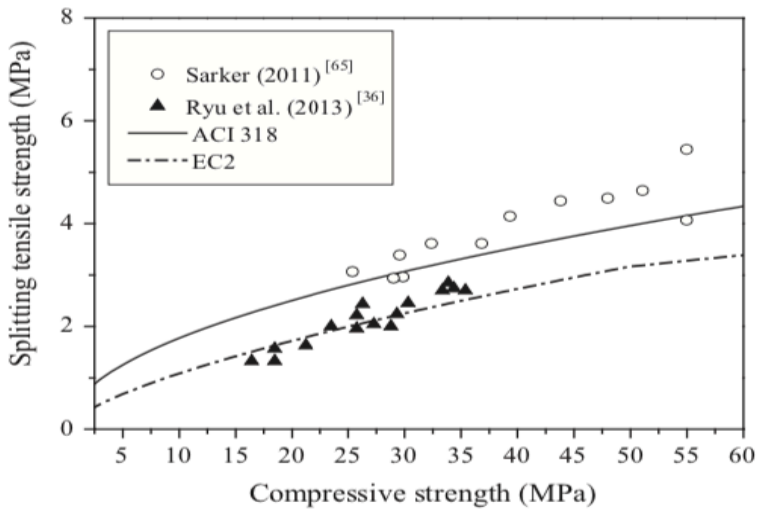


Şekil 2.19: Cüruf esaslı geopolimer betona ait yapılmış farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisi ve bu ilişkide standartların uyumluluğu (Yang, et al., 2012, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi).

Benzer şekilde Chi (2012) sodyum silikat ve sodyum hidroksit karışımlı cürüf esaslı geopolimer betonun yarmada çekme deneyini çalışmış ve elde edilen sonuçların ACI318 standart kodu tahminleri oldukça uyumlu olduğu göstermiştir. (bkz: Şekil 2.19)

2.10.2 Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonda Yarmada Çekme Dayanımı

Ryu ve diğ. (Ryu, et al., 2013, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi) Eurocode 2'nin tahminine oldukça uygun olan uçucu kül esaslı geopolimer betonunun yarmada çekme mukavemeti için bazı deneysel sonuçlar elde etmişlerdir. Bununla birlikte, şekil 2.20'de Sarker ve diğ. (2013, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi) tarafından elde edilen uçucu kül esaslı geopolimer betonunun yarmada çekme mukavemetlerinin, Ryu ve diğ. tarafından elde edilenlerden biraz daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 2.20: Uçucu kül esaslı geopolimer betona ait yapılmş farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanmı ilişkisi ve bu ilişkide standartların uyumluluğu. (Sarker, et al., 2013, Ryu, et al., 2013, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi)

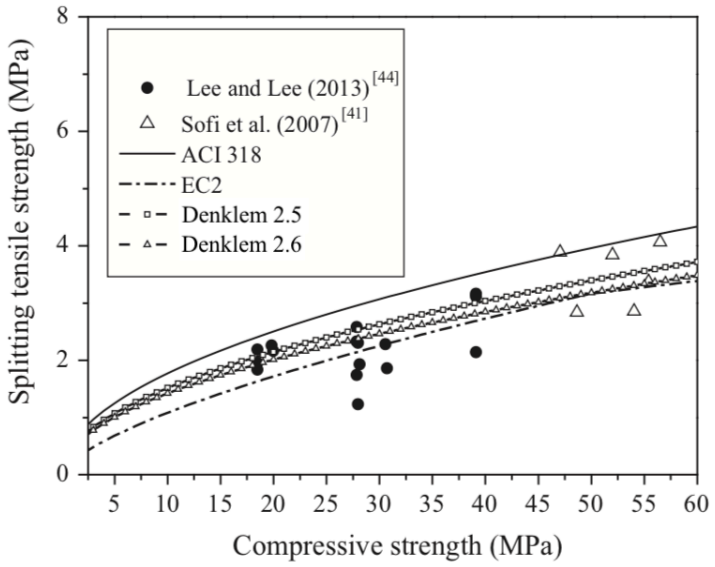
2.10.3 Cüruf-Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Betonda Yarmada Çekme Dayanımı

Sofi ve diğ (2007, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi) uçucu kül esaslı geopolimer betonunun ölçülen yarmada çekme mukavemetlerinin çoğunun ACI yapı kodu 318 tarafından öngörülenden daha düşük olduğunu bulmuşturlar. Yaptıkları deneysel sonuçlara göre cüruf-uçucu kül esaslı yarmada çekme dayanımları denklem 2.5'e göre tahmin edilebilmektedir. Benzer şekilde Lee & Lee (2013, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi) cürüf-uçucu kül esaslı

geopolimer betonların yarmada çekme dayanımlarının basınç dayımının karekökleri ile lineer bir bir ilişkisi olduğunu ve 0.45 orantı sabiti ile denklem 2.6'daki gibi tahmin edilebileceğini ifade etmektedirler. (bkz: Şekil 2.21)

$$f_{ct=0.48}\sqrt{f'_c} \tag{2.5}$$

$$f_{ct=0.45}\sqrt{f'_c} \tag{2.6}$$

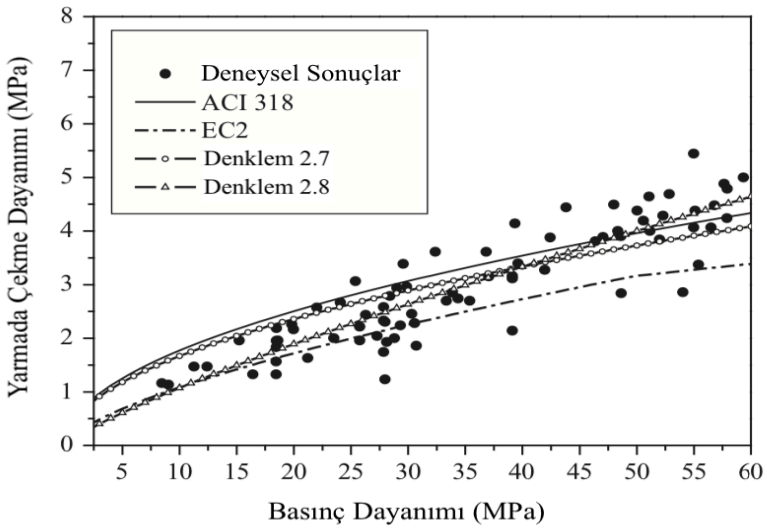


Şekil 2.21: Uçucu kül esaslı geopolimer betona ait yapılmış farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanmı ilişkisi ve bu ilişkide standartların denklemleri ile araştırmacı denklemlerinin sonuçlar ile uyumluluğu. (Sofi, et al., 2007, Lee & Lee, Ding, et al., 2016'da bahsedildiği gibi)

Geopolimer beton için yapılmış yarmada çekme dayanımlarının büyük çoğunluğu ACI yapı 318 veya Eurocode 2 standartı ile yakın bir ilişkiye sahiptir. Şekil 2.22 Ding ve diğ. (2016) yapmış oldukları çalışmada bütün sonuçları grafik üzerine koyarak ACI yapı 318'e ve Eurocode 2'ye benzer iki denklem (2.7 ve 2.8) tanımlamakta ve sınırlı deneysel sonuçlar göz önüne alındığında önerilen denklemlerin geçerliliğinin daha fazla doğrulanması gerektiğini ifade etmektedirler.

$$f_{ct=0.527}\sqrt{f'_c} \tag{2.7}$$

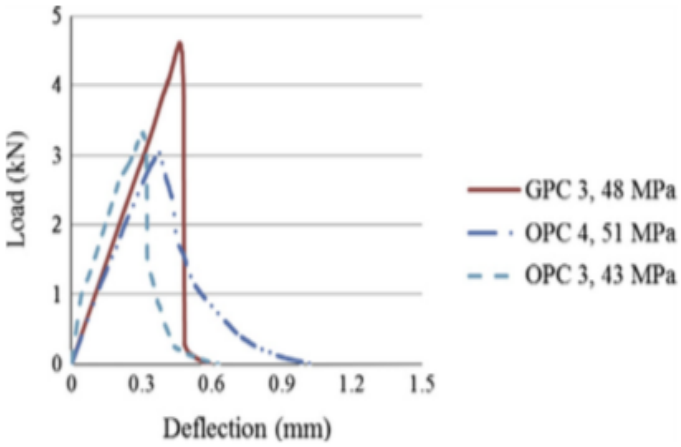
$$f_{ct=0.163}(f'_c)^{0.818} \tag{2.8}$$



Şekil 2.22: Özet uçucu kül-cüruf esaslı geopolimer betona ait yapılmış farklı çalışmaların basınç dayanımı-yarmada çekme dayanmı ilişkisi (Ding, et al., 2016).

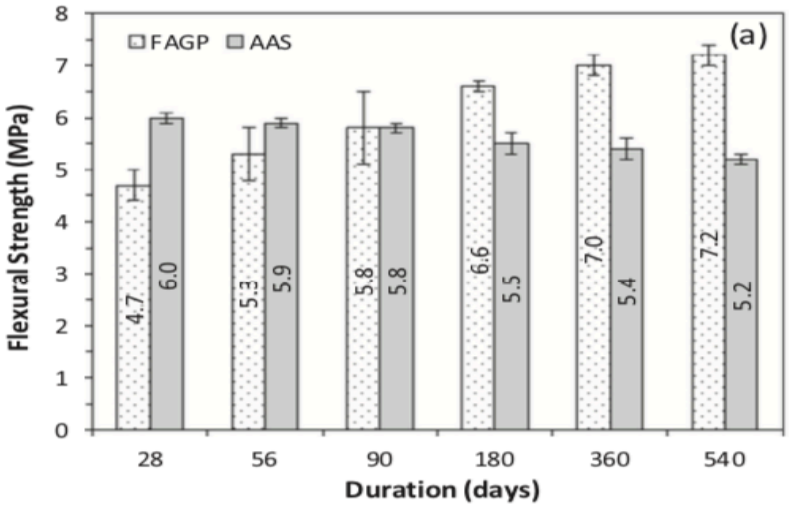
2.11 GEOPOLİMER BETONDA EĞİLME DAYANIMI

Sarker ve diğ. (2013) ısı uygulama ile kürlenmiş uçucu kül esaslı geopolimer beton ile ilgili yaptıkları bir çalışmada yük-deplasman kontrolünü incelemiş ve çoğunlukla uçucu kül esaslı geopolimer betonunun pik yükünün portland çimentolu betona nazaran yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. Sarker ve diğ. (2013) uçucu kül esaslı geopolimer betonun yük-deplasman eğrisindeki post-peak davranışının portland çimentolu betonlara kıyasla daha dik ve hızlı düşen bir davranış gösterdiğini belirtmektedirler. Yine yüksek basınç dayanımlı uçucu kül esaslı geopolimer betonun post-peak davranışlarının daha dik olduğu belirtilmektedir (bkz: Şekil2.23).



Şekil 2.23: Uçucu kül esaslı geopolimer beton (şekilde GPC) ve geleneksel Portland çimentolu betonun (şekilde OPC) yük-deplasman eğrisi altındaki davranış farkları (Sarker, et al., 2013).

Arie ve diğ. (2017) uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimer betonun uzun dönemli performanslarını karşılaştırdıkları bir çalışmada her iki bağlayıcı için eğilme dayanımı özelliğini incelemişlerdir. Arie ve diğ. elde ettiği sonuçlarda uçucu kül esaslı geopolimer betonun basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da zamanla artış gösterme eğiliminde olduğunu belirtmişler ve uçucu kül esaslı geopolimer betonun eğilme dayanımının %53.2'sini 28-365 gün arasındaki periyotta kazandığını tespit etmişlerdir. Tam tersine olarak cüruf ile üretilen betonun 540 gün sonunda %13.3'lük bir düşüş yaşadığını ancak cüruf ve uçucu kül bağlayıcılı geoolimer betonun 90 günlük eğilme dayanımının aynı olduğunu belirtmişlerdir (bkz: Şekil 2.23). Cüruf ve uçucu kül esaslı geopolimer beton için eğilme dayanımlarının yaklaşık 6 MPa olduğu ifade edilmiştir.

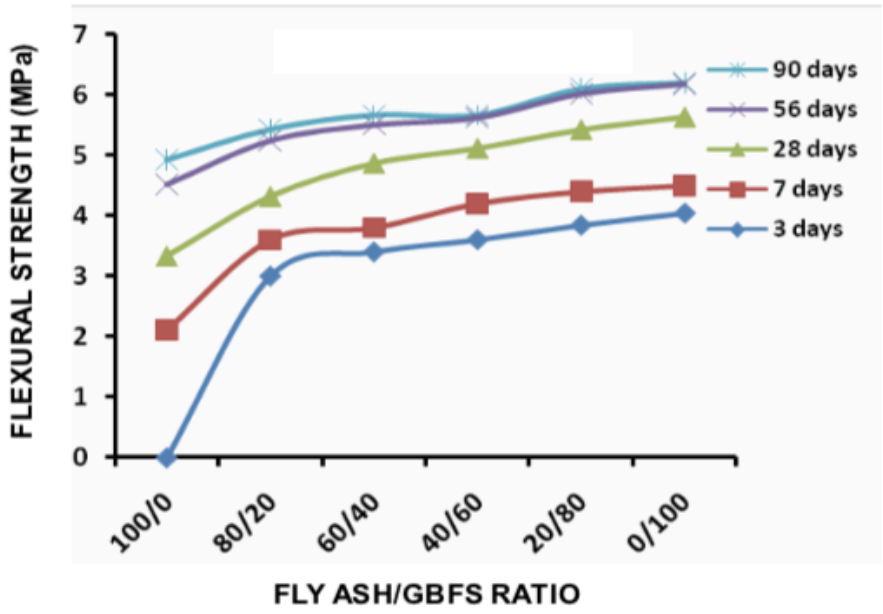


Şekil 2.24: Uçucu kül ve cüruf esaslı geopolimer betonun uzun süreli eğilme dayanımlarının değişimi. (Arie, et al., 2017)

Manjutnatha ve diğ. (2014) ortam sıcaklığında kürlenmiş uçucu kül-cüruf esaslı geopolimer betonun mekanik özelliklerini inceledikleri bir çalışma yapmışlardır. Çeşitli bağlacıyı kompozisyonlarındaki çalışmalarında %100 uçucu kül ve %80 uçucu kül-%20 cüruf ile elde edilen numunelerindeki eğilme dayanımı artışının 3 ila 7 gün arasında çok hızlı olduğunu ve ilerleyen zaman içerisinde yavaş bir dayanım kazanımının gerçekleştiğini belirtmektedirler. Şekil 2.25 uçucu kül-cüruf karışım oranlarına göre geopolimer betonun eğilme dayanımını göstermektedir.

Sofi ve diğ. (2007) buhar kürü ile üretilmiş geopolimer betonların 7-28 günlük uçucu kül için eğilme dayanımlarının 4.2'den 5.3 MPa'ya , cüruf ile üretilmiş betonların ise 4.9'dan 6.2 MPa'ya yükseldiğini ve her iki bağlayıcı için elde edilen basınç dayanımları ile eğilme dayanımları arasında bir orantı olduğu belirtmektedirler.

Geopolimer betonun farklı varyasyonlarda eğilme ve yarmada çekme dayanımı gelişimleri aşağı yukarı basınç dayanımı gelişimleriyle aynı trendi göstermektedir. (Manjunatha, et al., 2014)



Şekil 2.25: Uçucu kül-cüruf bağlayıcı oranlarına göre eğilme dayanımındaki değişim (Manjunatha, et al,, 2014)

2.12 GEOPOLİMER BETONDA YÜKSEK SICAKLIK

Geopolimer beton ısı direnci özellikleri anlamında geleneksel portland çimentolu betonlara nazaran açık bir şekilde üstünlük göstermektedir. Ancak geopolimer betonun artırılmış yüksek sıcaklıkta detaylı davranışı hakkında yeterli araştırmalar yapılmamış olup bu boşlukların doldurulması talep edilmektedir (Hassan, et al., 2019).

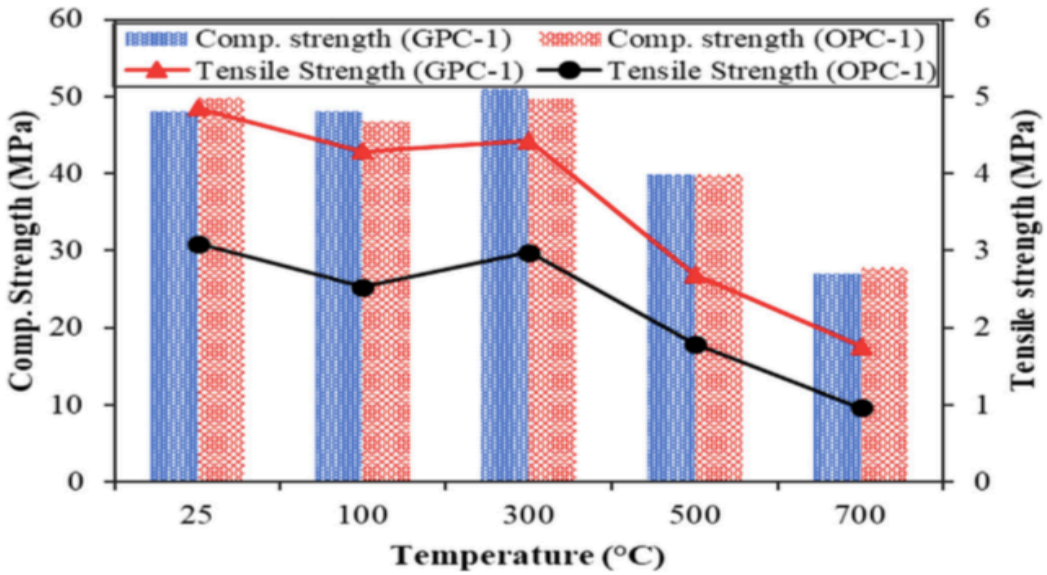
Kong ve Sanjayan (2008) yüksek sıcaklıkta geopolimer betonun ana fazı (matris) ile iri agreganın genleşmesi arasında bir uyumusuzluk olduğunu belirtmektedirler. Kong ve Sanjayan (2008) 800 ^{o}C sıcaklıkta geopolimer matrisin %1 oranında küçüldüğünü belirtirken belirli miktar agreganın %2.5'e kadar genişleme yaptığını ifade etmişler ve ilerleyen sıcaklıklarda geopolimer betondaki dayanım kaybını gözlemlemişleridir. Geopolimer betonun matris ve agraga arasındaki bu uyumsuzluk durumu ısı direncine ciddi etki etmektedir. Bu konuda literatür ileriye yönelik çalışmalar yapılması gerektiğini belirtmektedir (Hassan, et al., 2019).

Manola ve diğ. (2015) ve Junaid ve diğ. (2014) geopolimer betonun yüksek sıcaklık özelliklerini incelemişler ve geopolimer betonun GPÇ (Geleneksel Portland Çimentosu) ile üretilmiş betonlara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir.

Wan Mastura ve diğ. (2013) metakaolin, sodyum silikat ve potasyum hidroksit ile üretilmiş geopolimer betonların iyi ısı direnci gösterdiklerini 1400 C°'ye varan ısıl kararlılığın olduğunu belirtmişlerdir.

Mathew ve Joseph (2018) uçucu kül bağlayıcısı ile üretilmiş geopolimer betonların potasyum hidroksit aktivatörü kullanıldığında sodyum aktivatörü kullanıldığına nazaran daha iyi ısı direnci gösterdiklerini ve 800 C°'de sodyum ile üretilen uçucu kül esaslı geopolimer betonun potasyum hidroksit ile üretilenlere kıyasla daha fazla rötre, çatlak ve dayanım kaybı yaşadığını ifade etmişlerdir. Mathew ve Joseph bu durumu ortalama boşluk büyüklüğünden dolayı kaynaklandığını belirtmektedirler.

Fan ve diğ. (2018, Hassan, et al., 2019'da bahsedildiği gibi) GPÇ ile üretilmiş beton ile geopolimer betonun ısı direncini karşılaştırdıkları çalışmalarında Şekil 2.26'da görüldüğü gibi her iki beton cinsi için basınç ve çekme dayanımlarındaki azalma trendlerinin benzer olduğunun göstermektedirler.



Şekil 2.26: Geopolimer ve OPC ile üretilmiş betonun artırılmış yüksek sıcaklıktaki basınç ve çekme dayanımlar (Fan, et al., 2018, Hassan, et al., 2019'da bahsedildiği gibi)

Guirrier ve diğ. (2009a) cüruf ile üretilmiş geopolimer betonun dayanım performansının 400-800 C° sıcaklıkları arasında GPÇ ile üretilmiş beton ile aynı performansı gösterdiğini ve 800

C° sıcaklıkta geopolimer betonun kalan dayanımının ilk dayanımın %10'u oranında olduğunu belirtmişlerdir. Yine Guerrier ve diğ. (2009b) bu sefer cürüf ile üretilmiş geopolimer harç üzerine yaptıkları bir çalışmada özellikle seçilmiş düşük ilk dayanımlı geopolimer harçların 800 C°'ye maruz bırakıldıktan sonraki dayanımlarının, ilk dayanımlarına göre %90 arttığını belirtmektedirler. Araştırmacılar bu durumu reaksiyona uğramamış bağlayıcıların hidratlaşması ve sinterleştirmesi ile açıklamaktadırlar. Bunun tam tersi olarak yüksek ilk dayanıma sahip geopolimer harçların ilk dayanımlarının %90'ını kaybettiği Guirrier ve diğ. tarafından belirtilmektedir.

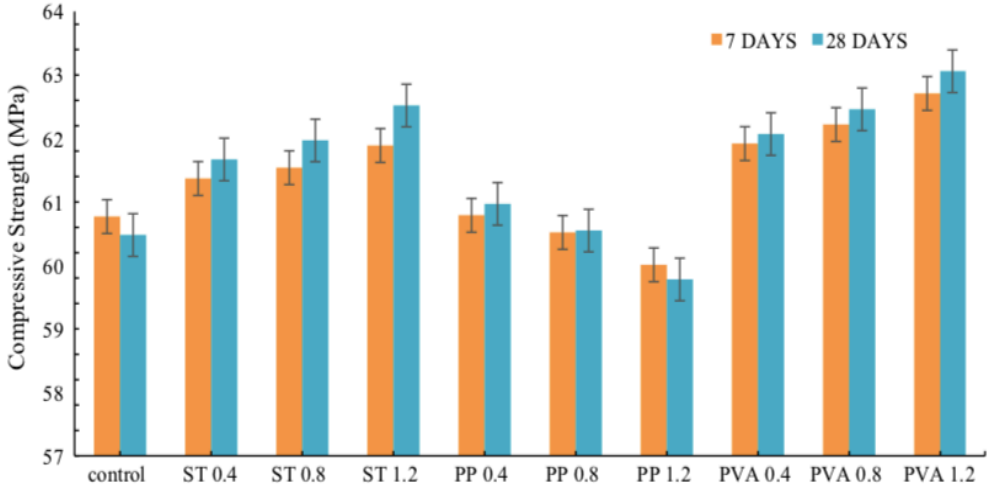
Junaid ve diğ. (2017) uçucu kül esaslı geopolimer betonun 20-200 C° arasında dayanımında düşüş yaşadığını ancak 200-400 C° arasında kayda değer bir dayanım kazanımı elde ettiğini ifade ederlerken 800 C° sonrası ciddi anlamda dayanım kaybı olduğunu da belirtmektedirler.

2.13 LİFLİ GEOPOLİMER BETON

Beton düşük çekme dayanımı sebebiyle gevrek bir davranış sergilemektedir. Beton içerisine sürekli veya kısa lif eklenilmesi çekme, çekme uzaması, tokluk ve enerji absorbsiyon kapasitesinin artmasına sebep olmakta ve betonun gevrek davranışından kurtularak ve sünek bir malzeme davranışı formuna geçmesine izin vermektedir (Shaikh, 2013). Lif etkisinin mekanik ve durabilite davranışlarını belirlemek amacıyla geopolimer beton üzerinde çeşitli tipte ve oranlarda lif ile kullanımı ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır (Al-Mashhadani, et al., 2018).

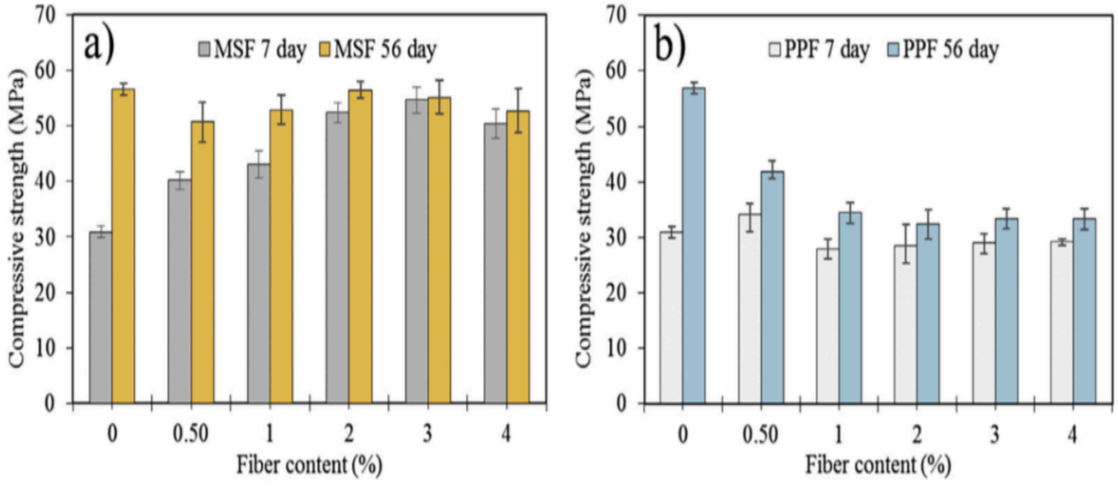
2.13.1 Lifli Geopolimerlerde Basınç Dayanımı

Al- Mashhadani ve diğ. (2018) uçucu kül esaslı olmak üzere farklı oranlarda (%0.4, %0.8 ve %1.2) çelik (ST), polipropilen (PP) ve polivinil alkol (PVA) lifler kullanarak geopolimer harçların mekanik özelliklerini incelmişlerdir. Araştırmacılar fiber artışının harçların basınç dayanımlarında kayda değer bir artışa sebep olmadığını belirtmektedirler. %1.2 oranında 7 ve 28 günlük dayanımların her ikisinde çelik ve polivinil alkol lif kullanımı en yüksek basınç dayanımını verirken kontrol harçlarına göre sadece %3.37 ve %4.26'lık basınç dayanımı artışı gözlemlenmiştir. Üç çeşit lif kullanımı arasında şekil 2.27'de görüldüğü gibi en düşük dayanım sonuçlarını polipropilen (PP) lif ile üretilmiş harçlar sergilemiştir.



Şekil 2.27: Lif çeşitlerine ve oranlarına göre geopolimer harçların basınç dayanımı (Al-Masshadani, et al., 2018)

Ranjbar ve diğ. (2016) uçucu kül esaslı hacimce %0.5, %1, %2, %3 ve %4 oranlarında polipropilen (PP) ve çelik (ST) lif kullanılarak geopolimer kompozit üretmişlerdir. 7 ve 56 günlük dayanımında her iki cinsteki lif oranının basınç dayanımına etkisini şekil 2.28'deki gibi göstermektedirler.



Şekil 2.28: Çelik (MSF) ve polipropilen (PPF) lifli geopolimer kompozitte lif oranına basınç dayanımı değişimi (Ranjbar, et al., 2016).

Ranjbar ve diğ. (2016) çelik lif kullanımı artışının 7 günlük erken dayanımda %3 lif kullanımına kadar gözle görülür bir şekilde arttığını gösterirlerken uzun dönem dayanımlarda lif kullanım oranının artışının basınç dayanımına belirgin bir katkı yapmadığını ifade etmektedirler. Tam tersine olarak araştırmacılar erken dayanımda polipropilen (PP) lif artışının basınç dayanımına herhangi bir etkisi olmadığını belirtirken, 56 günlük dayanımda polipropilen lif kullanım oranındaki artışın basınç dayanımında ciddi bir basınç dayanımı azalmasına sebep olduğunu göstermektedirler.

Guo ve Pan (2018) tarafından liflerin geopolimer betonda mekanik etkisini araştırmak için yapılmış çalışmada uçucu kül-çelik cürüf esaslı geopolimer beton numuneler üretilmiştir. Polipropilen, bazalt ve çelik liflerin kullanıldığı çalışmada her bir lif sınıfı için hacimce % 0.1, %0.2, %0.3, %0.4 ve %0.5 oranlarında lif kullanılmıştır. 28 günlük dayanım için polipropilen lif kullanımında maksimum dayanım % 0.2 oranında lif kullanımında elde edilirken artan lif kullanımı için dayanımda dikkate değer bir değişim gözlenmemiştir. Yine 28 günlük dayanımda çelik lif için maksimum dayanım % 0.4 lif oranında elde edilirken %0.5 oranında az bir düşüş gözlenmiştir. Yapılan araştırmada polipropilen lif kullanım oranının artışının lifsiz oranlara göre basınç dayanımına ciddi bir katkısı olmadığı ancak çelik lifte lif kullanım oranının artışının lifsiz olanlara göre % 22.9'luk bir artışa sebebiyet verdiğini ve çelik lifin üç lif arasında en iyi dayanım sonuçlarını verdiğini göstermektedirler.

Bernal ve diğ. (2010) çelik lif kullanımının cüruf esaslı geopolimer betona etkisini araştırmışlardır. Bernal ve diğ. çelik lif eklenmesinin hem geleneksel portland çimentolu betonda hemde cüruf esaslı geopolimer betonda lifsiz olanlarına nazaran düşüşe sebebiyet verdiğini göstermektedirler. Çelik liflerin betondaki hacminin yani oranının artışıyla basınç dayanımındaki düşüşün daha fark edilebilir ve göze çarpar olduğu ifade edilmektedir.

2.13.2 Lifli Geopolimerlerde Yarmada Çekme Dayanımı

Bernal ve diğ. (2010) cüruf esaslı geopolimer beton üretiminde farklı oranlarda çelik lif kullanarak ürettikleri numuneler üzerinde yarmada çekme dayanımı performansını incelemişlerdir. Araştırmacılar 28 günlük kür sonunda 40 kg/m^3 oranında çelik lif kullandıkları numunelerde lifsiz üretilen numunelere kıyasla %6.4 dayanım artışı elde ederlerken 120 kg/m^3 çelik lif oranında ürettikleri numunelerde lifsiz üretilmiş numunelerin dayanımlarına kıyasla %23.7 gibi dikkate değer bir dayanım artışı gözlemlemişlerdir. Sonuçlar 7 ve 14 günlük

dayanımlar içinde aynı paralelliktedir. Araştırmada referans niteliğinde üretilen geleneksel Portland çimentolu beton numunelerde çelik lif oranındaki artış ile beraber yardama çekme dayanımında artış gözlense de bu artışın geopolimer beton numunelerinden elde edilen yarmada çekme dayanımlarının oldukça gerisinde kaldığı belirtilmiştir. Maksimum yük ile ilişkili olan eğilmenin çelik lif oranının artırımıyla geliştirilebileceği sonucu araştırmacılar tarafından belirtilmektedir.

Patil ve Patil (2015) farklı oranlarda ve genişliklerdeki polipropilen lif kullanımının uçucu kül esaslı geopolimer betondaki etkisini araştırmışlardır. Araştırmacılar polipropilen hacim fraksiyonun artışıyla yarmada çekme dayanımın arttığını ve maksimum yarmada çekme dayanımı elde ettikleri lif sınıfının lifsiz üretilen numunlere kıyasla %12.2'lik bir dayanım artışına sebep olduğunu ifade etmektedirler.

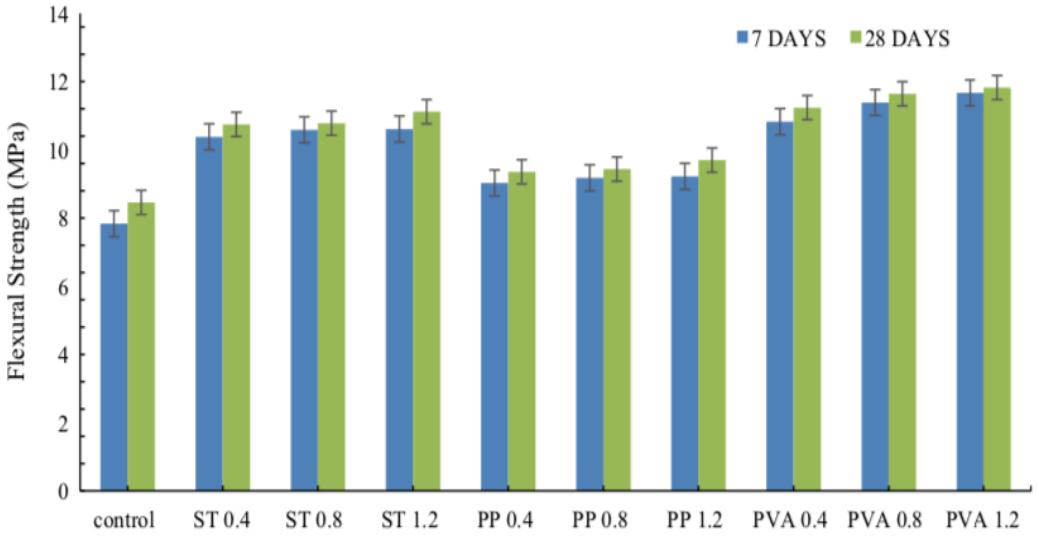
2.13.3 Lifli Geopolimerlerde Eğilme Dayanımı

Beton yada harçta fiber malzeme eklenilmesindeki ana gaye gevrek kırılmayı sünek davranışa yneltmek, eğilme ve çekme dayanımını artırmaktır. Çimento bazlı fiber kompozitlerde olduğu gibi fiber takviyeli geopolimer kompozitlerinde çekme ve eğilme dayanımları artmaktadır (Shaikh, 2013).

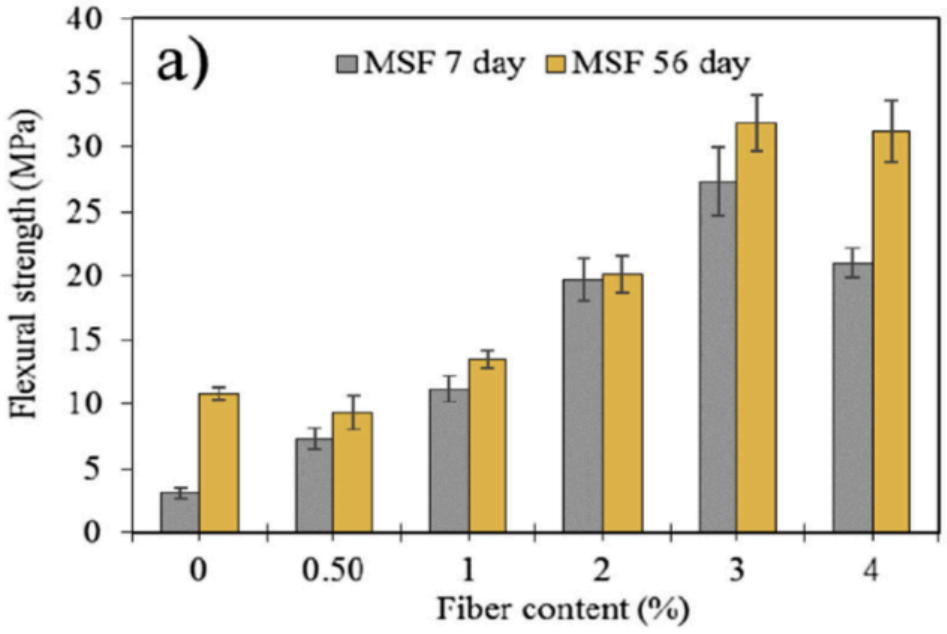
Al- Mashhadani ve diğ. (2018) uçucu kül esaslı olmak üzere farklı oranlarda (%0.4, %0.8 ve %1.2) çelik (ST), polipropilen (PP) ve polivinil alkol (PVA) lifler kullanarak geopolimer harçların mekanik özelliklerini incelmişlerdir. Lif kullanımının eğilme dayanımı açısından kontrol numunelerine kıyasla dikkate değer bir dayanım yüzdesi kazandığı ifade edilmektedir. 28 gün için %1.2 çelik ve polivinil alkol lif kullanım oranlarında kontrol numunelerine kıyasla sırasıyla %31.45 ve %39.84'lük gözlenmiştir. Çalışmadaki farklı tipte lifler ve lif oranına göre eğilme dayanımdaki artış Şekil 2.29'da gösterilmektedir.

Ranjbar ve diğ. (2016) uçucu kül esaslı hacimce %0.5, %1, %2, %3 ve %4 oranlarında polipropilen (PP) ve çelik (ST) lif kullanılarak ürettikleri geopolimer beton numunelerinde çelik lif kullanımının eğilme dayanımında dikkat çekici bir artışa sebep olduğunu belirtmektedirler. Çalışmada %3 oranında daha fazla (%4 gibi) lif kullanımının dayanımda çok az da olsa bir dayanım düşüşüne sebep olduğunu ve bu durumun taze beton esnasındaki sıkışma, kalıplamadaki zorluk, vibrasyon ve fazla boşluk içeriğinden kaynaklı zayıf fiber-matris temasından kaynaklı olduğunu belirtmektedirler. Araştırmacıların çelik lif kullanımında elde

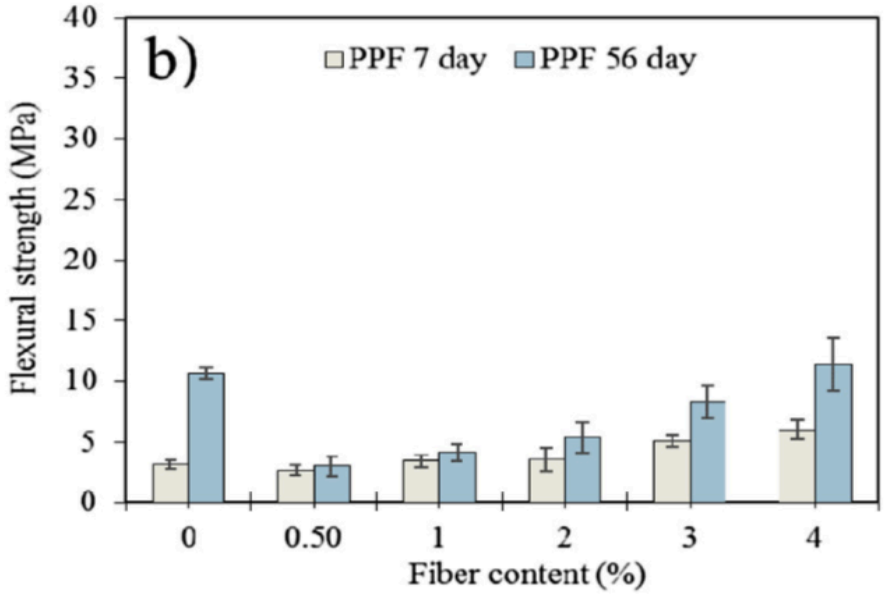
ettikleri eğilme dayanımı trendi Şekil 2.30'da gösterilmektedir. Öte yandan polipropilen lif için 56 günlük dayanımda lif kullanım oranı artışının dayanımda negatif bir etki yaptığını ve dayanım gelişimini devre dışı bıraktığı Şekil 2.31'deki gibi rapor edilmektedir.



Şekil 2.29: Lif tipi ve oranlarına göre eğilme dayanımındaki değişim (Al- Masshadani, et al., 2018).



Şekil 2.30: Uçucu kül esaslı geopolimer betonda 7 ve 56 günde çelik lif kullanımındaki eğilme dayanımı değişimi (Ranjbar, et al., 2016)

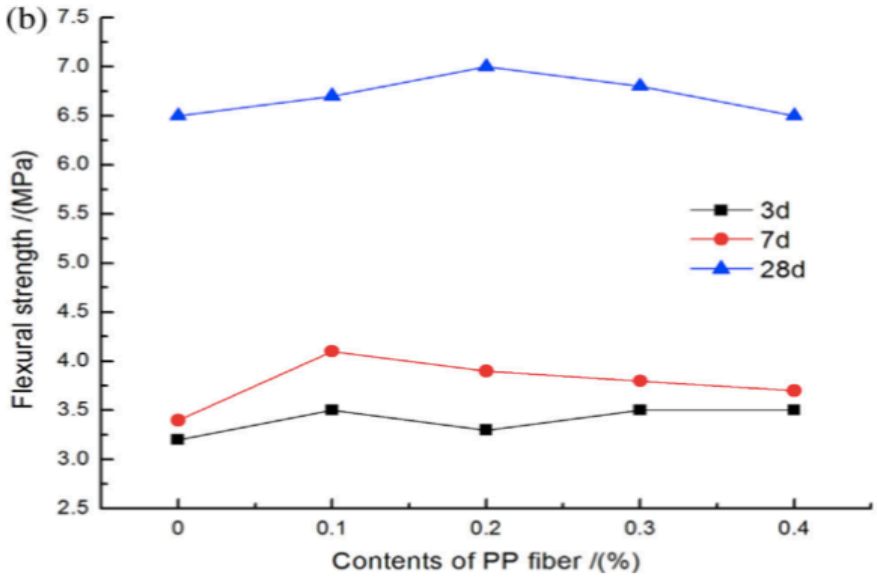


Şekil 2.31: Uçucu kül esaslı geopolimer betonda 7 ve 56 günde polipropilen lif kullanımındaki eğilme dayanımı değişimi (Ranjbar, et al., 2016)

Bernal ve diğ. (2010) çelik lif kullanımının cüruf esaslı geopolimer betona etkisini araştırmışlardır. 7, 14 ve 28 günlük dayanımların araştırıldığı çalışmada kontrol numunelerine nazaran tüm yaşlarda eğilme dayanımlarının arttığı belirtilmiştir. Çalışmada genel olarak çelik lifli geopolimer betonun muadil olarak üretilen çelik lifli portland çimentolu betona nazaran daha iyi bir eğilme dayanımı performansı gösterdiği görülmektedir. Geopolimer betona çelik lif eklemenin çatlak sonrası davranışını alternatif betonlara kıyasla daha iyileştirdiği belirtilmektedir.

Guo ve Pan (2018) tarafından liflerin uçucu kül-çelik cürüf esaslı geopolimer betonda mekanik etkisini araştırmak için polipropilen, bazalt ve çelik liflerin kullanıldığı çalışmada her bir lif sınıfı için hacimce %0.1, %0.2, %0.3, %0.4 ve %0.5 oranlarında lif kullanılmıştır. Guo ve Pan polipropilen lif kullanımında 28 günlük dayanım için hacimce %0.2'lik lif kullanımda kontrol numunelerine nazaran %7.7'lik bir artış gözlemlemişlerdir. Araştırmada hacimce %0.2'den fazla lif kullanım oranın eğilme dayanımında düşüşe sebep olduğu Şekil 2.32'de görülmektedir. Araştırmada kullanılan lifler arasında en fazla dayanım kazanımının hacimce %0.5 oranında çelik lifli geopolimer beton numunelerinde olduğu görülmektedir. 28 günlük dayanımda çelik

lifler %21.5 gibi dikkate değer bir dayanım artışına sebep olmaktadır. Araştırmacılar tarafından optimum lif kullanım oranı önerilmiştir.



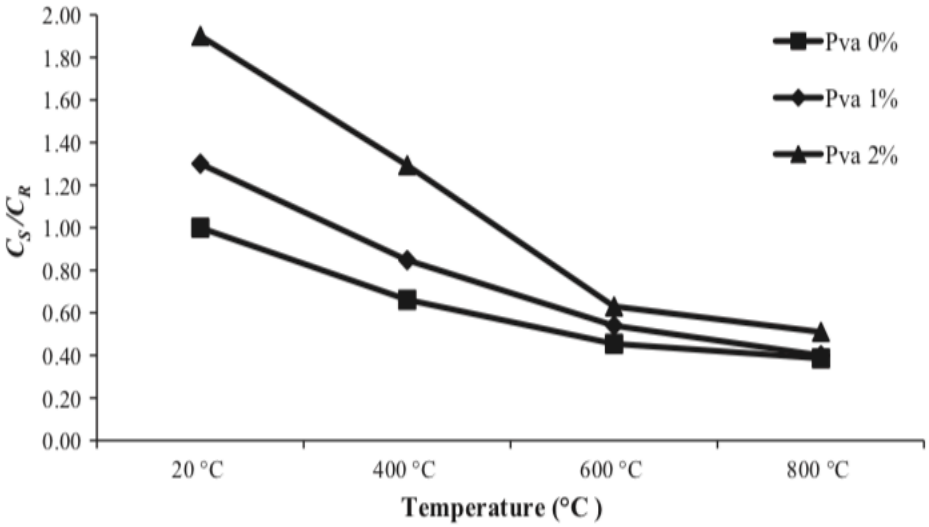
Şekil 2.32: Polipropilen (PP) lif oranına göre eğilme dayanımı değişimi (Guo & Pan, 2018)

2.13.4 Lifli Geopolimerlerde Yüksek Sıcaklık Etkisi

Lifli geopolimer betonun mekanik özellikleri üzerine kayda değer sayıda çalışma yapılmıştır. Ancak dayanıklılık (durabilite) özellikleri açısından lifli geopolimer beton üzerine yapılmış az sayıda çalışma mevcuttur. İnşaat alanında başarılı uygulamalar yapabilmek adına durabilite özellikleri mekanik özellikler gibi tatminkâr bir şekilde araştırılmalıdır (Sheikh, 2013). Özellikle durabilite özelliğinden olan yüksek sıcaklık etkisi altında lifli geopolimer betonun davranışı üzerine yapılmış çalışmaların çok az olduğu belirtilmelidir.

Tanyıldız ve Yonar (2016) bağlayıcı kütlesinin %0, %1 ve %2 oranlarında polivinil alkol lifli uçucu kül esaslı ürettikleri geopolimer betonda yüksek sıcaklık etkisini çalışmışlardır. Araştırmacılar 60, 80 ve 100 ºC ‘de kürledikleri geopolimer beton numuneleri her sıcaklıkta 1 saat ve 2.5 ºC/dakika hızında olmak üzere 20 ºC, 400 ºC, 600 ºC ve 800 ºC’lik ısıya maruz bırakmışlardır. Sıcaklık yükseldikçe numunelerin neredeyse tamamında basınç ve eğilme dayanımında düşüşler yaşandığı görülmektedir. Ancak kullanılan polivinil alkol (PVA) lif oranının artmasıyla beraber herhangi bir sıcaklıktaki eğilme ve basınç dayanımın da arttığı

görülmektedir (bkz Şekil 2.33). Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerin C_s ve kontrol numunelerinin C_r olarak ifade edildiği çalışmada 60 ^oC'de kürlenmiş numunelerin sıcaklığa ve kütlece lif oranlarına bağlı olarak C_s/ C_r değişimi Şekil 2.33'te gösterilmektedir.



Şekil 2.33: Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerin (Cs) kontrol numunelerine (Cr) oranının sıcaklığa bağlı değişimi ve PVA lif oranlarına göre davranışı (Tanyıldız & Yonar,2016).

Sarker ve Mcbeath (2015) 500x500mm boyutlarında, 125-175 mm kalınlığında değişen GPÇ beton ve uçucu kül esaslı geopolimer beton paneller üretmişlerdir. 2 saat boyunca 960 ^oC yüksek sıcaklığa maruz bırakılan ve panellerde 12 mm çelik donatı kullanılmıştır. Sıcaklık sonrası soğumaya bırakılan numuneler basınç yüklerine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklıklarda geopolimer beton numunelerin ısı transferinin aynı kalınlıklardaki geleneksel portland çimentolu numunelere nazaran daha yüksek olduğu belirtilmektedir. Yüzey çatlakları ve diğer çatlaklardan oluşan hasarların geopolimer betonda daha az olduğu rapor edilmektedir. Ayrıca oda sıcaklığına düşen panellere uygulanan yükler sonrasında geopolimer beton numunelerin geleneksel portland çimentolu numunelere kıyasla daha fazla yük tutabildiği ifade edilmektedir. Geopolimer beton numuneler ortalama %66 yük karşılayabilirken geleneksel protland çimentolu numuneler ortalama %52 oranında yük karşılayabilmişlerdir. Geopolimer betondaki bu kalıcı yükün diğerine nazaran fazla oluşu hızlı ısı transferi sayesinde önüne geçilen iç sıcaklık farkının az oluşu ile açıklanmaktadır.

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 GİRİŞ

Bu çalışma faklı lifler ve lif oranlarında, farklı bağlayıcılarda ve farkı bağlayıcı oranlarında üretilen geopolimer beton numunelerinin mekanik ve durabilite özelliklerini incelemek amacıyla çalışılmıştır. Mekanik özellikleri için basınç dayanımı, yarmada çekme, eğilme dayanımı, kiriş numunelerde yük-deplasman ve ultrases geçiş hızı deneyleri yapılmıştır. Dayanıklılık testleri için su emme, yüksek sıcaklık etkisi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde kullanılan malzeme ve materyallerin özellikleri, üretilen geopolimer beton numunelerin hazırlanması ve yukarıda bahsedilen deneysel çalışmaların detayları anlatılmaktadır.

3.2 MALZEMELER

3.2.1 Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Çalışma boyunca kullanılan öğütülmüş yüksek fırın cürufu Bolu Çimento Sanayi'nden alınmıştır. Cüfufun özgül ağırlığı 2.91 gr/cm^3 olup kimyasal özellikleri Tablo 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3.1: Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal bileşimi.

Oksitler	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	TiO_2	Kızdırma Kaybı
Miktar	40.5	12.8	1.1	35.5	5.8	0.18	0.79	0.75	0.03

3.2.2 Uçucu Kül

Çalışmada numune üretiminde kullanılan uçucu kül bağlayıcısı Zonguldak ilinin Çatalağzı ilçesinde bulunan ve elektrik üretimi için kullanılan Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Uçucu külün kimyasal bileşimindeki ana üç oksit (SiO_2, Al_2O_3 ve Fe_2O_3) toplam bileşimin %70'inden fazlasını oluşturmaktadır. Bu anlamda kullanılan uçucu kül ASTM C618 ve TS639 standartlarınca $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ değerinin %70 değerinin üzerinde olması ve CaO oranının %10'dan az olması hasebiyle F tipi uçucu kül sınıfına girmektedir. Kullanılan

uçucu külün özgül ağırlığı 1.96 gr/cm^3'tür. Uçucu külün kimyasal bileşimi Tablo 3.2'de gösterilmektedir.

Tablo 3.2: Uçucu külün kimyasal bileşimi.

Oksitler	Miktar (%)
SiO_2	58.75
Al_2O_3	25.24
Fe_2O_3	5.76
CaO	1.46
$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	89.75
CaO	1.46
MgO	2.22
SO_3	0.008
K_2O	4.05
Na_2O	0.60
Kızdırma Kaybı	1.12
Cl^-	0.015

3.2.3 Agrega

Çalışma esnasında ince agrega olarak 0-5 mm aralığında doğal kum, iri agrega olarak 5-12 mm aralığında kırmataş I (NO I) ve 12-16mm aralığında kırmataş II (NO II) kullanılmıştır. Tane boyutu olarak maksimum 16mm genişlik kullanılmıştır.

3.2.4 Kimyasal Aktivatörler

Çalışmada kimyasal aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na_2SiO_2) kullanılmıştır. Sodyum silikat çözeltisi ve sodyum hidroksit As Kimya Sanayi ve Tic. Firmasından tedarik edilmiştir. Katı olarak tedarik edilen sodyum hidroksit parçaları 12 molarlık çözelti yoğunluğuna göre hazırlanmış ve beton dökümünden bir gün önce saf su içerisinde çözündürülmüştür. Sodyum silikat ve sodyum hidroksit çözeltisinin fiizksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.3 ve 3.4'te gösterilmektedir.

Tablo 3.3: Sodyum silikat fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Sodyum Silikat	Su	Çözünürlük	pH	Yoğunluk (20 C°)	Kaynama Noktası (C°)
%35-40	%60-65	%100	11-12.4	1.3-1.5 gr/cm^3	102

Tablo 3.4: Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

NaOH (%)	Na_2CO_3 (%)	SO_4 (%)	Cl (%)	Al (%)	Fe (%)	pH	Yoğunluk	Kaynama Noktası
99	0.3	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.002	≤ 0.002	14	2.13 gr/cm^3	1388 C°

3.2.5 Polipropilen (PP) Lif

Geopolimer beton numunelerinin basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı, yük-deplasman ve yüksek sıcaklıktaki dayanım özelliklerini daha iyi anlayabilmek için polipropilen lifler kullanılmıştır. Polipropilen lifler Kordsa Teknik Tekstil A.Ş firmasından temin edilmiştir. Üretilen lifler ASTM C 1116 standardına göre üretilmiştir. Polipropilen liflerin teknik detayları Tablo 3.5'te gösterilmektedir. Şekil 3.1'de çalışmada kullanılan PP lifler gösterilmektedir. Karışım esnasında liflerin homojenize dağıldığı gözle gözlemlenmiştir.

Tablo 3.5: Polipropilen liflerin teknik özellikleri (Kordsa, 2020)

Polipropilen Lif	Karakteristik Özellikler
Fiber sınıfı	EN 14889-2 Sınıf II
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	0.91
Uzunluk (mm)	54-40
Çap (mm)	0.70
Çekme Gerilmesi (MPa)	550
Erime Sıcaklığı (C°)	160
Fiber Adedi/Kg	50.000
Alkali Direnci	Çok İyi
Korozyon Direnci	Çok İyi



Şekil 3.1: Çalışmada kullanılan polipropilen lifler.

3.2.6 Poliamid (PA) Lif

Çalışmada mekanik ve dayanıklılık özellikleri test edebilmek için Poliamid lifler kullanılmıştır. Poliamid lifler Kordsa Teknik Tekstil A.Ş firmasından temin edilmiştir. Poliamid lifler poliamid 6.6 hammaddesinden üretilmiştir. Poliamid lifler firma tarafından verilen bilgiler ışığında bünyesinde %5 oranında bünyesine nem alabilme kabiliyetine sahip olduğundan karışımdan önce hafif nemli bez ile ovalanmıştır. Poliamid lifler ile ilgili teknik detaylar Tablo 3.6'da gösterilmektedir.

Tablo 3.6: Poliamid liflerin teknik özellikleri (Kordsa, 2020)

Poliamid Lif	Karakteristik Özellikler
Fiber Sınıfı	EN 14889-2 Sınıf I
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	1.14
Uzunluk (mm)	6.12
Çekme Gerilmesi (MPa)	900
Erime Sıcaklığı (C°)	260
Fiber Adedi/Kg	111 Milyon (12 mm)
Alkali Direnci	Çok İyi
Korozyon Direnci	Çok İyi



Şekil 3.2: Çalışmada kullanılan poliamid lifler.

3.2.7 Çelik (ST) Lif

Geopolimer beton numunelerinin basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımı, yük-deplasman ve yüksek sıcaklıktaki dayanım özelliklerini test etmek için çelik lifler kullanılmıştır. Çelik lifler Group Enerji Demir Çelik Sanayi firmasından temin edilmiştir. Çelik lifler tek kancalıdır. Kullanılan çelik liflere ait teknik detaylar Tablo 3.7'de gösterilmektedir.

Tablo 3.7: Çelik liflere ait teknik özelikler.

Çelik Lif	Karakteristik Özellikler
Kalınlık (mm)	0.55
Uzunluk (mm)	35
Çekme Dayanımı (MPa)	1100
Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	7.85



Şekil 3.3: Çalışmada kullanılan çelik lifler.

3.2.8 Akışkanlaştırıcı Katkı

Çalışmada akışkanlarştırıcı olarak BASF firmasından temin edilen polikarboksilik eter esaslı, yüksek oranda su azaltan yeni nesil süperakışkanlaştırıcı MasterGlenium 51 beton katkısı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıya dair teknik özellikler Tablo 3.8'de verilmiştir.

Tablo 3.8: Akışkanlarştırıcı katkıya dair teknik özellikler (BASF, 2020)

Malzeme Yapısı	Polikarboksilik eter esaslı
Görünüm	Kahverengi-sıvı
Özgül Ağırlık (20C°)	1.082-1.142 kg/lt
pH değeri	6-7
Alkali İçeriği (%)	≤ 3.00 (ağırlıkça)

3.3 BETON KARIŞIMLARI VE ÜRETİMLERİ

Farklı bağlayıcı oranları ve farklı lif çeşitlerinde, farklı oranların kullanılmasıyla üretilen geopolimer beton numunelerinin sertleşmiş halde mekanik ve durabilite özelliklerinin incelenmesi amacıyla yapılan bu çalışmada 14 farklı beton karışımı yapılmış ve sergilediği performans özellikleri değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında %100 cüruf ve %50 cüruf+%50 uçucu kül bağlayıcı oranları olmak üzere iki ana bağlayıcı sınıfında karışımlar yapılmıştır. Üretilen iki ana bağlayıcı geopolimer beton numuneleri lifsiz kontrol karışımı, polipropilen lif, poliamid lif ve çelik lifli karışımlar olmak üzere üretilmiştir. Her lif sınıfında hacimce %0.4 ve %0.8 olmak lif oranları kullanılmıştır. Beton karışım kodları Tablo 3.9'da gösterilmektedir.

Tablo 3.9: Beton karışım kodları.

	Beton Kodu	Açıklama
1	100S	%100 Cüruf içerikli lifsiz geopolimer beton
2	100S04PP	%100 Cüruf içerikli hacimce %0.4 polipropilen lif oranlı gp. beton
3	100S08PP	%100 Cüruf içerikli hacimce %0.8 polipropilen lif oranlı gp. beton
4	100S04PA	%100 Cüruf içerikli hacimce %0.4 poliamid lif oranlı gp. beton
5	100S08PA	%100 Cüruf içerikli hacimce %0.8 poliamid lif oranlı gp. beton
6	100S04ST	%100 Cüruf içerikli hacimce %0.4 çelik lif oranlı gp. beton
7	100S08ST	%100 Cüruf içerikli hacimce %0.8 çelik lif oranlı gp. beton
8	50S50FA	%50 Cüruf+%50 Uçucu kül içerikli lifsiz gp. beton
9	50S50FA04PP	%50 Cüruf+%50 Uçucu kül içerikli hacimce %0.4 polipropilen lif oranlı gp. beton
10	50S50FA08PP	%50 Cüruf+%50 Uçucu kül içerikli hacimce %0.8 polipropilen lif oranlı gp. beton
11	50S50FA04PA	%50 Cüruf+%50 Uçucu kül içerikli hacimce %0.4 poliamid lif oranlı gp. beton
12	50S50FA08PA	%50 Cüruf+%50 Uçucu kül içerikli hacimce %0.8 poliamid lif oranlı gp. beton
13	50S50FA04ST	%50 Cüruf+%50 Uçucu kül içerikli hacimce %0.4 çelik lif oranlı gp. beton
14	50S50FA08ST	%50 Cüruf+%50 Uçucu kül içerikli hacimce %0.8 çelik lif oranlı gp. beton

3.3.1 Karışım Oranları

Üretilen geopolimer betonların karışım oranları Tablo 3.10 ve 3.11'de gösterilmektedir.

Tablo 3.10: %100 Cüruf bağlayıcı ile üretilen numunelerin karışım oranı.

Bileşenler	Miktar ($1m^3$ için)
Na_2SiO_3/NaOH	2.5 (117.5/46.3)
Cüruf	360 kg
İri Agrega	1120 kg
İnce Agrega	746 kg
Akışkanlaştırıcı katkı	6 lt

Tablo 3.11: %50+%50 Cüruf bağlayıcı ile üretilen numunelerin karışım oranı.

Bileşenler	Karışım oranı ($1m^3$ için)
Na_2SiO_3/NaOH	2.5 (117.5/46.3)
Cüruf	180 kg
Uçucu Kül	180 kg
İri Agrega	1120 kg
İnce Agrega	746 kg
Akışkanlaştırıcı katkı	6 lt

%100 ve %50+%50 bağlayıcı ile üretilen her geopolimer sınıfı için polipropilen (PP), poliamid (PA) ve çelik (ST) lifler kullanılmıştır. Bu lifler karışımlarda hacimce %0.4 ve %0.8 oranında kullanılmıştır. Liflerin karışımlarda 1 m3 için kullanım oranları Tablo 3.12'de gösterilmektedir.

Tablo 3.12: Liflerin 1 m3 karışımda kullanım oranları.

Lif Sınıfı	Hacimce %0.4	Hacimce %0.8
Polipropilen (PP)	3.64 kg/m^3	7.28 kg/m^3
Poliamid (PA)	4.56 kg/m^3	9.12 kg/m^3
Çelik (ST)	31.4 kg/m^3	62.8 kg/m^3

3.3.2 Alkali Aktivatörlerin Hazırlanması

Alkali aktivatörler beton dökümünden 24 saat önce hazırlanmıştır. Karışım oranlarından elde edilen miktarlara göre 12M 525 gram katı sodyum hidroksit 957 gram saf su ile karıştırılmıştır. Karışım esnasında ortaya çıkan ısının hem azalması hem de daha yüksek çözünürlüklü bir çözelti etmek için çözelti bir gün bekletilmiştir. Bir diğer alkali aktivatör olan sodyum silikat (Na_2SiO_3) yine karışım oranlarından belirlenen miktara göre 3.7 kg olarak varilden ayrı bir kaba aktarılmıştır. Sodyum silikat bekletilen sodyum hidroksit çözeltisi ile aynı kaba konularak alkali aktivatörler beton dökümüne hazır hale getirilmiştir. Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi alkali aktivatörler ile beraber aynı kapta karıştırılarak karışıma ilave edilmiştir.

3.3.3 Kalıplar

Çalışma süresince 100x100mm boyutlarında küp, 100x200 mm boyutlarında silindir ve kiriş numune üretimi için 100x100x500 mm boyutlarında metal prizma kalıplar kullanılmıştır. Beton

dökümü öncesinde kalıpların iç yüzeyleri numuneleri rahat çıkarabilmek adına gres yağı ile yağlanmıştır.

3.3.4 Geopolimer Betonun Üretilmesi ve Dökümü

Geopolimer beton üretimi esnasında geleneksel portland çimentolu beton üretiminde uygulanan prosedür takip edilmiştir. Üretim öncesi beton mikseri karışımın nem vermemesi adına nemlendirilmiştir. Kuru karışım beton mikserine agregalar doygun kuru yüzey olacak şekilde bağlayıcılar ile birlikte döküldükten sonra homojen bir karışım olması için yaklaşık iki dakika karıştırılmıştır. Hemen ardından bir gün öncesinden hazırlanan alkali aktivatörler (NaOH ve Na_2SiO_3) süperakışkanlaştırıcı ile beraber dökülmüştür. Alkali aktivatör ve kuru karışım yine iki dakika karıştırıldıktan sonra mikser durdurulmuş, lifler (üretilmesi planlanan beton sınıfına göre) ve ilave su dökülerek yine iki dakika karıştırılmıştır. Karışım tamamlandıktan sonra mikserden yüzeyi ıslatılmış el arabasına tahliye edilen geopolimer beton küp, silindir ve prizma kalıplara dökülmüştür. Döküm hava boşluklarını tahliye ve homojen bir karışım elde etmek maksadıyla vibrasyon sehpasında yapılmıştır. Dökümden hemen sonrasında alkali uçuculuğunun önüne geçebilmek için kalıpların üstü plastik örtüler ile kaplanmıştır. 24 saat sonra beton numuneler kalıplardan çıkarılmıştır.

3.3.5 Kürleme

Çalışmada üretilen geopolimer beton numuneleri gerçek üretim şartlarına daha yakın olması ve gerçek üretim şartlarında geopolimer betonu daha iyi anlamak adına dökülen beton oda sıcaklığında kürlemeye bırakılmıştır.



Şekil 3.4: Oda sıcaklığında kürlenmeye bırakılan geopolimer beton numuneleri.

3.4 DENEY YÖNTEMLERİ

Lif katkılı geopolimer betonların mekanik ve durabilite özelliklerinin incelendiği bu çalışmada uygulanan deneyler aşağıda listelenen yöntemler esas alınarak gerçekleştirilmiştir

3.4.1 Basınç Dayanımı Deneyi

Geopolimer beton numuneleri üzerinde TS EN 12390-3 (TSE, 2014) standardına uygun olarak basınç dayanımı testi yapılmıştır. Basınç dayanımı testlerinde 100x100x100 mm ebatlarında küp numuneler kullanılmıştır. Küp numunelerin basınç dayanımları 28. ve 90. günlerde gerçekleştirilmiştir. Numuneler oda sıcaklığında küre bırakılmıştır. Üretilen her bir geopolimer beton serisi için 3 numune test edilmiş ve bu numunelerin ortalaması alınarak 28 ve 90. günlerdeki ortalama basınç dayanımları sonuçları elde edilmiştir. Basınç dayanımı maksimum yükün numune yüzey alanına oranı ile denklem (3.1) kullanılarak elde edilmektedir.

$$\sigma = \frac{P}{A} \qquad (3.1)$$

P Maksimum yükü (N), A numune yüzeyinin alanını (mm^2) temsil etmektedir.



Şekil 3.5: Basınç dayanmı testi.

3.4.2 Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Geopolimer beton numunelerine mekanik özellikler kapsamında yarmada çekme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Uygulanan test ile numunelerde dolaylı çekme gerilmeleri oluşturulmuş ve eksen boyunca yarılma gözlenmesi beklenmiştir. Uygulanan metot ile test numunelerinde numune kesitinin orta bölgesinde üniform çekme gerilmeleri oluşturulması sağlanmıştır. Yarmada çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-6 (TSE, 2010)standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Deney süresince pres cihazının tablalarının silindir geopolimer numunelere göre dikey bir düzlemde tutulması sağlanmıştır. Yardamada çekme dayanımında her bir beton karışım sınıfı 28. Ve 90. günlerde 3'er numune teste tabi tutulmuş ve ortalama dayanım sonuçları elde edilmiştir. Yarmada çekme dayanımı denklem (3.2) 'ye göre bulunmaktadır.

$$Çekme\ Gerilmesi = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.2)$$

P silindir numuneye uygulanan basınç yükünü (N), L silindir numunenin uzunluğunu (mm) ve D silindir çap uzunluğunu (mm) temsil etmektedir.

3.4.3 Eğilme Dayanımı Deneyi

Geopolimer beton numunelerinde eğilme dayanımını test etmek için 100x100x500 mm ebatlarında prizma beton kalıplar kullanılmış ve numuneler üretilmiştir. Eğilme dayanımı TS EN 12390-5 (TSE, 2019) standardına uygun şekilde gerçekleştirilmiş ve 3 noktalı olarak uygulanmıştır. Eğilme dayanımı mesnet açıklığı 450 mm olacak şekilde ayarlanmış ve cihaz yükleme başlığı geopolimer beton numunesinin mesnet arası açıklığının ortasına yerleşecek şekilde konumlandırılmıştır. Numunelerde 28. ve 90. gün eğilme dayanımları tespit edilmiş olup üçer numune için ortalama dayanım sonuçları tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı sonuçları denklem (3.3) kullanılarak elde edilmiştir.

$$Eğilme\ Dayanımı = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (3.3)$$

P kırılma yükünü, L mesnet açıklığını (mm), b numune kesitinin enini (mm) ve h numune kesitinin yüksekliğini (mm) temsil etmektedir.

3.4.3.1 Eğilme Dayanımı-Deplasman Kontrolü

Geopolimer beton numuneleri için ayrıca deplasman kontrollü eğilme dayanımı testleri de gerçekleştirilmiştir. Gerilme-deplasman kontrolü çalışması için 50 kN kapasiteli Shimadzu marka otomatik test cihazı kullanılmıştır. Test için cihaz başlık yükleme hızı dakikada 0.1 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Deney ASTM C1609 (ASTM International, 2019) standardına göre uygulanmıştır. Numune mesnet açıklığı başlığın tam ortadan gelecek şekilde 450 mm olarak ayarlanmıştır. Bütün karışım sınıfları için 100x100x500 mm ebatlarındaki kiriş numunelerin 28. ve 90. gündeki gerilme-deplasman grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.6: Eğilme gerilmesi deplasman kontrolü deneyi.

3.4.4 Birim Ağırlık Boşluk Oranı ve Su Emme Deneyleri

100x100x100mm küp geopolimer beton numuneleri her sınıf için 3'er numune ile birim ağırlık, porozite ve su emme deneylerine tabi tutulmuştur. Numuneler 48 saat boyunca etüv içerisinde tutularak kuru ağırlıkları ölçülmüştür. Kuru ağırlıkları ölçülen numuneler oda sıcaklığında yine 48 saat olacak şekilde su içerisinde bekletilmiştir. 48 saat suda bekletilen numuneler kuru bir bez yardımıyla yüzeyleri kurutularak tartıya konulmuş ve kuru yüzey olacak şekilde doygun ağırlıkları ölçülmüştür. Daha sonra ise numunelerin su içerisindeki ağırlıkları Arşimet terazisi kullanılarak tespit edilmiştir. Birim ağırlık, porozite ve su emme deneylerinin sonuçları denklem (3.4), (3.5) ve (3.6) kullanılarak elde edilmiştir.

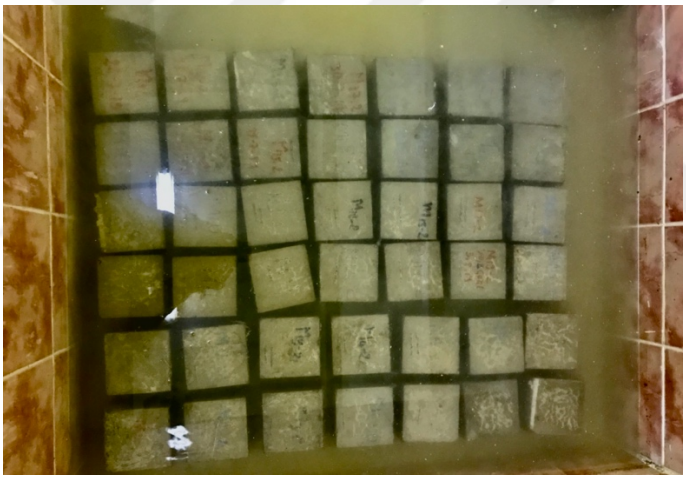
$$Birim\ Ağırlık\ \left(\frac{gr}{cm^3}\right) = \frac{Etüv\ kurusu\ ağırlığı}{Etüv\ kurusu\ ağırlığı - Arşimet\ ağırlığı} \quad (3.4)$$

$$Boşluk\ Oranı\ (\%) = \frac{Doygun\ kuru\ yüzey\ ağırlığı - Etüv\ kurusu\ ağırlığı}{Doygun\ kuru\ yüzey\ ağırlığı - Arşimet\ ağırlığı} x100 \quad (3.5)$$

$$Su\ Emme\ (\%) = \frac{Doygun\ kuru\ yüzey\ ağırlığı - Etüv\ kurusu\ ağırlığı}{Etüv\ kurusu\ ağırlığı} x100 \quad (3.6)$$



Şekil 3.7: Etüv kurusu ağırlığı eldesi için numunelerin etüve yerleştirilmesi.

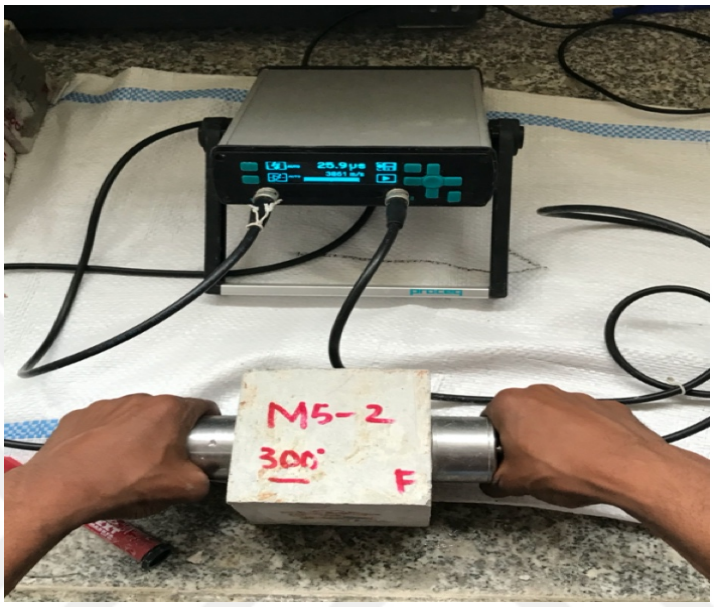


Şekil 3.8: Doygun kuru yüzey ağırlığı eldesi için numunelerin suya yerleştirilmesi.

3.4.5 Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Geopolimer beton numunelerinin ultrases dalgalarının numune içerisindeki geçiş sürsesinin belirlenmesi maksadıyla ultrases geçiş hızı deneyi uygulanmıştır. Ultrases geçiş hızı deneyi basınç deneyi için yapılacak bütün karışım serisindeki küp numuneler için gerçekleştirilmiştir. Numunelerin geçiş hızı testi ASTM C597 (ASTM International, 2016) standardına bağlı kalınarak uygulanmıştır. Her bir küp numune için 4 farklı okuma değeri alınmış ve bu değerlerin ortalama sonucu elde edilmiştir. Numuneler teste tabi tutulmadan önce sağlıklı okuma yapabilmek ve pürüzleri gidermek adına ölçüm yapılacak yüzeye jel sürülmüştür.

Cihazın başlıklarının dik ve etkili temas yapılmasına dikkat edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Test öncesi cihaza ölçümdeki cihaz başlıkları arasındaki mesafe girilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri m/sn türünden elde edilmiştir. Ultrases geçiş hızı cihazı Şekil 3.9'da gösterilmektedir.



Şekil 3.9: Ultrases geçiş hızı deneyi.

3.4.6 Yüksek Sıcaklık Etkisi Deneyi

Durabilite kapsamında olan yüksek sıcaklık etkisi deneyi geopolimer beton numunelerine uygulanmıştır. Uygulanan bu deney ile geopolimer beton numunelerinin yüksek sıcaklıktaki basınç dayanımı performansı incelenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisi için Nabertherm marka B130 model sanayi tipi fırın kullanılmıştır. Deney öncesi numuneler bir gün boyunca etüvde kurutulmuş ve ağırlıkları ölçülmüştür. Yüksek sıcaklık etkisi tüm serilere 90. günde uygulanmıştır. Numuneler 300, 600 ve 900C° sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Cihaz hedef sıcaklığa ulaşmak için dakikada 5 C° artacak şekilde ve hedef sıcaklıkta 1 saat boyunca tutulacak şekilde manuel olarak kontrol paneline girilmiştir. Numunelerin olası termal şoktan dolayı test sonunda patlama, kırılma gibi etkilere maruz kalmaması ve oda sıcaklığına ulaşması için fırın kapağı test sonunda belirli bir mesafede açılmış ve oda sıcaklığına kadar soğuması beklenmiştir. Oda sıcaklığına ulaşan numunelerin yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası değişimini

anlamak adına ağırlıkları ölçülerek ağırlık kaybı, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Yüksek sıcaklık için kullanılan cihaz şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10: Yüksek sıcaklık öncesi numunelerin fırına yerleştirilmesi ve deney sonu.

4. BULGULAR

4.1 FİZİKSEL ÖZELLİKLER

Fiziksel özellikler kapsamında birim ağırlık, boşluk oranı, su emme sonucu değerleri aşağıda listelenmektedir.

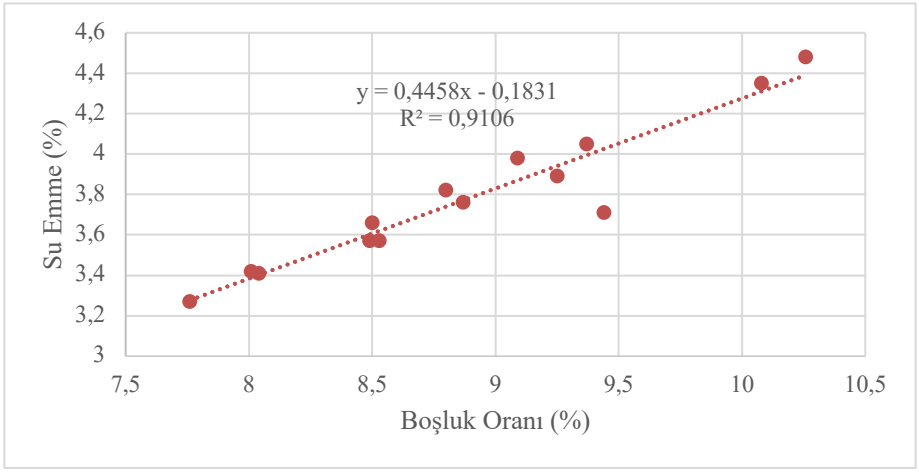
4.1.1 Birim Ağırlık, Boşluk Oranı ve Su Emme Sonuçları

Tablo 4.1 ve Şekil 4.2'de geopolimer beton numunelerinin fiziksel özellikleri dair sonuçlar gösterilmektedir. Genel olarak bakıldığında fiziksel özelliklerdeki değişimler kullanılan lif cinsi ve oranına göre değişiklik göstermektedir. Örneğin %100 cüruf bağlayıcı ile üretilen serilerde referans numuneye (100S) nazaran hacimce %0.4 lif ile üretilen numunelerin boşluk oranı açısından iyileşme gösterip azaldığı görülürken, hacimce %0.8 lif ile üretilen numunelerin boşluk oranlarında referans numuneye kıyasla artış görülmüştür. Yine %100 cüruf bağlayıcı ile üretilen serilerde su emme oranlarında genel olarak iyileşme görülmüş olup lifli seriler referans seriye kıyasla su emme oranında daha iyi sonuçlar vermiştir. Su emme oranlarının boşluk oranı değerleri ile belirgin bir orantıda değiştiği görülmektedir. Öte yandan %50 cüruf ve %50 uçucu kül bağlayıcı ile üretilen serilerde boşluk oranı referans seriye (100S) nazaran bazı serilerde artış gösterirken bazı serilerde düşüş göstermiştir. Bu artış oranlarının hacimce lif kullanım oranı artışıyla arttığı görülmektedir. Örneğin hacimce %0.4 çelik lif kullanımında boşluk oranı %4,3 azalıyorken hacimce %0.8 çelik lif kullanımında boşluk oranı %4,3 artmıştır. Lifsiz olarak %50 uçucu kül ikameli 50S50FA serisi kontrol serisine kıyasla boşluk oranında gelişim göstererek %9,7'lik bir azalma göstermiştir. %50 uçucu kül ikameli polipropilen lifli seriler boşluk oranı ilerlemesi anlamında zayıf bir sonuç sergilemiştir. Hacimce %0.4 polipropilen lifli seri %13,6 ve hacimce %0.8 polipropilen lifli seri kontrol serisine kıyasla %15,7'lik boşluk oranı artışıyla en çok artış gösteren seri olmuştur. %50 Cüruf ve %50 uçucu kül ile üretilen birço serilerin su emme oranlarının da referans seriye kıyasla artış trendinde olduğu görülmektedir. Özellikle lifsiz seride azalma olup liflis serilerde su emme miktarında artış olması dikkat çekicidir. 50S50FA serisi %9 azalırken diğer %50 uçucu kül ikameli tüm serilerin su emme değerlerinde artış gözlenmektedir. Lifli serilerde bu artış oranının hacimce lif kullanım oranıyla artış gösterdiği görülmektedir. Örneğin hacimce %0.4 polipropilen lif kullanımında referans seriye nazaran %15.7'lik su emme artışı görülürken hacimce %0.8 polipropilen lif kullanımında referans seriye kıyasla %19.1'lük bir artış gözlenmektedir. Lif

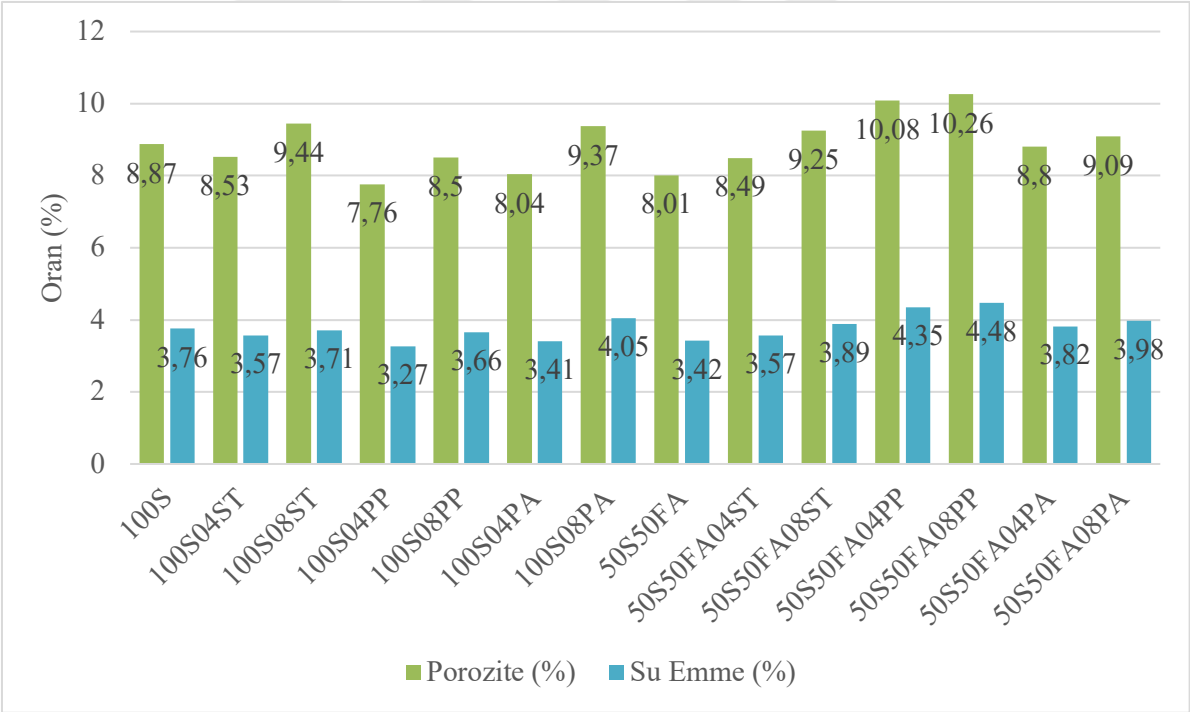
kullanım oranındaki artışın numune içerisinde boşluk oluşturup, bu boşluk oranlarının numunede genel olarak su emme miktarlarında artışa sebep olduğu söylenebilir. Geopolimer serilerin su emme-boşluk oranı ilişkisi Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Boşluk oranı ve su emme değerleri arasında uygunluk görülmektedir.

Tablo 4.1: Geopolimer beton numunelerinin birim ağırlık, porozite ve su emme sonuçları.

Seri	Birim Ağırlık (gr/cm3)	Boşluk Oran (%)	Boşluk Oranı Değişimi (%)	Su Emme (%)	Su Emme Oranı Değişimi (%)
100S	**2,59**	**8,87**	**Kontrol**	**3,76**	**Kontrol**
100S04ST	2.61	8,53	-3,8	3,57	-5,1
100S08ST	2,81	9,44	+6,4	3,71	-1,3
100S04PP	2,57	7,76	-12,5	3,27	-13
100S08PP	2,54	8,50	-4,2	3,66	-2,7
100S04PA	2,57	8,04	-9,4	3,41	-9,3
100S08PA	2,55	9,37	+5,6	4,05	+7,7
50S50FA	2,55	8,01	-9,7	3,42	-9,0
50S50FA04ST	2,60	8,49	-4,3	3,57	-5,1
50S50FA08ST	2,62	9,25	+4,3	3,89	+3,5
50S50FA04PP	2,58	10,08	+13,6	4,35	+15,7
50S50FA08PP	2,55	10,26	+15,7	4,48	+19,1
50S50FA04PA	2,53	8,80	-0,8	3,82	+1,6
50S50FA08PA	2,51	9,09	2,5	3,98	+5,9



Şekil 4.1: Geopolimer numunelerin su emme-boşluk oranı ilişkisi.



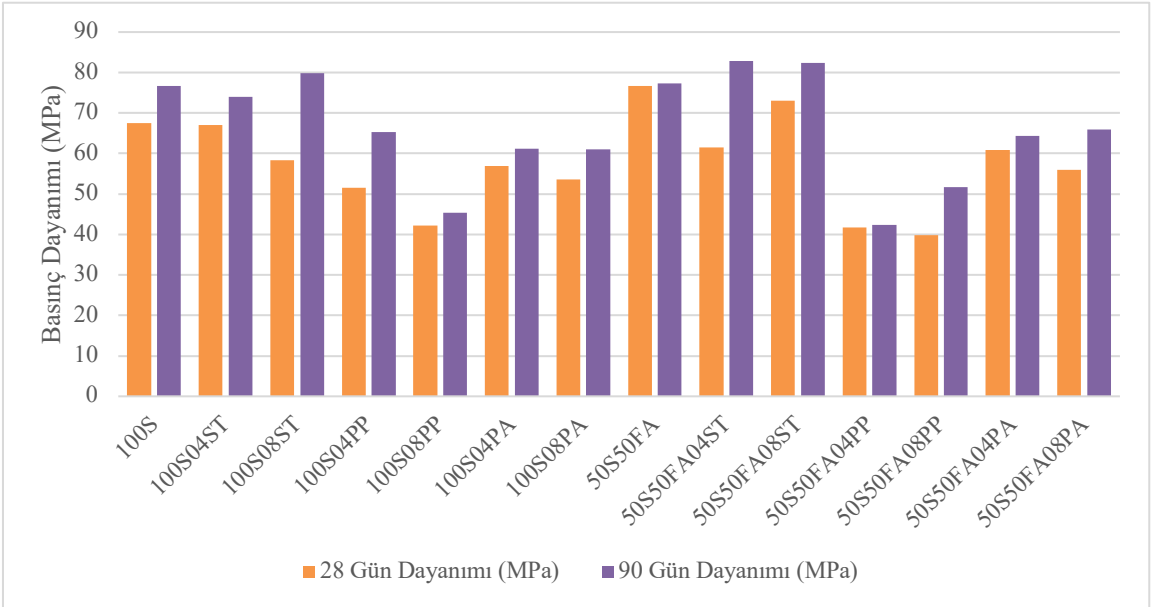
Şekil 4.2: Birim ağırlık, porozite ve su emme sonuçları.

4.2 BASINÇ DAYANIMI SONUÇLARI

Basınç dayanımı testleri 100mm'lik standart küpler üzerinde 28. Ve 90. Günlerde gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.2 ve Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Basınç dayanımı sonuçlarında 28. Ve 90. günlerde kontrol serisine (100S) nazaran lifli serilerin ekseriyetinde basınç dayanımında azalmaların olduğu görülmektedir. Kontrol serisi dikkate alındığında 28. gün basınç dayanımı için %50 uçucu kül ikameli lifsiz seride (50S50FA) %13'lük kazanım ve lifli serilerde yalnızca 50S50FA08ST serisinde %8,12'lik artış gözlenmiştir. Öte yandan 90. gün basınç dayanımı sonuçları içinde tablo benzer sonuçlar sunmaktadır. 50S50FA serisi kontrol serisine kıyasla %0,79 gibi düşük bir oranla gelişim gösterirken yine %50 uçucu kül ikameli ve çelik lifli seriler (50S50FA04ST, 50S50FA08ST) %8,73, %7,37 gibi oranlarla gelişim göstermişlerdir. Kontrol numunelerine kıyasla en büyük dayanım kaybının polipropilen lifli serilerde olduğu görülmektedir. Polipropilen liflli serilerin 28. Ve 90. günlerde konrol serilerine nazaran %40'a yakın daha az dayanım sonucu verdiği görülmektedir. Poliamid liflli seriler kontrol serisine nazaran %9-20 arasında daha az bir dayanım sonucu vererek polipropilen liflerden sonra daha az dayanım sonucu veren lifli seriler olmuşlardır. Polipropilen lifli serilerin kontrol numunesine kıyasla daha düşük dayanım sonucu vermesi polipropilen liflerin düşük yoğunluğa sahip olmasından kaynaklanabilmektedir. Polipropilen lif kullanım oranın artışını beton basınç dayanımı karakteristiğinde zayıflamaya sebep olacağı literatürde belirtilmektedir (Al-Mashadani, et al., 2018).

Tablo 4.2: Basınç dayanımı sonuçları.

Seri	28 Gün Dayanımı (MPa)	28 Gün Dayanım D.O (%)	90 Gün Dayanımı (MPa)	90 Gün Dayanım D. O (%)	28/90
100S	67,49	Kontrol	76,75	Kontrol	0,88
100S04ST	67,00	-0,73	73,93	-3,67	0,91
100S08ST	58,36	-13,53	79,86	+4,05	0,73
100S04PP	51,45	-23,77	65,29	-14,93	0,79
100S08PP	42,17	-37,52	45,41	-40,83	0,93
100S04PA	56,83	-15,79	61,17	-20,30	0,93
100S08PA	53,55	-20,65	61,01	-20,51	0,88
50S50FA	76,68	+13,62	77,36	+0,79	0,99
50S50FA04ST	61,51	-8,86	82,91	+8,03	0,74
50S50FA08ST	72,97	+8,12	82,41	+7,37	0,89
50S50FA04PP	41,73	-38,17	42,3	-44,89	0,99
50S50FA08PP	39,83	-40,98	51,7	-32,64	0,77
50S50FA04PA	60,94	-9,71	64,36	-16,14	0,95
50S50FA08PA	55,91	-17,16	66,00	-14,01	0,95



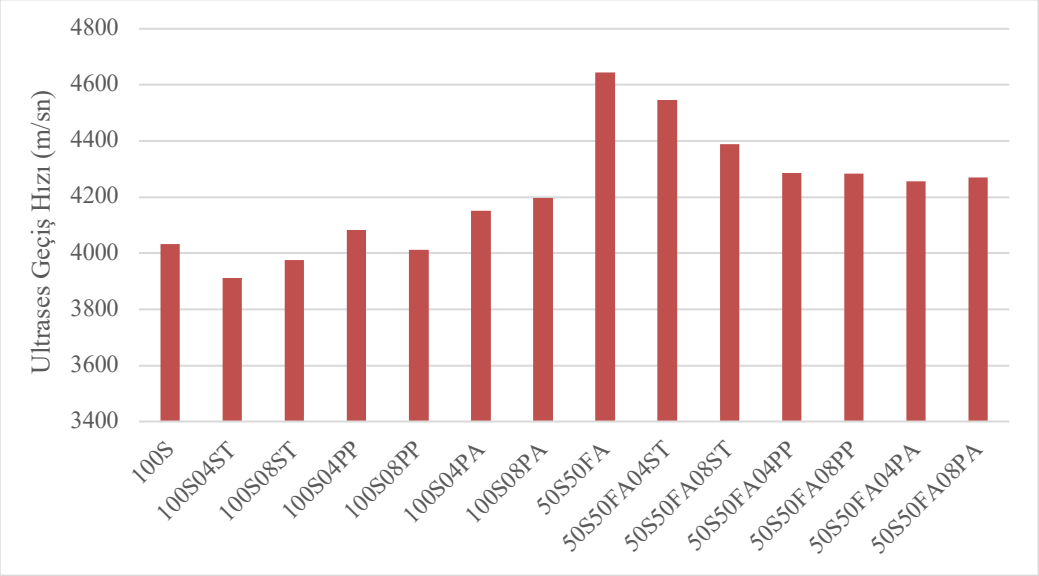
Şekil 4.3: Basınç Dayanımı sonuçları.

4.3 ULTRASES GEÇİŞ HIZI DENEYLERİ

Tahribatsız yöntemlerden olan ultrases geçiş hızı deneyi geopolimer beton numunelerinin yada geopolimer matrisinin homojenlik durumunu anlamak adına geopolimer serilerine uygulanmıştır. Tablo 4.3'te ve Şekil 4.4'te geopolimer serilerin ultrases geçiş hızı değerleri gösterilmektedir. %50 cüruf ve %50 uçucu kül ile üretilen serilerde referans seriye (100S) kıyasla tüm serilerin ultrases geçiş hızında artış olduğu görülmektedir. %100 cüruf ile üretilen serilerin referans seriye nazaran genel olarak ultrases sonuçlarında zayıf bir iyileşme performansı görüldüğü söylenebilir. Ultrases geçiş hızındaki gelişim en fazla %50 uçucu kül ikameli lifsiz seride (50S50FA) olduğu görülmektedir. Yine %50 uçucu kül ikameli hacimce %0.4 çelik lif oranlı seride %12,71 ve hacimce %0.8 çelik lif oranlı seride %8,83 gibi kesin bir geçiş hızı artışı gözlenmektedir. Polipropilen lifli seriler lifli seriler arasında kontrol serisine kıyasla en az gelişim oranı göstermiştir. Polipropilen liflerin bağlama ya da yapışma gücünün zayıf kalışı gelişimin diğer liflere nazaran daha az geçiş hızı gelişimininde etkili olduğu söylenebilir (Al-Mashadani, et al., 2018).

Tablo 4.3: Ultrases geçiş hızı sonuçları.

Seriler	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Hızı Değişim (%)Oranı
100S	4032,5	Kontrol
100S04ST	3912	-2,99
100S08ST	3974,67	-1,43
100S04PP	4083,33	1,26
100S08PP	4011,33	-0,52
100S04PA	4152	2,96
100S08PA	4196,17	4,06
50S50FA	4643,67	15,16
50S50FA04ST	4545,17	12,71
50S50FA08ST	4388,5	8,83
50S50FA04PP	4285,5	6,27
50S50FA08PP	4282,5	6,20
50S50FA04PA	4256	5,54
50S50FA08PA	4271	5,91



Şekil 4.4: Ultrases geçiş hızları sonuçları.

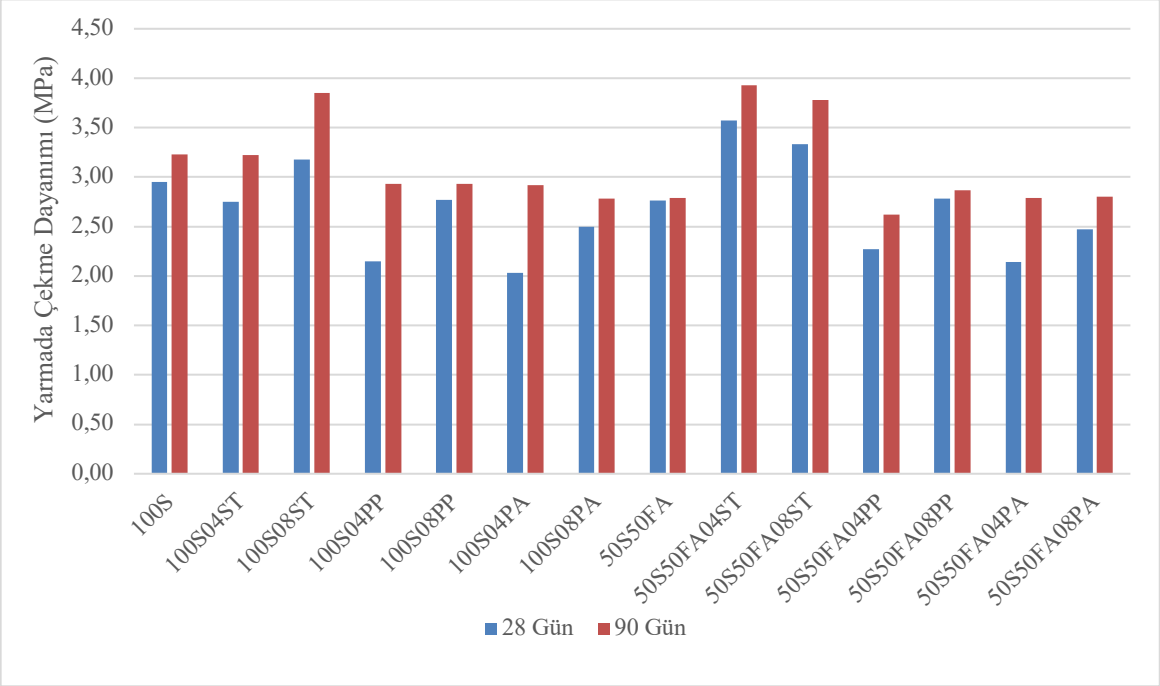
4.4 YARMADA ÇEKME DAYANIMI SONUÇLARI

Geopolimer serilere 28. Ve 90. günlerde yarmada çekme dayanımı testi uygulanmıştır. Yarmada çekme dayanımı sonuçları, 28 ve 90 gün dayanımların kontrol numunesine göre değişim oranı ve 28/90 gün oranı Tablo 4.4'te gösterilmektedir. Seriler arasında en yüksek yarmada çekme dayanımlarının çelik lifli serileri olduğu görülmektedir. 28 günde %100 cüruf bağlayıcı ile üretilen ve hacimce %0.8 çelik lif oranlı seri 3,18 MPa iken %50 uçucu kül ikameli ve %0.4 çelik lif oranlı seri (50S50FA08ST) 3,57 MPa'lık bir sonuç sergilemiştir. Polipropilen ve poliamid lifli tüm serilerin yarmada çekme dayanımlarının kontrol serisine nazaran düşük sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Örneğin 28 gün dayanım sonuçlarında kontrol numunesine kıyasla en büyük dayanım kaybı sonucunu %31,19'luk kayıpla 100S04PA vermiştir. 28 gün dayanımda hacimce lif kullanım oranı ve yarmada çekme dayanımı ilişkisi incelendiğinde tüm serilerde lif kullanım oranı arttıkça kontrol serisine kıyasla tüm serilerde yarmada çekme dayanımı kaybının azaldığı görülmektedir. Örneğin 100S04PA kontrol numunesine nazaran %31,19'luk kayıp yaşarken 100S08PA (iki katı lif kullanım oranı) %15,25 gibi bir oranla daha az kayıp sergilemiştir. 50S50FA04PA %27,46'lık kayıp yaşarken iki katı lif kullanılan seride yani 50S50FA08PA %16,27'lik kayıpla daha az bir dayanım kaybı sonucu sergilemiştir. Yine Polipropilen lifli serilerde 100S04PP %27,12'lik kayıp gösterirken hacimce lif kullanımının artmasıyla 100S08PP %6,1 gibi bir oranla muadiline nazaran çok daha az bir dayanım kaybı

göstermektedir. Benzer yaklaşımlar %50 uçucu kül ikameli serilerde de görülmektedir. 90 gün dayanımları söz konusu olduğunda en yüksek yarmada çekme dayanımı yine çelik lifli serilerde görülmektedir. %100 cüruf bağlayıcılı ve hacimce %0.4 oranlı çelik lifli serilerde kontrol serisine nazaran hem 28 hem 90 gün dayanımları için düşüş görülmektedir. Ancak hacimce %0.8 lif kullanıldığında gözle görülür artışlar gözlemlenmiştir. Örneğin 100S08ST 28 günde %7,8 artış yaparken 90. Günde %19,20 gibi kesin bir artış sergilemiştir. %50 uçucu kül ikameli çelik lifli serilerin her türlü hacimce lif kullanım oranında artış oranı gözlenmiştir. Ancak bu artış hacimce lif kullanım oranı arttıkça daha düşük bir artış olmaktadır. Örneğin 90 günlük dayanımda 50S50FA04ST %21,67 artarken iki katı lif kullanımında 50S50FA08ST %17,03'lük bir artış sergilemiştir. Yine 28 günde 50S50FA04ST %21,02 artış yaparken 50S50FA08ST iki kat lif kullanımında %12,88'lik bir artış göstermiştir. Buradan bağlayıcı cinsine göre hacimce çelik lif kullanım oranında optimum bir değer düşünülmesi gerektiği durumu söylenebilir.

Tablo 4.4: Yardama çekme dayanımı sonuçları.

Seri	28. Gün (MPa)	28. Gün Değişim Oranı (%)	90. Gün	90. Gün Değişim Oranı (%)	28/90
100S	2,95	**Kontrol**	3,23	**Kontrol**	0,91
100S04ST	2,75	-6,78	3,22	-0,31	0,85
100S08ST	3,18	7,80	3,85	19,20	0,83
100S04PP	2,15	-27,12	2,93	-9,29	0,73
100S08PP	2,77	-6,10	2,93	-9,29	0,95
100S04PA	2,03	-31,19	2,92	-9,60	0,70
100S08PA	2,5	-15,25	2,78	-13,93	0,90
50S50FA	2,76	-6,44	2,79	-13,93	0,99
50S50FA04ST	3,57	21,02	3,93	21,67	0,91
50S50FA08ST	3,33	12,88	3,78	17,03	0,88
50S50FA04PP	2,27	-23,05	2,62	-18,89	0,87
50S50FA08PP	2,78	-5,76	2,87	-11,15	0,97
50S50FA04PA	2,14	-27,46	2,79	-13,62	0,77
50S50FA08PA	2,47	-16,27	2,8	-13,31	0,88



Şekil 4.5: Yarmada çekme dayanımı sonuçları.

4.4.1 Basınç Dayanımı-Yarmada Çekme Dayanımı İlişkisi

Amerikan Beton Enstitüsü ACI yapı kodu 318 yarmada çekme dayanımının ait olan numunenin basınç dayanımı ile tahmin edilmesi olanağını sunmaktadır. Geopolimer beton numunelerin kodlarla tutatrlılığını anlamak adına ACI 318 yaklaşımı uygulanmıştır. ACI 318 yaklaşımına göre elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te gösterilmektedir. ACI 318 yaklaşımı denklem (4.1) ile hesaplanmaktadır. f'_c basınç dayanımını ifade ederken, f_{ct} yarmada çekme dayanımı temsil etmektedir. ACI 318 kodu hem %100 cüruf bağlayıcı seriler hem de %%50 cüruf %50 uçucu kül karışımlı seriler için uygulanmıştır. Serileri 90 günlük basınç dayanımları kullanılarak ACI 318 yarmada çekme dayanımı sonuçları elde edilmiştir. ACI 318 kodu basınç dayanımı kullanarak tahmini elde edilen yarmada çekme dayanımları gerçek yarmada çekme dayanımları ile zayıf bir tutarlılık göstermektedir. ACI 318 kodu tahmini dayanımlarının gerçek dayanımların %57 ila %78 arasında bir doğruluk ile sonuçlandığı görülmektedir. Gerçeklik payında genelde çelik lifli seriler en yakın olurken bu değerler %67 ile %77 arasında değişmektedir. Literatürde bu konuda yapılmış az sayıda çalışma olduğu düşünüldüğünde geopolimer beton için basınç dayanımı yarmada çekme dayanımı ilişkisinde yeni öneriler ve bu önerilerin doğrulanması gerektiği söylenebilir.

$$f_{ct} = 0.56\sqrt{f'_c} \qquad (4.1)$$

Tablo 4.5: ACI 318 koduna göre yarmada çekme dayanımları.

	ACI 318 Yaklaşımı (MPa)	Deneysel Y. Çekme (MPa)	Deneysel Y. Çekme/ACI 318
100S	4,91	3,23	0,66
100S04ST	4,82	3,22	0,67
100S08ST	5,00	3,85	0,77
100S04PP	4,52	2,93	0,65
100S08PP	3,77	2,93	0,78
100S04PA	4,38	2,92	0,67
100S08PA	4,37	2,78	0,64
50S50FA	4,93	2,79	0,57
50S50FA04ST	5,10	3,93	0,77
50S50FA08ST	5,08	3,78	0,74
50S50FA04PP	3,64	2,62	0,72
50S50FA08PP	4,03	2,87	0,71
50S50FA04PA	4,49	2,79	0,62
50S50FA08PA	4,55	2,80	0,62

Öte yandan literatürde bazı araştırmacılar cüruf ve uçucu kül bağlayıcıları ile üretilmiş geopolimerler için ACI 318 kodundan hareketle denklemde farklı katsayılar geliştirerek basınç dayanımı yarmada çekme dayanımı ilişkisi geliştirmişlerdir. Sofi ve diğ. denklem (4.2)'yi kullanarak cüruf-uçucu küllü geopolimer betonlar için basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı tahmini yürütmüşlerdir. %50 uçucu kül ikameli serilerin 28 ve 90 gün dayanımlarında sonuçların ACI 318 koduna kıyasla oldukça daha tutarlı olduğu Tablo 4.6'da görülmektedir. Özellikle çelik lifli serilerdeki yakınlık %90 üzerindedir. Doğruluk aralığı %66 ila %95 arasında değişmektedir. En uzak tahmini değer lifsiz seri 50S50FA için %66 gibi bir oranla ortaya çıkmaktadır.

$$f_{ct} = 0.48\sqrt{f'_c} \qquad (4.2)$$

Tablo 4.6: Sofi ve diğ. yaklaşımı ile basınç dayanımı-yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

Seri	Sofi ve Diğ. Yarmada Çekme Day. Yaklaşımı (MPa)	28 Gün Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Sofi et. al. /Deneysel Y. Çekme
50S50FA	4,20	2,76	0,66
50S50FA08ST	4,10	3,33	0,81
50S50FA04ST	3,76	3,57	0,95
50S50FA04PP	3,10	2,27	0,73
50S50FA08PP	3,03	2,78	0,92
50S50FA04PA	3,75	2,14	0,57
50S50FA08PA	3,59	2,47	0,69
Seri	Sofi ve Diğ. Yarmada Çekme Day. Yaklaşımı (MPa)	90 Gün Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Sofi et. al. /Deneysel Y. Çekme
50S50FA	4,22	2,79	0,66
50S50FA04ST	4,37	3,93	0,90
50S50FA08ST	4,36	3,78	0,87
50S50FA04PP	3,12	2,62	0,84
50S50FA08PP	3,45	2,87	0,83
50S50FA04PA	3,85	2,79	0,72
50S50FA08PA	3,90	2,80	0,72

Lee ve Lee de uçucu kül ve cüruf karışımlı geopolimer betonlar için çalışmalar gerçekleştirmiş ACI 318 kodundan hareketle yeni bir katsayı keşfederek tahmini değerlerde bulunmuşlardır. Sonuçlar denklem (4.3) kullanılarak elde edilmiştir. Tablo 4.7'de 28 ve 90 gün yarmada çekme dayanımı sonuçları ile Lee ve Lee'nin geliştirdiği denkleme göre elde edilen tahmini sonuçlar gösterilmektedir. Lee ve Lee'nin geliştirdiği yaklaşım öncesinde bahsedilen her iki yaklaşıma göre serilerde çok daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Özellikle çelik lifli serilerin neredeyse birebir benzerlik taşıdığı görülmektedir. Örneğin 28 günlük yarmada çekme dayanımlarında 50S50FA04ST deneysel dayanımı sonucu araştırmacıların yaklaşımıyla elde edilen dayanım sonucuyla %100'e yakın bir benzerlik göstermektedir. 90 günlük dayanımlarda çelik lifteki doğuruluklar %90'ın üzerindedir. Yine hacimce yüksek polipropilen lifli seriler içinde yüksek bir tutarlılık oranı olduğu söylenebilir. Geopolimer serilerde özellikle çelik ve polipropilen lifli seriler için bu yaklaşımlardaki katsayının 0.45 ila 0.43 arasında olmasının tahmini değer elde

etmede çok doğru sonuçlar verebileceği söylenebilir. Ancak Lifsiz seriler için bahsedilen üç yaklaşımında da zayıf kaldığı söylenebilir. Bu açıdan literatürde bu konuda yapılmış çalışmaların az olduğu düşünüldüğünde yeni önerilerin değerlendirilmesi gerektiği söylenebilir.

$$f_{ct} = 0.48\sqrt{f'_c} \qquad (4.3)$$

Tablo 4.7: Lee ve Lee yaklaşımı ile basınç dayanımı yarmada çekme dayanımı ilişkisi.

Seri	Lee ve Lee. Yarmada Çekme Day. Yaklaşımı (MPa)	28 Gün Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Lee ve Lee /Deneysel Y. Çekme
50S50FA	3,94	2,76	0,70
50S50FA04ST	3,53	3,57	1,01
50S50FA08ST	3,84	3,33	0,87
50S50FA04PP	2,91	2,27	0,78
50S50FA08PP	2,84	2,78	0,98
50S50FA04PA	3,51	2,14	0,61
50S50FA08PA	3,36	2,47	0,73
Seri	Lee ve Lee Yarmada Çekme Day. Yaklaşımı (MPa)	90 Gün Yarmada Çekme Dayanımı (MPa)	Lee ve Lee. /Deneysel Y. Çekme
50S50FA	3,96	2,79	0,70
50S50FA04ST	4,1	3,93	0,96
50S50FA08ST	4,09	3,78	0,93
50S50FA04PP	2,93	2,62	0,90
50S50FA08PP	3,24	2,87	0,89
50S50FA04PA	3,61	2,79	0,77
50S50FA08PA	3,66	2,80	0,77

4.5 EĞİLME PERFORMANSI

Geopolimer seriler ilk önce yük kontrolü yapılarak deplasman kontrolü aranmaksızın eğilme dayanım testine tabi tutulmuştur. Seriler daha sonra deplasman kontrolü dikkate alınacak şekilde bir test cihazına yerleştirilmiş ve yük-deplasman verileri elde edilerek gerekli düzenlemeler ile eğilme dayanımı-deplasman grafikleri oluşturulmuştur.

4.5.1 Eğilme Dayanımı Sonuçları

Tablo 4.8 ve Şekil 4.6'da eğilme dayanımı sonuçları gösterilmektedir. Geopolimer serilerin genel olarak eğilme dayanımları incelendiğinde literatür ile uyumlu ve kabul edilir sonuçlar olduğu görülmektedir (Arie, et al., 2017), (Manjunataha, et al., 2014). %100 cüruf bağlayıcılı seriler ortalama olarak 6,5 MPa'lık eğilme dayanımı performansı gösterirken %50 kül ikameli seriler ortalama olarak 6 MPa'lık bir eğilme dayanımı sonucu ortaya koymuşlardır. %50 uçucu kül ikameli tüm seriler kontrol serisine kıyasla eğilme dayanımını geliştirememişlerdir.

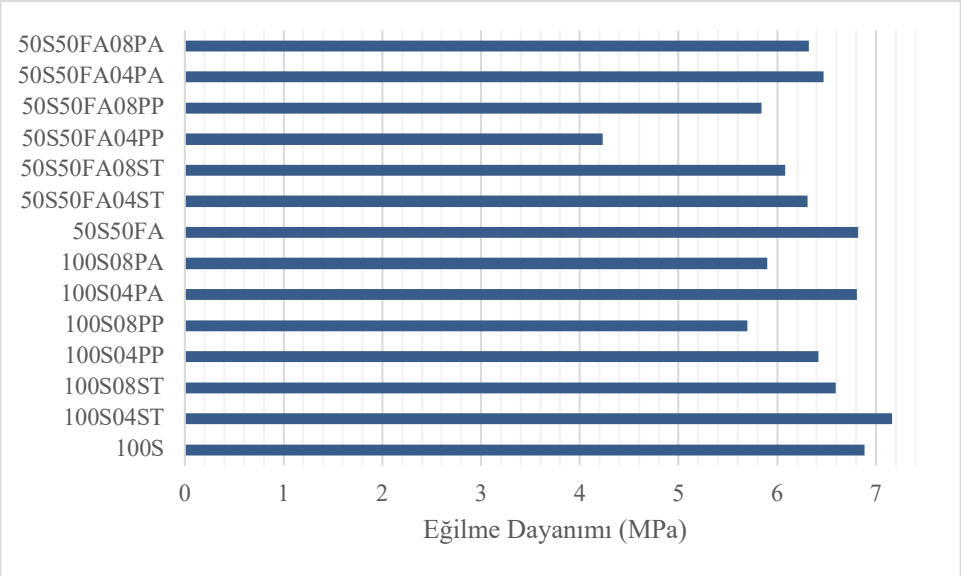
Tüm serilere bakıldığında kontrol serisine kıyasla gelişim gösteren tek serinin hacimce %0.4 çelik lif takviyeli ve %100 cüruf bağlayıcılı 100S04ST serisi olduğu görülmektedir. Çelik lifli seride lif takviyesi artışının eğilme dayanımı gelişimini olumsuz etkilediği görülmektedir. 100S04ST serisi hariç tüm serilerde kontrol serisine nazaran ortalama %11'lik bir eğilme dayanımı azalması olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.

Ekseriyetle bütün lifli serilerde hacimce lif kullanımın artışının eğilme dayanımlarındaki performans gelişimine olumsuz etkisi olduğu görülmektedir. Örneğin 100S04PA %1'lik azalma gösterirken 100S08PA %14,24'lük, 50S50FA04PA %5,9'luk bir azalma gösterirken 50S50FA08PA %8,17'lik ve 100S04PP %6,6'lık bir azalma gösterirken 100S08PP %17,1'lik bir azalma göstermektedir.

Lifli seriler anlamında düşüş ortalamalarına bakıldığında her iki bağlayıcı sınıfında da PA lifli seriler ortalama %7,35, PP lifli seriler %19,37, ST lifli seriler %5'lik bir azalma performansı göstermişlerdir. Lifsiz seri olan 50S50FA kontrol serisi 100S'e çok yakın bir performans göstererek hemen hemen aynı eğilme dayanımı sonucunu vermiştir.

Tablo 4.8: 90 günlük eğilme dayanımları.

Seriler	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Değişim Oranı (%)
100S	6,88	Kontrol
100S04ST	7,16	4,12
100S08ST	6,59	-4,20
100S04PP	6,42	-6,69
100S08PP	5,70	-17,19
100S04PA	6,81	-1,07
100S08PA	5,90	-14,24
50S50FA	6,82	-0,90
50S50FA04ST	6,31	-8,36
50S50FA08ST	6,08	-11,64
50S50FA04PP	4,23	-38,50
50S50FA08PP	5,84	-15,11
50S50FA04PA	6,47	-5,93
50S50FA08PA	6,32	-8,17



Şekil 4.6: 90 günlük eğilme dayanımları sonuçları.

4.5.2 Eğilme Dayanımı-Deplasman Grafikleri

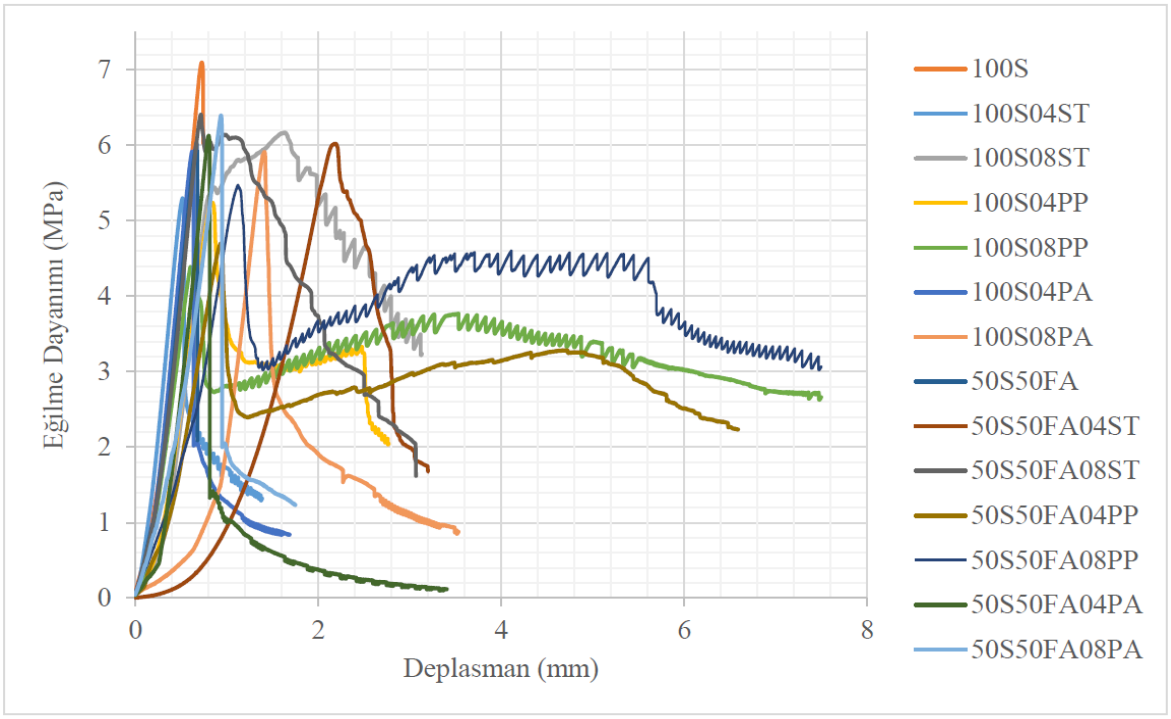
Geopolimer serilere deplasman kontrollü eğilme dayanımı testi uygulanmıştır. Eğilme dayanımı- deplasman grafiği Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Ayrıca daha iyi bir görsel izleyiş anlamında Şekil 4.8'de daraltılmış yatay eksenli eğilme dayanımı-deplasman grafiği sunulmaktadır. Genel anlamda lifsiz kontrol (100S) ve diğer lifsiz seriye (50S50FA) nazaran bazı lifli serilerin deplasman gelişimi anlamında gelişme gösterdiği görülmektedir. Özellikle PP lifli seriler tüm seriler arasında yüksek deplasman özelliği sergilemişlerdir. PP lifli seriler ilk çatlak değerinden sonra lif özelliği etkisini göstererek eğilme dayanımı almaya devam ederek ve artırarak deplasman gelişimini sürdürmüşlerdir. Örneğin 50S50FA08PP serisi, seriler arasında en iyi eğilme dayanımı-deplasman davranışı özelliği göstererek takribi ilk çatlak değeri olan 1,25mm ve 3 MPa olan eğilme dayanımı değerinden 4,5 MPa dayanım değerine çıkıp tekrardan 3 MPa değerlerine gelerek 7,5 mm deplasman performansı sergilemiştir. Başka bir PP lifli seri olan 100SS08PP serisi içinde aynı davranışı söylemek mümkündür. PP lifli serilerde deplasman değerinin artmasına bağlı olarak eğilme dayanımındaki kısa süreli iniş ve çıkışlar PP lifli serilerin etkili olduğunu ve enerji yutma kapasitesine olumlu etki ettiği söylenebilir.

PP lifli serilerde hacimce lif kullanımının artışının eğilme dayanımı-deplasman grafiği gelişimine olumlu etki ettiği görülmektedir. Hacimce %0.8 PP lifli 50S50FA08PP serisi daha yüksek dayanım-deplasman değerleri gösterirken hacimce %0.4 PP lifli 50S50FA04PP serisi iyi bir lif tutma ve deplasman değeri göstermesine karşın daha düşük kalmıştır. Benzer ilişki 100S08PP ve 100S04PP serileri arasında görülmektedir.

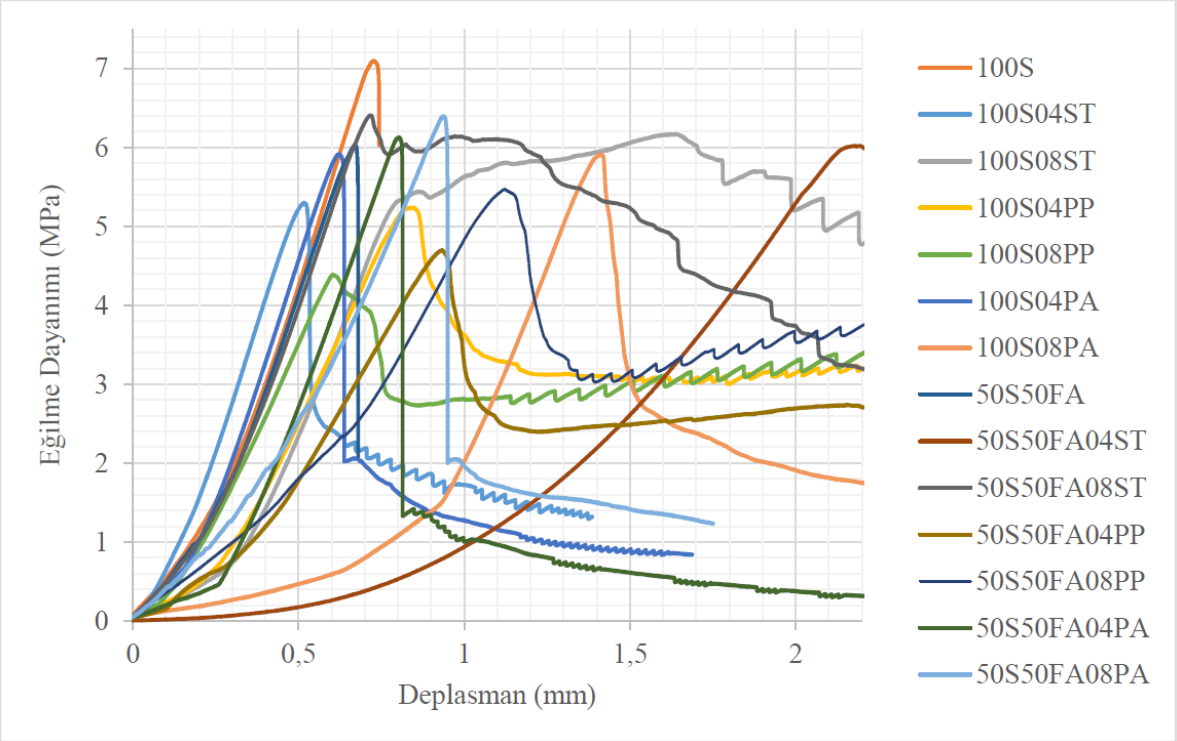
Çelik lifli seriler arasında yalnızca 100S08ST ve 50S50FA08ST serileri kontrol serisine nazaran gelişim performansı göstermiştir. Hacimce %0.4 çelik lif oranlı serilerin gelişim oranlarının dikkate alınmayacak derecede az olduğu görülmektedir. Bu noktada çelik lif kullanımı artışının eğilme dayanımı-deplasman gelişimine olumlu etki ettiği görülmektedir.

PA lifli serilerin tamamı ilk çatlak değerinden sonra eğilme dayanımında artış gösterememişlerdir. PA lifli serilerde ilk çatlak değerinde okunan deplasman değerinden sonra deplasman değerinde ilerlemeler olsa da eğilme dayanımındaki küçük iniş çıkışlar ilk çatlak

dayanımı değerini aşamamıştır. Bu noktadan PA lif kullanımının eğilme dayanımı- deplasman performansında bir etkisi olmadığı görülmektedir.



Şekil 4.7: Eğilme dayanımı-deplasman grafiği.



Şekil 4.8: Eğilme dayanımı-deplasman grafiği (daraltılmış yatay eksen).

Şekil 4.9 ve 4.10'da bazı serilerin test sonrası durumları gösterilmektedir.



Şekil 4.9: 50S50FA08PP serisinin yük deplasman testi sonrası görüntüsü.



Şekil 4.10: 100S08ST serisinin yük deplasman testi sonrası görüntüsü.

4.6 YÜKSEK SICAKLIK DENEYLERİ SONUÇLARI

Geopolimer beton numuneleri yüksek sıcaklık deneylerine tabi tutulmadan önce etüvde 24 saat süreyle kurutulmuştur. Numuneler 300, 600 ve 900C° derecelerde bir saat maruz kalacak şekilde yüksek sıcaklık etkisine bırakılmıştır. Testler tamamlandıktan sonra her bir sıcaklık sınıfında olmak üzere; ağırlık kaybı için kütleleri ölçülmüş, ultrases geçiş hızı kaybı için ultrases geçiş hızı deneyleri ve basınç kayıpları için basınç dayanımı testleri yapılmıştır.

4.6.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

Tablo 4.9 ve Şekil 4.11'de serilerin 90 gün dayanımları ve serilerin 300, 600 ve 900 C°'deki kalan dayanımları gösterilmektedir. Tabloda ayrıca yüksek sıcaklıklardaki dayanım değerlerinin 90 gün dayanım değerine nazaran yüzdece değişimi gösterilmektedir.

Serilerin 300 C°'deki kalan dayanımlarının 90 gün dayanımlarına nazaran neredeyse tamamının arttığı gözlenmektedir. Bu artışların polipropilen ve poliamid lifli serilerde çok kesin ve kayda değer artışlar olduğu görülmektedir. Örneğin %100 cüruf bağlayıcılı hacimce %0.4 ve %0.8 polipropilen lifli serilerde sırasıyla %49 ve %89'luk artışlar görülmektedir. Yine poliamid lifli %100 cüruf bağlayıcı serilerde %30 ila %60 gibi artışlar kaydedilmiştir. 300 C° dayanım değişimlerinde genel olarak %100 cüruf bağlayıcılı serilerin %50 uçucu kül ikameli serilere nazaran daha yüksek artışlar yaşadığı ortaya çıkmaktadır. 300 C° sıcaklıkta kalan basınç dayanımlarındaki 90 gün dayanımına nazaran gerçekleşen artışlarının üretilen numune içerisinde bulunan hidrate olmamış cüruf ve uçucu kül partiküllerinin hidratasyona uğraması sonucu çimentoda daha fazla geopolimer matrisine sebep olduğu ve bu matris artışının basınç dayanımına olumlu yansıdığı söylenebilir. Sonuçlar literatürde yapılmış diğer çalışmalar ile benzer trendi göstermiştir. Ayrıca basınç dayanımındaki bu artış yüksek sıcaklıklarda sodyum iyonunun düşük difüzyon katsayısına atfedilmektedir. Bu durum geopolimer matrisinde daha yüksek erime sıcaklığına sebep olduğu ve geopolimerizasyonun 400 C°'ye kadar devam etmesine sebep olduğu belirtilmektedir (Hussin, et al., 2015)

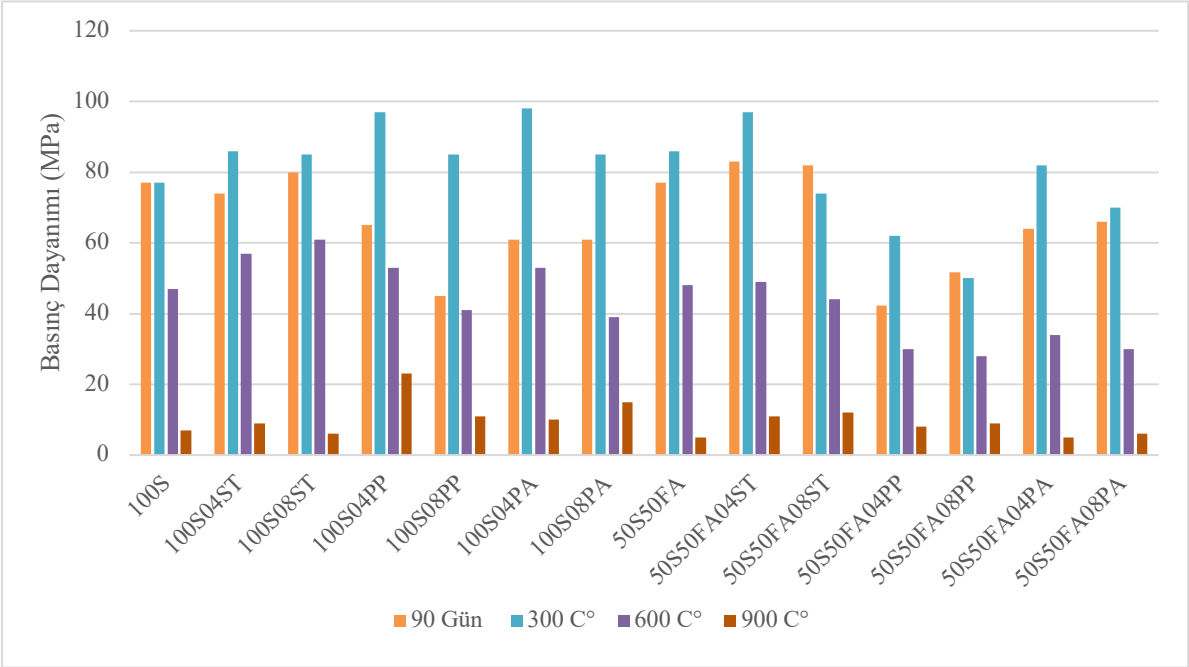
Öte yandan 600 ve 900 C° sıcaklıklarda kalan basınç dayanımlarında ciddi düşüşler olduğu görülmektedir. 600 C° sıcaklık için her ne kadar 90 gün dayanımına nazaran kalan büyük kayıplar olduğu görülse de basınç dayanımı açısından tatmin edici değerler olduğu söylenebilir. 600 C°'de kalan basınç dayanımları 28 ile 61 MPa arasında değişerek ortalama 43,85 MPa'lık

bir basınç dayanımı elde edilmiştir. 600 C° sıcaklık testlerinde en yüksek kalan dayanımın çelik lifli serilerde olduğu görülmektedir. 600 C°'de serilerin kendi 90 günlük dayanımlarına kıyasla olan kayıplarının %8 ila %54 arasında olduğu görülmektedir. Bu kayıp ortalama %32'lik bir kayıp olarak kayda geçmektedir. 900 C°'de serilerin kalan dayanımlarının kayda değer bir dayanım kaybı olduğu görülmektedir. Bu kayıplar bazen %90'ı geçmekle beraber ortalama olarak %85'lik bir kayıp ortaya çıkmaktadır. 900 C°'de kalan basınç dayanımları 5 ila 23 MPa arasında değişmektedir. 900 C° sıcaklıkta serilerin tatmin edici bir dayanım sonucu vermediği söylenebilir. Literatürde geopolimer betonda 800 C°'den sonra basınç dayanımında ortalama boşluk büyüklüğünü artması ve bu boşlukların kristalin sodyumların amorf yapıların yerine geçmesinden dolayı azaldığı yönünde ifadeler bulunmaktadır (Al Bakri, et al., 2011). Ayrıca 600 ve 900 C°'deki bu ciddi düşüşler numuneler içerisinde bulunan serbest suyun buharlaşmasından, yüksek sıcaklıktan kaynaklanan lif erimelerinden ve geopolimer matrisinin geri dönüşmesinden kaynaklandığı belirtilmektedir (Aygörmez, et al., 2020). 900 C° sıcaklıkta polipropilen lifli seride (100S04PP) elde edilen 23 MPa'lık kalan basınç dayanımı sonucu göze çarpmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisiyle serbest suyun kütleden çıkması ile oluşan boşlukların polipropilen liflerin eriyip bu boşluklarda etkili olduğu ve dolayısıyla beklenenden daha yüksek bir basınç dayanımı sergilediği söylenebilir.

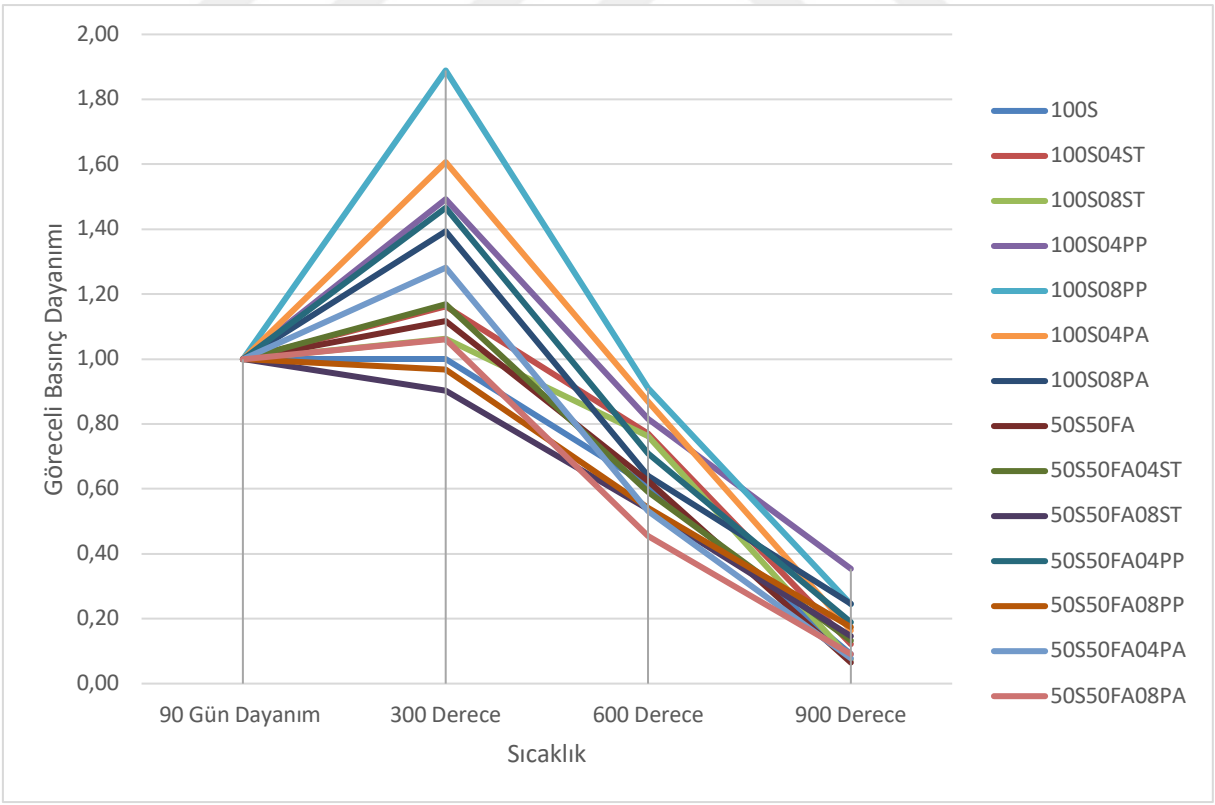
Şekil 4.12 ve Tablo 4.10'da sonuçların daha da anlamlandırılabilmesi açısından yüksek sıcaklıkta göreceli basınç dayanımları gösterilmektedir.

Tablo 4.9: Yüksek sıcaklıkta basınç dayanımları ve basınç dayanımı değişimleri.

Seri	90 Gün Dayanımı (MPa)	300 C° Dayanımı (MPa)	Dayanımı Değişimi (%)	600 C° Dayanımı (MPa)	Dayanımı Değişimi (%)	900 C° Dayanımı (MPa)	Dayanımı Değişimi(%)
100S	77	77	0,00	47	-38,96	7	-90,91
100S04ST	74	86	16,22	57	-22,97	9	-87,84
100S08ST	80	85	6,25	61	-23,75	6	-92,50
100S04PP	65	97	49,23	53	-18,46	23	-64,62
100S08PP	45	85	88,89	41	-8,89	11	-75,56
100S04PA	61	98	60,66	53	-13,11	10	-83,61
100S08PA	61	85	39,34	39	-36,07	15	-75,41
50S50FA	77	86	11,69	48	-37,66	5	-93,51
50S50FA04ST	83	97	16,87	49	-40,96	11	-86,75
50S50FA08ST	82	74	-9,76	44	-46,34	12	-85,37
50S50FA04PP	41,3	62	46,57	30	-29,08	8	-81,09
50S50FA08PP	51,7	50	-3,29	28	-45,84	9	-82,59
50S50FA04PA	64	82	28,13	34	-46,88	5	-92,19
50S50FA08PA	66	70	6,06	30	-54,55	6	-90,91



Şekil 4.11: 90 gün ve yüksek sıcaklık dayanımları.



Şekil 4.12: Yüksek sıcaklıkta göreceli basınç dayanımları.

Tablo 4.10: Yüksek sıcaklıkta göreceli basınç dayanımları.

Seri	90 Gün Dayanımı	300 C°	600 C°	900 C°
100S	1,00	1,00	0,61	0,09
100S04ST	1,00	1,16	0,77	0,12
100S08ST	1,00	1,06	0,76	0,08
100S04PP	1,00	1,49	0,82	0,35
100S08PP	1,00	1,89	0,91	0,24
100S04PA	1,00	1,61	0,87	0,16
100S08PA	1,00	1,39	0,64	0,25
50S50FA	1,00	1,12	0,62	0,06
50S50FA04ST	1,00	1,17	0,59	0,13
50S50FA08ST	1,00	0,90	0,54	0,15
50S50FA04PP	1,00	1,47	0,71	0,19
50S50FA08PP	1,00	0,97	0,54	0,17
50S50FA04PA	1,00	1,28	0,53	0,08
50S50FA08PA	1,00	1,06	0,45	0,09

Tablo 4.11'de ayrıca, serilerin kontrol serisine nazaran her bir yüksek sıcaklık sınıfındaki dayanım değişimleri gösterilmektedir. Lifsiz seri (50S50FA) 300 ve 600 C° derece sıcaklıklarda kontrol serisine kıyasa daha fazla dayanım göstermiş, sırasıyla %11 ve %2'lik bir artış göstermiştir. 900 C° sıcaklıkta ise 50S50FA kontrol serisine nazaran %28'lik bir kayıp gösterse de basınç dayanımı anlamında birbirine yakın değerlerdir.

%100 cüruf bağlayıclı PP lifli seriler deney uygulanan üç sıcaklık sınıfında kontrol serisine nazaran oldukça iyi bir performans göstermektedirler. Özellikle 900 C° sıcaklıktaki PP lifli seriler kontrol serisinin 900 C°'deki dayanımına nazaran %228 ve %57 gibi çok ciddi artışlar sergilemişlerdir. Ancak %50 uçucu kül ikameli PP lifli seriler 300 ve 600 C° sıcaklıklarda kontrol serisine nazaran %19 ila %40 arasında dayanım kaybı görülmektedir. PP lifli tüm serilerde lif oranın hacimce %0.4'ten %0.8'e çıkmasıyla dayanım artışının referans seriye nazaran daha az arttığı ve dayanım azalmasının ise daha çok olduğu ortaya çıkmaktadır.

PA lifli tüm serilerde 300 ve 600 C°'deki dayanımların referans seriye nazaran dayanım artışının lif oranın artmasına bağlı olarak daha az gerçekleştiği dayanım azalmasının ise daha fazla olduğu görülmektedir. %100 cüruf bağlayıcı PA lifli seriler kontrol serisine nazaran genel

olarak dayanım artışı göstermektedir. Özellikle 900 C°'deki artışlar dikkate değerdir. Öte yandan %50 uçucu kül ikameli PA lifli seriler genel olarak referans seriye nazaran azalma trendi göstermektedirler.

ST yani çelik lifli seriler her iki bağlayıcı türünde kontrol serisine nazaran artış göstermektedirler. %100 cüruf bağlayıcılı çelik lifli seriler %10 ila %30 arasında artışlar göstererek tatmin edici sonuçlar göstermektedirler. %100 cüruf bağlayıcılı çelik lifli serilerdeki dayanım artışı oranı ve lif hacmi arasında doğrudan bir artış ya da azalış ilişkisi söylemek mümkün olmayabilir. %50 uçucu kül ikameli çelik lifli seriler de %25 ila 57 arasında artışlar gösterirken hacimce lif artışında referans seriye kıyasla %3,90 ve %6,28 gibi dayanım kaybı performansı göstermektedirler.

Tablo 4.11: Serilerin kontrol serisine nazaran her bir yüksek sıcaklık sınıfındaki dayanım değişimleri.

Seri	300 C° (MPa)	D.O (%)	600 C° (MPa)	D.O (%)	900 C° (MPa)	D.O (%)
100S	77,00	Kontrol	47,00	Kontrol	7,00	Kontrol
100S04ST	86,00	11,69	57,00	21,28	9,00	28,57
100S08ST	85,00	10,39	61,00	29,79	6,00	-14,29
100S04PP	97,00	25,97	53,00	12,77	23,00	228,57
100S08PP	85,00	10,39	41,00	-12,77	11,00	57,14
100S04PA	98,00	27,27	53,00	12,77	10,00	42,86
100S08PA	85,00	10,39	39,00	-17,02	15,00	114,29
50S50FA	86,00	11,69	48,00	2,13	5,00	-28,57
50S50FA04ST	97,00	25,97	49,00	4,26	11,00	57,14
50S50FA08ST	74,00	-3,90	44,00	-6,38	12,00	71,43
50S50FA04PP	62,00	-19,48	30,00	-36,17	8,00	14,29
50S50FA08PP	50,00	-35,06	28,00	-40,43	9,00	28,57
50S50FA04PA	82,00	6,49	34,00	-27,66	5,00	-28,57
50S50FA08PA	70,00	-9,09	30,00	-36,17	6,00	-14,29

Şekil 4.13, 4.14 ve 4.15'te yüksek sıcaklık deneyi sonrası bazı serilere ait yüksek sıcaklık deneyi sonrası görüntülere yer verilmektedir.



Şekil 4.13: 900 derece sıcaklıkta 100S08PP serisi numunesi.



Şekil 4.14: 600 derece sıcaklıkta 50S50FA04PA serisi.



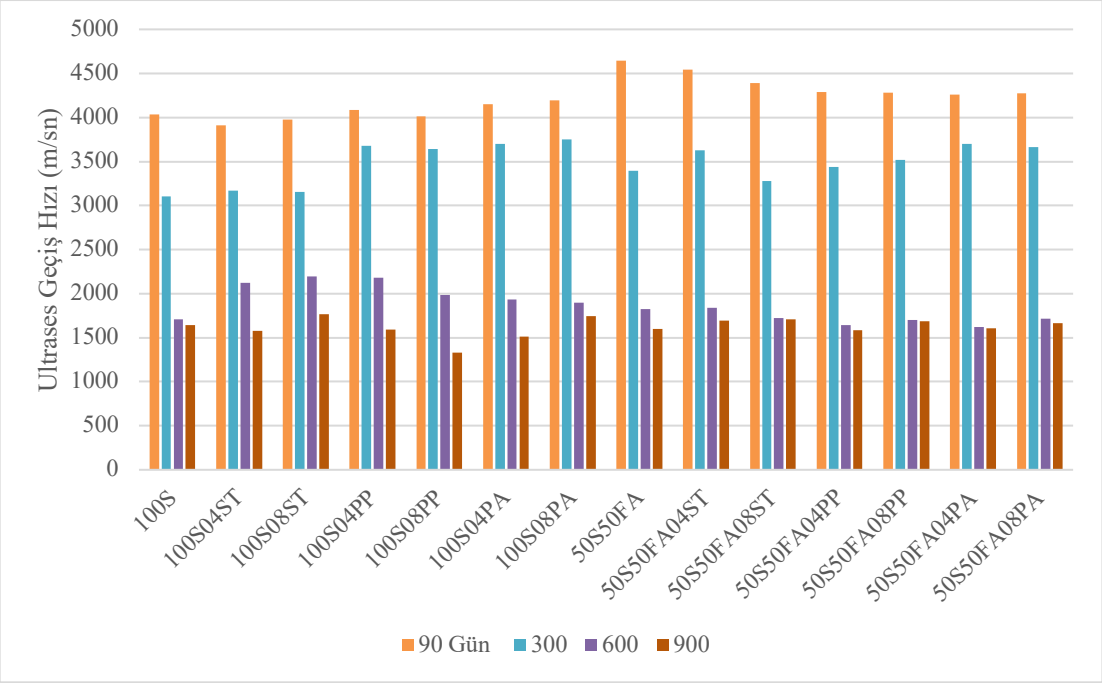
Şekil 4.15: 300 derece sıcaklıkta 100S (solda) ve 50S50FA04ST (sağda).

4.6.2 Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Tablo 4.12 ve Şekil 4.16'da geopolimer serilerin yüksek sıcaklıklarda ve 90 gündeki ultrases geçiş hızları gösterilmektedir. Tablo'da ayrıca sınıfında kontrol serisine (100S) nazaran her bir sıcaklık sınıfı içerisindeki ultrases geçiş hızı değişim oranı da gösterilmektedir. Genel olarak tümserilerde 900 C°'de kontorl serisine kıyasla geçiş hızında azalma olduğu görülmektedir. Lifsiz seri olan %50 uçucu kül ikameli 50S50FA serisi kontrol serisine nazaran 300 ve 600 C° içerisinde %8,50 ve %6,17 'lik daha yüksek geçiş hızı değeri sergilemiştir. Çelik lifli tüm seriler çok büyük bir çoğunlukla referans serisine nazaran her bir sıcaklık değerinde daha iyi bir geçiş hızı performansı göstermişlerdir. Özellikle 100S04ST ve 100S08ST 600 C°'de kontrol serisine nazaran sırasıyla %19 ve %22'lik daha iyi bir sonuç vermişleridir. Öte yandan PP lifli serilerde %100 cüruf bağlayıcılı seriler 600 C°'ye kadar referans seriye nazaran ultrases geçiş hızında artış göstermiştir. Ancak 900 C°'de azalma olmuştur. %100 cüruf bağlayıcılı PP lifli serilerde hacimce lif oranı arttıkça geçiş hızı daha az artmıştır. %50 uçucu kül ikameli PP lifli serilerde ise durum tam tersidir. PA lifli serilerin tümünde hacimce lif oranının artışı kontrol serisine kıyasla ultrases geçiş hızını daha yüksek kılmıştır. PA lifli seriler 300 ve 600 C° sıcaklıklarda ekseriyetle artış göstermişlerdir.

Tablo 4.12: Yüksek sıcaklıkta ultrases geçiş hızı değerleri.

Seriler	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	300 C°	300 C° D.O (%)	600 C°	600 C° D.O (%)	900 C°	900 C° D.O (%)
100S	4032,5	**3103,50**	Kontrol	**1711,83**	Kontrol	**1640,33**	Kontrol
100S04ST	3912	3165,67	1,96	2120,00	19,25	1577,00	-4,02
100S08ST	3974,67	3155,50	1,65	2197,00	22,08	1768,50	7,25
100S04PP	4083,33	3676,50	15,59	2181,83	21,54	1594,83	-2,85
100S08PP	4011,33	3641,50	14,77	1981,33	13,60	1330,50	-23,29
100S04PA	4152	3696,67	16,05	1932,83	11,43	1509,00	-8,70
100S08PA	4196,17	3750,17	17,24	1899,67	9,89	1744,17	5,95
50S50FA	4643,67	3391,67	8,50	1824,33	6,17	1599,83	-2,53
50S50FA04ST	4545,17	3625,50	14,40	1841,00	7,02	1693,00	3,11
50S50FA08ST	4388,5	3280,67	5,40	1719,67	0,46	1709,00	4,02
50S50FA04PP	4285,5	3440,00	9,78	1640,17	-4,37	1586,00	-3,43
50S50FA08PP	4282,5	3519,00	11,81	1701,50	-0,61	1686,00	2,71
50S50FA04PA	4256	3700,67	16,14	1624,33	-5,39	1608,67	-1,97
50S50FA08PA	4271	3665,83	15,34	1716,83	0,29	1667,80	1,65



Şekil 4.16: Yüksek sıcaklık sonrası ultrases geçiş hızı sonuçları.

Tablo 4.13'te 90 günlük ultrases geçiş hızı değerlerine göre yüzdece geçiş hızı kayıpları verilmektedir. Serilerin sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızlarında ciddi azalmalar olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. %100 cüruf bağlayıcılı serilerin %50 uçucu kül ikameli serilere nazaran tüm sıcaklık sınıflarında ortalama olarak yakın ancak daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir. Lifsiz serilerde 100S her sıcaklık sınıfında 50S50FA'ya nazaran daha az dayanım kaybı sonuçları ortaya koymuştur. Çelik lifli serilerde ultrases geçiş hızı kaybı 300 C° %19,08 ile %25,24, 600 C°de %44,72 ile %60,81, 900 C°'de ise %59 ila %62 arasında değişmektedir. %50 uçucu kül ikamesiyle 90 gün geçiş hızında nazaran bu kayıpların daha yüksek olduğu görülmektedir. PP lifli serilerde 90 gün ultases geçiş hızına nazaran geçiş hızı kaybı %50 ikameli serilerde daha fazladır. Örneğin 300 C°'de ultrases geçiş hızı kaybı %100 cüruf bağlayıcılı PP lifli serilerde %9 civarındayken %50 ikameli PP lifli serilerde %19 ila %17 civarındadır. Ayrıca PP lifli serilerde lif oranı arttıkça 90 gün geçiş hızına nazaran olan kaybın daha da arttığı görülmektedir. PA lifli serilerde de durumun aynı olduğu söylenebilir. Ancak PP lifli serilerin tersine olarak PA lifli serilerde lif oranı arttıkça 90 günlük ultrases geçiş hızına nazaran olan geçiş kaybını azaldığı görülmektedir.

Tablo 4.13: Yüksek sıcaklıklarda 90 gün ultrases geçiş hızına nazaran ultrases geçiş hızı kayıpları (%).

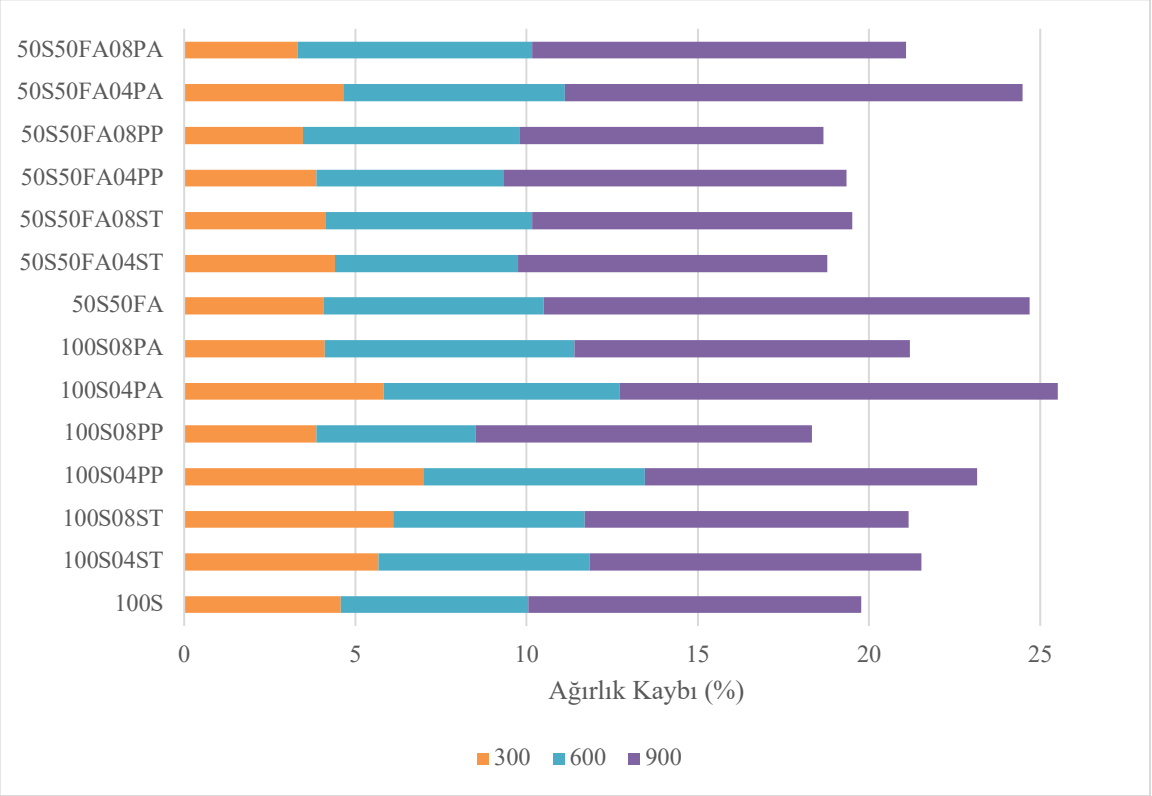
Seriler	300 C°	600 C°	900 C°
100S	23,04	57,55	59,32
100S04ST	19,08	45,81	59,69
100S08ST	20,61	44,72	55,51
100S04PP	9,96	46,57	60,94
100S08PP	9,22	50,61	66,83
100S04PA	10,97	53,45	63,66
100S08PA	10,63	54,73	58,43
50S50FA	26,96	60,71	65,55
50S50FA04ST	20,23	59,50	62,75
50S50FA08ST	25,24	60,81	61,06
50S50FA04PP	19,73	61,73	62,99
50S50FA08PP	17,83	60,27	60,63
50S50FA04PA	13,05	61,83	62,20
50S50FA08PA	14,17	59,80	60,95

4.6.3 Ağırlık Kaybı Sonuçları

Ağırlık kaybı sonuçları tablo 4.13 ve Şekil 4.17'de gösterilmektedir. 300 C° sıcaklıkta seriler ortalama olarak %4.64 ağırlık kaybetmişlerdir. 300 C°'de ağırlık kaybı %3,31 ila %6,98 arasında değişmektedir. 300 C°'de serilere %50 uçucu kül ikamesinin genel olarak ağırlık kaybını azalttığı görülmektedir. 600 C°'de serilerin ağırlık kaybı ortalama %6,10 olmakla birlikte ağırlık kaybı %4,64 ile %7,29 arasında değişmektedir. 600 C° sıcaklıkta %100 cüruf bağlayıcılı seriler daha az ağırlık kaybı performansı göstermiştir. 600 C° lif kullanımlarının ağırlık kaybına ciddi bir etkisi olmadığı görülmektedir. 900 C°'de ortalama ağırlık kaybı %10,48 iken bu değerler %8,88 ile %14,19 arasında değişmektedir. Yine lif kullanımının ağırlık kaybı azalmasına önemli bir etkisi olmadığı belirtilebilir. Genel olarak sıcaklık arttıkça yüzdece ağırlık kaybının arttığı görülmektedir. Sıcaklık artışı geopolimerlerde dehidrasyon meydana getirmektedir. Sıcaklık artışı numune içerisindeki nemin artışına sebep olup yüzeye doğru kaçışına sebep olmakta olup bu çıkış iç mikro yapının hasarına ve geopolimerlerin kütle kaybına sebep olmaktadır (Çelik, et al., 2018)

Tablo 4.14: Yüksek sıcaklıkta ağırlık kaybı.

Seriler	300 C° (%)	600 C° (%)	900 C° (%)
100S	4,58	5,47	9,72
100S04ST	5,67	6,18	9,68
100S08ST	6,11	5,58	9,46
100S04PP	6,98	6,48	9,70
100S08PP	3,87	4,64	9,83
100S04PA	5,83	6,89	12,80
100S08PA	4,10	7,29	9,81
50S50FA	4,07	6,43	14,19
50S50FA04ST	4,41	5,34	9,03
50S50FA08ST	4,12	6,04	9,36
50S50FA04PP	3,87	5,47	10,01
50S50FA08PP	3,47	6,31	8,88
50S50FA04PA	4,65	6,47	13,37
50S50FA08PA	3,31	6,85	10,93



Şekil 4.17: Yüksek sıcaklık deneyi sonrası serilerde ağırlık kaybı sonuçları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

5.1 GENEL

Bu çalışmanın temel gayesi, sürdürülebilir dünya oluşturma gayesi temelinde, çevreye duyarlı ve günümüz dünyasında çevreye büyük zararları olan çimento esaslı betonların yerine en büyük aday gözüken geopolimer teknolojisi ile üretilen betonların farklı bağlayıcı, farklı lif ve lif oranlarında hem mekanik hem de durabilite özelliklerinin incelenmesidir. Geopolimer betonların üretiminde ana bağlayıcı olarak cüruf ve uçucu kül kullanılmıştır. Lif olarak çelik, polipropilen ve poliamid lif olmak üzere üç tip lif tercih edilmiş ve hacimce %0.4 ve %0.8 olacak şekilde serilerde kullanılmıştır. Malzeme ve metod kısmında ve Tablo 3.9'da anlatıldığı gibi 7 seri %100 cüruf bağlayıcılı ve 7 seri %50 cüruf-%50 uçucu kül bağlayıcılı olacak şekilde toplamda 14 seri üretilmiştir. İlk olarak fiziksel deneyler, ardından mekanik ve durabilite deneyleri olacak şekilde testler gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde yapılan çalışmalar ile ilgili önemli sonuçlar ifade edilmekte ve ilgili alan ile ilgili gelecekte yapılacak olan çalışmalara birtakım öneriler verilmektedir.

5.2 SONUÇLAR

1. Geopolimer seriler genel basınç dayanımı anlamında oldukça iyi sonuçlar vermiştir. 28 günlük dayanımlarda tüm serilerde ortalama 57 MPa ve 90 günlük serilerde ortalama 66 MPa'lık basınç dayanımı elde edilmiştir.
2. Geopolimer seriler kontrol serisine (100S) kıyasla basınç dayanımında %14'lük daha düşük sonuçlar vermiştir.
3. Kontrol serisi 100S'e kıyasla lif takviyesinin sadece %50 uçucu kül ikameli çelik lifli ve lifsiz serilerde olduğu görülmektedir. Bu iyileşmeler 50S50FA04ST için %8 50S50FA08ST için %7,37 ve lifsiz seri için %0,79 artışlar olarak ortaya çıkmaktadır.
4. Serilerin kendi içinde yapılan kıyaslamalarında uçucu kül ilavesinin daha yüksek sonuçlar verdiği görülmektedir. Örneğin 100S04ST 73,93 MPa iken 50S50FA04 ST 82,91 MPa, 100S08PA 61 MPa iken 50S50FA08PA 66 MPa'lık sonuçlar göstermişlerdir. Literatürde geopolimerlerin basınç dayanımı artışının uçucu kül artışıyla arttığı ifade edilmektedir (Al Bakri, et al., 2010).

5. Basınç dayanımında kontrol serisine kıyasla en yüksek dayanım kaybını PP lifli serilerde görülmüştür. Bu durum PP lifli serilerin matris ara yüzey geçişlerinde düşük bağ kuvvetine sahip olması ile açıklanabilir (Al Mashhadani, et al., 2018).
6. Ultrases geçiş hızlarında kontrol serisine kıyasla tüm seriler ortalama %4,92'lik bir gelişim göstermiştir. %100 cüruf içerikli serilerin bazılarında düşüş görülse de %50 uçucu kül ikameli serilerin tamamında %7,58'lik bir artış gerçekleşmiştir.
7. Yarmada çekme dayanımlarında kontrol serisi 100S'e nazaran yalnızca çelik lifli seriler olmuştur. 90 gün dayanımda 100S08ST %19,29, 50S50FA04ST %21,67 ve 50S50FA08ST %17,03'lük dayanım gelişimi göstermiştir. Geopolimer matrise çelik liflerin eklenmesi efektif bir şekilde çatlak sonrası davranışı geliştirerek çekme dayanımına olumlu etki etmektedir. (Bernal, et al., 2010)
8. Yarmada çekme dayanımında PP ve PA lif takviyesinin dayanım gelişimine katkısı olmamıştır.
9. Yarmada çekme dayanımlarında lif takviyesi miktarındaki artışın genel olarak dayanım gelişimine olumlu etkisi olduğu görülmüştür.
10. %100 cüruf bağlayıcılı seriler ortalama olarak 6,5 MPa'lık eğilme dayanımı performansı gösterirken %50 kül ikameli seriler ortalama olarak 6 MPa'lık bir eğilme dayanımı sonucu ortaya koymuşlardır. %50 uçucu kül ikameli tüm seriler kontrol serisine kıyasla eğilme dayanımını geliştirememişlerdir.
11. 100S04ST serisi hariç tüm serilerde kontrol serisine nazaran ortalama %11'lik bir eğilme dayanımı azalması olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır.
12. Ekseriyetle bütün lifli serilerde hacimce lif kullanımın artışının eğilme dayanımlarındaki performans gelişimine olumsuz etkisi olduğu görülmektedir. Örneğin 100S04PA %1'lik azalma gösterirken 100S08PA %14,24'lük, 50S50FA04PA %5,9'luk bir azalma gösterirken 50S50FA08PA %8,17'lik ve 100S04PP %6,6'lık bir azalma gösterirken 100S08PP %17,1'lik bir azalma göstermektedir.
13. Eğilme dayanımı- deplasman sonuçlarında PP lifli seriler ilk çatlak değerinden sonra lif özelliği etkisini göstererek eğilme dayanımı almaya devam ederek ve artırarak deplasman gelişimini sürdürmüşlerdir. Örneğin 50S50FA08PP serisi, seriler arasında en iyi eğilme dayanımı-deplasman davranışı özelliği göstererek takribi ilk çatlak değeri olan 1,25mm ve 3 MPa olan eğilme dayanımı değerinden 4,5 MPa dayanım değerine çıkıp tekrardan 3 MPa değerlerine gelerek 7,5 mm deplasman performansı sergilemiştir.

14. PP lifli serilerde hacimce lif kullanımının artışının eğilme dayanımı-deplasman sonuçları gelişimine olumlu etki ettiği görülmektedir.
15. Çelik lifli seriler arasında yalnızca 100S08ST ve 50S50FA08ST serileri kontrol serisine nazaran eğilme dayanımı-deplasman sonuçlarında gelişim performansı göstermiştir. Hacimce %0.4 çelik lif oranlı serilerin gelişim oranlarının dikkate alınmayacak derecede az olduğu görülmektedir. Bu noktada çelik lif kullanımı artışının eğilme dayanımı-deplasman gelişimine olumlu etki ettiği görülmektedir.
16. PA lifli serilerin tamamı ilk çatlak değerinden sonra eğilme dayanımında artış gösterememişlerdir
17. Geopolimer seriler 300 ve 600 C° sıcaklıkta kabul edilir ve yüksek basınç dayanımı sonuçları vermişlerdir. 600 C° sıcaklıkta tüm geopolimer seriler 90 günlük basınç dayanımlarına kıyasla %33,11'lik bir dayanım kaybı yaşamıştır. Yüksek dayanımlı portland çimentolu betonların 600 C° sıcaklıkta ortalama olarak %50 dayanım kaybı (Kodur , 2014) düşünüldüğünde geopolimer betonlar oldukça tatmin edici sonuçlar vermiştir.
18. 900 C° sıcaklıkta seriler ekseriyetle tatmin edici basınç dayanımı sonuçları vermemiştir. 900 C° sıcaklıkta %100 cüruflu PP lifli seriler en yüksek değerleri verirken en yüksek basınç dayanım sonucu 100S04PP serisinde elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda oluşan numune içerisinde nemin numune içerisinden çıkışlarının oluşturduğu boşluğun PP liflerin erimesi ile doldurulmasının yüksek basınç dayanımına sebep olduğu söylenebilir (Aygörmez, et al., 2020)
19. Serilerin 300 C°'deki kalan dayanımlarının 90 günlük basınç dayanımlarına nazaran neredeyse tamamının arttığı gözlenmektedir. Bu artışların PP ve PA lifli serilerde çok kesin ve kayda değer artışlar olduğu görülmektedir.
20. 300 C° sıcaklıkta kalan basınç dayanımlarındaki 90 günlük basınç dayanımına nazaran gerçekleşen artışlarının üretilen numune içerisinde bulunan hidrate olmamış cüruf ve uçucu kül partiküllerinin hidratasyona uğraması sonucu daha fazla geopolimer matrisine sebep olduğu ve bu matris artışının basınç dayanımına olumlu yansıdığı söylenebilir.
21. 300 C° sıcaklıkta referans seriye (100S) nazaran hemen hemen tüm seriler basınç dayanımlarında gelişim göstermiştir. 300 C° sıcaklıkta basınç dayanımın hacimce lif kullanım oranı arttıkça azaldığı görülmüştür. Örneğin 50S50FA04 ST kontrol serisine kıyasla %25,97 gelişm gösterirken 50S50FA08ST %3,97 azalmıştır.

22. 300 C° sıcaklıkta %50 uçucu kül ikamesi ve hacimce yüksek lif kullanımı kontrol serisine kıyasla basınç dayanımı gelişimlerini negatif yönde gelişmiştir.
23. 600 C° sıcaklıkta %50 uçucu kül ikamesi ve hacimce lif kullanımın artışı kontrol serisine nazaran basınç dayanımı gelişimini olumsuz etkilemiştir. Çelik lifli seriler olan 100S04ST ve 100s08ST sırasıyla %21,28 ve %29,79'luk basınç dayanımı gelişimi göstermişlerdir.
24. Lif kullanımının yüksek sıcaklık sonrası ağırlık kaybı azalmasına önemli bir etkisi olmadığı belirtilebilir. Genel olarak sıcaklık arttıkça yüzdece ağırlık kaybının arttığı görülmüştür. Sıcaklık artışı geopolimerlerde dehidrasyon meydana getirmektedir. Sıcaklık artışı numune içerisindeki nemin artışına sebep olup yüzeye doğru kaçışına sebep olmakta olup bu çıkış iç mikro yapının hasarına ve geopolimerlerin kütle kaybına sebep olmaktadır (Çelik, et al., 2018).

KAYNAKLAR

Manalo, A. C. ve diğerleri, 2015. Effects of alkali treatment and elevated temperature on the mechanical properties of bamboo fibreepolyester composites. *Composites Part B,* Cilt 80, pp. 73-83.

Singh, N. B., 2018. Fly Ash-Based Geopolymer Binder: A Future Construction Material. *Minerals,* 12 Temmuz.8(7).

Çelik, A. ve diğerleri, 2018. High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials,* Cilt 187, pp. 1190-1203.

Akçaözoğlu, K., Akçagözoğlu, S. & Açıkgöz, A., 2017. Investigation of Hydration Temperature of Alkali Activated Slag Based Concrete. *KSCE Journal of Civil Engineering,* 0(0), pp. 1-9.

Al Bakri, A. M. M. ve diğerleri, 2012. The Processing, Characterization and Properties of Fly Ash Based Geopolymer Concrete. *Rev. Adv. Material Science,* Cilt 30, pp. 90-97.

Al Bakri, M. M. ve diğerleri, 2011. Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement. *Journal of Engineering and Technology Research,* 3(1), pp. 1-4.

Al Bakri, M. M. ve diğerleri, 2011. Review on fly ash-based geopolymer concrete without Portland Cement. *Journal of Engineering and Technology Research,* 3(1), pp. 1-3.

Ali, M. B., Saidur, R. & Hossain, M. S., 2011. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* 31 January, Volume 15, pp. 2252-2261.

Al-Majidi, M. H., Lampropoulos, A., Cundy, A. & Meikle, S., 2016. Development of geopolymer mortar under ambient temperature for in situ applications. *Construction and Building Materials,* Cilt 120, pp. 198-211.

Al-mashhadani, M. M. ve diğerleri, 2018. Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and Building Materials,* Cilt 167, pp. 505-513.

Almuhsin, B., al-Attar, T. & Hasan, Q., 2018. Effect of discontinuous curing and ambient temperature on the compressive strength development of fly ash based Geopolymer concrete. *MATEC Web of Conferences,* Cilt 162.

Amran, Y. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H. & El-Zeadani, M., 2020. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production,* Cilt 251.

Antoni, A., Sugiarto, A. & Hardjito, D., 2017. Effect of Variability of Fly Ash Obtained from the Same Source on the Characteristics of Geopolymer. *MATEC Web of Conferences,* 97(1026).

Arie, W., Gunasekara, C., Law, D. W. & Setunge, S., 2017. Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials,* Cilt 143, pp. 272-279.

Assi, L. ve diğerleri, 2016. Improvement of the early and final compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete at ambient conditions. *Construction and Building Materials,* Cilt 123, pp. 806-813.

ASTM International, 2016. *ASTM C597 Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.* West Conshohocken: ASTM International.

ASTM International, 2019. *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading).* West Conshohocken: ASTM.

Aygörmez, Y., Canpolat , O., Al-mashhadani, M. & Uysal, M., 2020. Elevated temperature, freezing-thawing and wetting-drying effects on polypropylene fiber reinforced metakaolin based geopolymer composites. *Construction and Building Materials,* Cilt 235.

Bakharev, T., Sanjayan, J. G. & Cheng, Y.-B., 1999. Effect of elevated temperature curing on properties of alkali-activated slag concrete. *Cement and Concrete Research,* Cilt 29, pp. 1619-1625.

Baradan, B., 2015. *Beton.* İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.

BASF, 2020. *MasterGlenium 51.* [Çevrimiçi] Available at: https://www.master-builders-solutions.basf.com.tr/tr-tr/products/masterglenium/masterglenium-51
[Erişildi: 10 Mart 2020].

Bernal, S., Gutierrez, R. D., Delvesto, S. & Rodriguez, E., 2010. Performance of an alkali-activated slag concrete reinforced with steel fibers. *Construction and Building Materials,* Cilt 24, pp. 208-214.

Chanh, N. V., Trung, B. D. & Tuan, D. W., 2019. *Recent Research Geopolymer Concrete.* Sappora, Asian Concrete Fedaration & Japan Concrete Fedaration.

Chi, M., 2012. Effects of dosage of alkali-activated solution and curing conditions on the properties and durability of alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials,* Cilt 35, pp. 240-245.

Chindaprasirt, P., Sata, V., Pangdaeng, S. & Sinsiri, T., 2007. Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement and Concrete Composites,* Volume 29, pp. 224-229.

Collins, F. & Sanjayan, J. G., 2001. Microcracking and strength development of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Research,* Cilt 23, pp. 345-352.

CPTP, 2010. Geopolymer Concrete. *Techbrief,* 10(14).

Davidovits, J., 2006. *Fire proof, heat resistant composites.* [Çevrimiçi] Available at: https://www.geopolymer.org/applications/fire-proof-heat-resistant-composites/ [Erişildi: 21 12 2019].

Davidovits, J., 2011. *Geopolymer Chemistry and Applications.* 3 dü. Saint-Quentin: Institut Géopolymère.

Ding, Y., Dai, J.-G. & Shi, C.-J., 2016. Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials,* Cilt 127, pp. 68-79.

Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C. & van Deventer, J. S., 2007. The role of inorganic polymer technology in the development of ‘green concrete’. *Cement and Concrete Research,* 37(12), pp. 1590-1597.

Fan, F., Liu, Z., Xu, G. & Cai, C. S., 2018. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials,* Cilt 160, pp. 66-81.

Guerrieri, M., Sanjayan, J. & Collins, F., 2009. Residual compressive behavior of alkali-activated concreteexposed to elevated temperatures. *Fire and Materials,* Cilt 33, pp. 51-62.

Guerrieri, M. & Sanjayan, J. G., 2009. Behaviour of combined fly ash/slag based geopolymers when exposed to high temperatures. *Fire and Materials,* 34(4), pp. 163-175.

Guo, X. & Pan, X., 2018. Mechanical properties and mechanisms of fiber reinforced fly ash–steel slag based geopolymer mortar. *Construction and Building Materials,* Cilt 179, pp. 633-641.

Hardjito, D. & Rangan, B., 2005. *Studies of fly ash-based geopolymer concrete,* Perth: Researchgate.

Hardjito, D., Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2004. Factors influencing the compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete. *Civil Engineering Dimension,* 6(2), pp. 88-93.

Hassan, A., Arif, M. & Shariq, M., 2019. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment e A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production,* Cilt 223, pp. 704-728.

Hussin, M. W. ve diğerleri, 2015. Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures. *Materials and Structures,* Cilt 48, pp. 709-720.

Ismail, I. ve diğerleri, 2013. Influence of fly ash on the water and chloride permeability of alkali-activated slag mortars and concretes. *Construction and Building Materials,* Cilt 48, pp. 1187-1201.

Joseph, B. & Mathew, G., 2012. Influence of aggregate content on the behavior of fly ash based geopolymer concrete. *Scientia Iranica,* 19(5), pp. 1188-1194.

Jumrat, S., Chatveera, B. & Rattanadecho, P., 2011. Dielectric properties and temperature profile of fly ash-based geopolymer mortar. *International Communications in Heat and Mass Transfer,* Cilt 38, pp. 242-248.

Junaid, M. T. & Kayali, O., 2017. Response of alkali activated low calcium fly-ash based geopolymer concrete under compressive load at elevated temperatures. *Materials and Structures,* Cilt 50, pp. 1-10.

Junaid, M. T. ve diğerleri, 2014. Aspects of the deformational behaviour of alkali activated fly ash concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research,* Cilt 60, pp. 24-29.

Kodur , V., 2014. Properties of Concrete at Elevated Temperatures. *ISRN Civil Engineering,* Cilt 2014, pp. 1-15.

Kong, D. L. Y. & Sanjayan, J. G., 2008. Factors affecting the performance of metakaolin geopolymers exposed to elevated temperatures. *J. Mater. Sci.,* Issue 43, pp. 824-831.

Kordsa, 2020. *KraTos Makro.* [Çevrimiçi] Available at: https://www.kordsa.com/tr/urunler/detay/insaat-guclendirme/287/367/0 [Erişildi: 10 Mart 2020].

Kordsa, 2020. *KraTos Mikro.* [Çevrimiçi] Available at: https://www.kordsa.com/tr/urunler/detay/insaat-guclendirme/288/368/0 [Erişildi: 10 Mart 2020].

Kotwal, A. R., Kim, Y. J., Hu, J. & Sriraman, V., 2014. Characterization and Early Age Physical Properties of Ambient Cured Geopolymer Mortar Based on Class C Fly Ash. *International Journal of Concrete Structures and Materials,* 9(1), pp. 35-43.

Kumar, S., Kumar, R. & Mehrotra, S. P., 2010. Influence of granulated blast furnace slag on the reaction, structure and properties of fly ash based geopolymer. *J. Mater. Sci.,* Cilt 45, pp. 605-615.

Lee, N. K. & Lee, H. K., 2013. Setting and mechanical properties of alkali-activated fly ash/slag concrete manufactured at room temperature. *Construction and Building Materials,* Cilt 47, pp. 1201-1209.

Lloyd, R. R., Provis, J. L. & van Deventer, J. S. J., 2009. Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements. 1: remnant fly ash particles. *J. Mater. Sci.,* Cilt 44, pp. 608-619.

Malhotra, V. M. & Mehta, P., 2002. *High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories.* basım yeri bilinmiyor:yazarı bilinmiyor

Malwaki, A. B. ve diğerleri, 2016. Effects of Alkaline Solution on Properties of the HCFA Geopolymer Mortars. *Procedia Engineering,* Cilt 148, pp. 710-717.

Manjunatha, G. S., Radhakrishna, K. & Venugopal & Sasalatti, V. M., 2014. Strength Characteristics of Open Air Cured Geopolymer Concrete. *Transactions of the Indian Ceramic Society,* 73(2), pp. 149-156.

Mathew, G. & Joseph, B., 2018. Flexural behaviour of geopolymer concrete beams exposed to elevated temperatures. *2018,* Cilt 15, pp. 311-317.

McCaffrey, R., 2002. Climate Change and the Cement Industry. *GCL Magazine.*

Mehta, A. ve diğerleri, 2017. Influence of various parameters on strength and absorption properties of fly ash based geopolymer concrete designed by Taguchi method. *Construction and Building Materials ,* Cilt 150, pp. 817-824.

Naskar, S. & Chakraboty, A. K., 2016. Effect of nano materials in geopolymer concrete. *Perspective in Science,* Cilt 8, pp. 273-275.

Nuaklong, P., Sata, V. & Chindaprasirt, P., 2016. Influence of recycled aggregate on fly ash geopolymer concrete properties. *Journal of Cleaner Production,* Cilt 112, pp. 2300-2307.

Patil, S. S. & Patil, A. A., 2015. Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Geopolymer Concrete. 5(4).

Petermann , J. C. & Athar, S., 2010. *Alkali-activated geopolymers: a Literature Review,* Florida: Air Force Research Lab. Materials and Manufacturing Directorate.

Pilehvar, S. ve diğerleri, 2018. Physical and mechanical properties of fly ash and slag geopolymer concrete containing different types of micro-encapsulated phase change materials. *Construction and Building Materials,* Cilt 173, pp. 28-39.

Provis, J. L. & van Deventer, J. S. J., 2009. *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications.* Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

Ramujee, K. & Potharaju, M., 2017. Mechanical Properties of Geopolymer Concrete Composites. *materialstoday:Proceedings,* 4(2), pp. 2937-2945.

Rangan, B. V., 2008. Studies on Fly-Ash Based Geopolymer Concrete. *Malaysian Construction Research Journal,* 3(2), pp. 1-20.

Ranjbar, N. ve diğerleri, 2016. Mechanisms of interfacial bond in steel and polypropylene fiber reinforced geopolymer composites. *Composites Science and Technology,* Cilt 122, pp. 73-81.

Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T. & Chung, Y. S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials,* Cilt 47, pp. 409-418.

Sarker, P. K., Haque, R. & Ramgolam, K. V., 2013. Fracture behaviour of heat cured fly ash based geopolymer concrete. *Materials and Design,* Cilt 44, pp. 580-586.

Sarker, P. K. & Mcbeath, S., 2015. Fire endurance of steel reinforced fly ash geopolymer concrete elements. *Construction and Building Materials,* Cilt 90, pp. 91-98.

Shadnia, R., Zhang, L. & Li, P., 2015. Experimental study of geopolymer mortar with incorporated PCM. *Construction and Building Materials,* Issue 84, pp. 95-102.

Shaikh, F. U., 2016. Mechanical and durability properties of fly ash geopolymer concrete containing recycled coarse aggregates. *International Journal of Sustainable Built Environment,* 2016(5), pp. 277-287.

Shaikh, F. U. A., 2013. Review of mechanical properties of short fibre reinforced geopolymer composites. *Construction and Building Materials,* Cilt 43, pp. 37-49.

Shekhovstsova, J., Kearsley, E. P. & Kovtun, M., 2014. Effect of activator dosage, water-to-binder-solids ratio, temperature and duration of elevated temperature curing on the compressive strength of alkali-activated fly ash cement pastes. *Journal of the South african inStitution of civil engineering,* 56(3), p. 1013.

Sing, N. S. & Middendorf, B., 2020. Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials,* 20 Mart.Issue 237.

Sofi, M., van Deventer, J., Mendis, P. A. & Lukey, G. C., 2007. Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs). *Cement and Concrete Research,* Cilt 37, pp. 251-257.

Songpiriyakij, S., Pulngern, T., Pungpremtrakul, P. & Jaturapitakkul, C., 2011. Anchorage of steel bars in concrete by geopolymer paste. *Materials and Design,* Cilt 32, pp. 3021-3028.

Tanyıldızı, H. & Yonar, Y., 2016. Mechanical properties of geopolymer concrete containing polyvinyl alcohol fiber exposed to high temperature. *Construction and Building Materials,* Cilt 126, pp. 381-387.

Temuujin, J. ve diğerleri, 2011. Characterisation of class F fly ash geopolymer pastes immersed in acid and alkaline solutions. *Cement & Concrete Composites,* Cilt 33, pp. 1086-1091.

TSE, 2010. *TS EN 12390-6.* Ankara: TSE.

TSE, 2014. *TSE EN 12390-1.* Ankara: TSE.

TSE, 2019. *TS EN 12390-5.* Ankara: TSE.

U.S Departmant of Transportation, 2017. *Fly Ash Facts for Highway Engineers.* [Çevrimiçi] Available at: https://www.fhwa.dot.gov/pavement/recycling/fach01.cfm [Erişildi: 25 Aralık 2019].

Umniati, B. S., Risdanareni, P. & Zein, F. T. Z., 2017. Workability Enhancement of Geopolymer Concrete through The Use of Retarder. *API Conference Proceedings,* 29 September.Cilt 1887.

Vickers, L., van Riessen, A. & Rickard, W. D., 2015. Geopolymer Applications. %1 içinde*Fire-Resistant Geopolymers: Role of Fibres and Fillers to Enhance Thermal.* London: Springer, pp. 10-16.

Wallah, S. E. & Rangan, B. V., 2006. *Low Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long Term Properties,* Perth: Curtin University of Technology.

Wan Mastura, W. I., Kamarudin, H., Nizar, K. & Al Bakri, A. M. M., 2013. Mechanical Performances of Fly Ash geopolymer Bricks. *Advanced Science Letters,* 19(1), pp. 186-189.

Weerdt, K. D., 2011. *Geopolymers – State of the art,* Oslo : SINTEF Building and Infrastructure.

Weng, L. & Sagoe-Crenstil, K., 2007. Dissolution processes, hydrolysis and condensation reactions during geopolymer synthesis: Part I—Low Si /Al ratio systems. *J Mater Sci,* Cilt 42, pp. 2997-3006.

Yang, K.-H., Cho, A.-R. & Song, J.-K., 2012. Effect of water–binder ratio on the mechanical properties of calcium hydroxide-based alkali-activated slag concrete. *Construction and Building Materials,* Cilt 29, pp. 504-511.

Zhang, H. Y. et al., 2016. Thermal behavior and mechanical properties of geopolymer mortar after exposure to elevated temperatures. *Construction and Building Materials,* Volume 109, pp. 17-24.

Zhao, R. & Snjayan, J. G., 2011. Geopolymer and Portland cement concretes in simulated fire. *Magazine of Concrete Research,* 63(3).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	ÖMER FARUK KURANLI
Doğum Yeri	KIRKLARELİ/MERKEZ
Doğum Tarihi	13.12.1994
Uyruğu	☑ T.C. ❒ Diğer:
Telefon	+90 543 38862 58
E-Posta Adresi	omerkuranli@icloud.com
Web Adresi	-



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Sakarya Üniversitesi
Fakülte	Teknoloji
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2018

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	İnşaat Mühendisliği Programı

Makale ve Bildiriler
-