

**GEPOLİMER ÇİMENTOLU VE POLİVİNİL
ALKOL FİBERLİ BETONLARIN YÜKSEK
SICAKLIK DAYANIKLILIĞI**

YAVUZ YONAR

**Yüksek Lisans Tezi
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Harun TANYILDIZI
Haziran 2014**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEPOLİMER ÇİMENTOLU VE POLİVİNİL ALKOL FİBERLİ BETONLARIN
YÜKSEK SICAKLIK DAYANIKLILIĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YAVUZ YONAR

102125102

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10 Haziran 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 27 Haziran 2014

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Harun TANYILDIZI (F.Ü.)

Diğer Juri Üyeleri : Yrd. Doç. Dr. Erkut SAYIN (F.Ü.)

: Yrd. Doç. Dr. Mehmet Fatih COŞKUN (F.Ü.)

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimle ilgili çalışmalarımda, tez konusunun tespiti, deney programının belirlenmesi ve deneysel çalışmalarım aşamasındaki her türlü desteğinden dolayı danışman hocam Sayın Doç. Dr. Harun TANYILDIZI'na, malzeme temini ve labaratuvar çalışmalarım sırasında hep yanımda olan Arş. Gör. Dr. Ahmet COŞKUN'a, çalışmalarım süresince yardım eden Murat ŞAHİN ve Atılay AKGÜN'e, laboratuvar da beraber çalıştığım dönem arkadaşlarıma ve sonsuz sabırlarıyla desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi arz ederim.

Yavuz YONAR

ELAZIĞ - 2014

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
SİMGELER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. GEOPOLİMER	5
2.1. Geopolimer Kimyası	6
2.2. Geopolimer Bileşenleri.....	8
2.2.1. Uçucu Kül.....	8
2.2.2.Silis Dumanı	9
2.2.3. Cüruf.....	10
2.2.4.Fosfat	12
2.2.5. Pomza	12
2.2.6.Zeolit.....	13
2.2.7. Kayaç	14
2.2.8. Metakaolin	14
2.2.9. Akışkanlaştırıcı Katkı	16
2.2.10 Agrega	16

2.2.11. Su	17
2.2.12. Alkali Aktivatörler	18
2.2.12.1. Sodyum Silikat	18
2.2.12.2. Sodyum Hidroksit	19
2.2.12.3. Kalsiyum Hidroksit	19
2.2.12.4. Potasyum Hidroksit	20
2.3. Geopolimerde Yüksek Sıcaklık Etkisi	20
2.4. Çimentonun Çevreye Etkileri ve Geopolimer Uygulama Alanları	21
3. BETONDA LİF ÇEŞİTLERİ VE KULLANIMI	23
3.1. Lif Çeşitleri	23
3.1.1. Metalik Lifler	24
3.1.2 Mineral Lifler	25
3.1.3. Polimerik Lifler	27
3.1.4. PVA Lifler	27
3.2. Liflerin Beton Takviyesinde Kullanımı	29
3.3. Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri	30
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
4.1. Malzemeler	32
4.1.1. Uçucu Kül	32
4.1.2. Agregalar	33
4.1.3. Akışkanlaştırıcı Katkı	33
4.1.4. Su	34
4.1.5. Sodyum Hidroksit	34
4.1.6. Sodyum Silikat	34
4.2. Numunelerin Hazırlanması	35
4.3. Uygulanan Deneyler	35
4.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi	35

4.3.2. Ultrasonik Ses Geçirgenlik Deneyi	36
4.3.3. Numunelerin Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılması.....	37
4.3.6. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi	38
5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER	40
5.1. Basınç Dayanımı Deneyleri Sonuçları	40
5.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Sonuçları	44
5.3. Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları	47
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	52
7. KAYNAKLAR.....	53
8. ÖZGEÇMİŞ	62

ÖZET

Bu çalışmada, geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Numunelerin üretiminde kullanılan uçucu kül Kütahya Seyit Ömer Termik Santrali uçucu külü olup, karışımlarda 0-8 mm ve 8-16 mm arası dere agregası, % 0, % 1 ve % 2 oranlarında polivinil alkol fiber kullanılmıştır. Alkali aktifleştirici olarak sodyum silikat solüsyonu, sodyum hidroksit kullanılmıştır. Hazırlanan taze beton, 100x100x100 mm'lik küp numunelere ve 75x75x300 mm'lik prizma kalıplara yerleştirilmiştir. Numuneler 60°C, 80 °C, 100 °C'de 24 saat termal kür işlemlerinin gerçekleştirilmesi amacıyla laboratuvar tipi etüve yerleştirilerek geopolimer kompozit üretilmiştir. Daha sonra üretilen numuneler 28 gün boyunca 20±2 °C hava kürüne tabi tutularak 20 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C'de yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra numunelere ultrasonik ses geçirgenliği, basınç dayanımı ve eğilmede çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geopolimer,Uçucu Kül, Polivinil Alkol Fiber, Yüksek Sıcaklık, Uçucu Kül.

SUMMARY

The Resistance Of High Temperature On Concrete With Polyvinyl Alcohol Fibre And Geopolymer Cement Exposed To High Temperature

In this study, the resistance of high temperature on concrete with polyvinyl alcohol fibre and geopolymer cement exposed to high temperature were investigated. Fly ash obtained from the thermal power plants in Kutahya Seyit Ömer. The concrete mixture used the 0-8mm and 8-16 mm aggregate. Furthermore, 0%, 1% and 2% polyvinyl alcohol fiber is used in the concrete mixture. The sodium hydroxide and sodium silicate solution was used for activating alkaline sodium silicate solution. The fresh concrete was placed in cubes and prisms (75x75x300 mm and 100x100x100 mm). The specimens were heated in an oven for 24 hours to produce geopolymer. After the specimens were kept in the air curing for 28 days, at 20 ± 2 °C the samples were exposed to 20 ° C, 400 ° C, 600 ° C and 800 ° C high temperature. Then, the ultrasonic pulse velocity, compressive strength and flexural strength tests were carried out.

Keywords: Geopolymer, Fly Ash, Polyvinyl Alcohol Fiber, High Temperature

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları.....	7
Şekil 3.1. PVA lifli ve propilen lifli kompozitlerin mikroskop altındaki görüntüsü.....	29
Şekil 4.1. Yük kontrollü pres.....	36
Şekil 4.2. Ultrasonik Ses Cihazı.....	37
Şekil 4.3. Yüksek Sıcaklık Fırını.....	38
Şekil 4.4. Eğilmede Çekme Deneyi.....	39
Şekil 5.1. Geopolimer çimentolu polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı grafiği.....	40
Şekil 5.2. 60 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası f_s / f_r grafiği.....	41
Şekil 5.3. 80 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası f_s / f_r grafiği.....	41
Şekil 5.4. 100°C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası f_s / f_r grafiği.....	42
Şekil 5.5. Geopolimer çimentolu polivinil alkol fiberli numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı grafiği.....	44
Şekil 5.6. 60 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası U_s / U_r grafiği.....	45
Şekil 5.7. 80 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası U_s / U_r grafiği.....	45
Şekil 5.8. 100 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası U_s / U_r grafiği.....	46
Şekil 5.9. Geopolimer çimentolu polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımı grafiği.....	48
Şekil 5.10. 60 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası E_s / E_r grafiği.....	48
Şekil 5.11. 80 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası E_s / E_r grafiği.....	49

Şekil 5.12. 100 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası E_s/E_r grafiği.....49

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1. Dünyadaki Yüksek Fırın Cüruflarının Karşılaştırılması.....	11
Tablo 3.1. Değişik Türdeki Liflere Ait Fiziksel Özellikler.....	23
Tablo 3.2. Lif Takviyeli Betonların Bazı Özelliklerinde Matris Malzemesinin Özelliklerine Oranla Görülen Artışın Yaklaşık Değerleri.....	25
Tablo 3.3. Bazı Cam Liflerinin Tipik Özellikleri.....	26
Tablo 3.4. Polimer Liflerin Fiziksel Özellikleri.....	27
Tablo 4.1. Uçucu Külün Fiziksel Ve Kimyasal Özellikleri.....	32
Tablo 4.2. Deneylerde Kullanılan Agregaya Ait Özellikler.....	33
Tablo 4.3. Akışkanlaştırıcı Katkının Kimyasal Ve Fiziksel Özellikleri.....	33
Tablo 4.4. Sodyum Hidroksitin Kimyasal Özellikleri.....	34
Tablo 4.5. Sodyum Silikatın Kimyasal Özellikleri.....	34
Tablo 4.6. Deneylerde Kullanılan Betonun Karışım Oranları.....	35

SİMGELER LİSTESİ

A	: Yüzey alanı
P	: Kırılma yükü
f_c	: Basınç dayanımı
σ_c	: Yarmada çekme dayanımı
σ_e	: Eğilmede çekme dayanımı
L	: Kiriş uzunluğu
b	: Kiriş kesitinin eni
d	: Kiriş kesitinin yüksekliği
V	: Ses üstü dalga hızı
S	: Yüzeyler arasındaki mesafe
T	: Dalganın geçiş süresi
f_r	: 60°C’de kür edilen % 0 polivinil alkol fiber içeren betonun basınç dayanımı
f_s	:Yüksek sıcaklığa maruz kalan diğer numunelerin basınç dayanımı
U_r	: 60°C’de kür edilen % 0 polivinil alkol fiber içeren betonun ultrasonik ses geçiş hızı
U_s	:Yüksek sıcaklığa maruz kalan diğer numunelerinultrasonik ses geçiş hızı
E_r	:60°C’de kür edilen % 0 polivinil alkol fiber içeren betonun eğilmede çekme dayanımı
E_s	:Yüksek sıcaklığa maruz kalan diğer numunelerineğilmede çekme dayanımı

KISALTMALAR LİSTESİ

- SA : Süper Akışkanlaştırıcı
SD : Silis Dumanı
TSE : Türk Standartları Enstitüsü
PVA : Polivinil Alkol Fiber

1. GİRİŞ

Günümüzde tüm endüstriler için, çevre koruma ve sürdürülebilir tasarıma yönelik çalışmalar gerekli hale gelmiştir. Çimento sektöründe bu çalışmaları yoğun şekilde yapmaktadır. Endüstri kolları için en önemli sorunlardan biri küresel ısınmadır. Küresel ısınma atmosferik kompozisyondaki değişimin sebep olduğu yeryüzündeki sıcaklık artışının sonucudur [1]. Dünyadaki yıllık tüketimi 130 milyon tonu bulan portland çimentosuna duyulan ihtiyaç her geçen yıl da % 5 düzeyinde artmakta olup betonun diğer bileşenleri olan agrega ve su kaynakları da göz önüne alındığında yılda dünyada 1 milyar ton beton tüketildiği gözlenebilmektedir. Bununla birlikte, taş ocaklarının ve suyun tükenmesi göz ardı edilse bile çimentonun her bir tonu ile birlikte yan ürün olarak açığa çıkan 1 ton CO₂'in ve diğer üretim esnasında oluşan sera etkisi yapıcı gazların çevreye verdiği zarar değerlendirildiğinde çimentolu betonun daha ne kadar sürdürülebilir bir malzeme olarak kalacağı tartışma konusudur [2]. Portland çimentolu betonu atık dönüşümü açısından değerlendirdiğimizde ise; betona ekonomiklik sağlamak ve atıkları değerlendirmek amacı ile uçucu kül gibi atık malzemeler değeri dönüşümsel olarak betonun içerisinde çimento miktarının % 40-60'ının yerine kullanılmaktadır. Ancak bu şekilde dahi santrallerde üretilen uçucu külün sadece % 35 'ikullanılabilmektedir [3]. Gelişen teknolojiler çimento üretimini hem daha az enerji tüketir hem de daha az doğaya zarar verir hale getirmelidir. Bununla birlikte ülkelerde artan çimento ihtiyacı da göz önüne alındığında, çimentolu betonun sürdürülebilir bir malzeme olup olmadığı, yakın zamanda çok daha fazla tartışılır hale gelecektir [1].

Betonarme ile daha yüksek, daha küçük kesitli yapılar yapma ve bu malzemenin yetersiz görülen bazı özelliklerinin daha da iyileştirilmesi ihtiyacı, insanoğlunu beton içinde daha başka malzemelerde kullanma ve hatta bu malzemelere alternatif arama yoluna itmiştir [4]. Geopolimer kimyası ile yüksek verimli düşük maliyet ve teknolojik ürünler üretmek mümkündür. Doğal jeolojik minerallerin kimyasal kompozisyonlarının işlenmesiyle üretilen geopolimer ile ısı direnci yüksek seramiklerden yüksek dayanımlı betona, yapı tuğlasından güçlendirme harcına, elektrik sigortasından radyoaktif atık istifleme ünitelerine kadar pek çok farklı amaca hizmet edebilecek malzemelerde edilebilmektedir [5]. Geopolimerlerde karışım aşamasında kullanılan su, işlenebilirlik için kullanılmakta, geopolimerin kür ve kuruması sırasında geopolimer içerisinde süresiz nano

boşluklar bırakarak geopolimeri terk etmektedir. Bu durum geopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın dayanımı gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır [6]. Uçucu küllerin alkalilerle aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonların kuru büzülme değerleri geleneksel betona göre oldukça düşük, donatı ile aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları ise oldukça yüksektir [7 -11].

Uçucu kül daha öncede tanımlandığı gibi termik santral bacalarından elde edilmiş, içi boş, küresel tanecik yapılı bir atık malzemedir. Uçucu kül tanecikleri amorf camsı yapıda mullit, hematit, magnetit, kuartz gibi kristaller içermektedir. Oluşacak kristal tipleri kömürün çıktığı bölgeye ve baca ısısına bağlıdır. Uçucu külün geopolimerik üretimlerde kullanımını teşvik eden ise, özellikle F tipi uçucu küllerin içerdiği yüksek Al_2O_3 ve SiO_2 kompozisyonudur. Baca ısısının $1200^{\circ}C$ ve üstüne çıktığı santrallerde oluşan içi boş ince küresel yapıdaki ve camsılığın yüksek olduğu uçucu küller geopolimer sentezi için kullanışlıdır. Mikroyapısı incelendiğinde geopolimer reaksiyonunun alkali aktif çözeltisi ile küresel uçucu kül taneciklerinin bir kısmı reaksiyon vererek geopolimer pH'lı alkali ortamda ve alkali silika jeli boş uçucu kül küresi taneciği içine girebilmektedir. Uçucu küllerin alkalilerle aktivasyonu ile elde edilen bağlayıcı kullanılarak üretilen harç ve betonların kuru büzülme değerleri geleneksel betona göre oldukça düşük, donatı ile aderansları ve çevre koşullarına dayanıklılıkları ise oldukça yüksektir. Ayrıca geopolimerlerin önemli avantajları arasında kısa sürede dayanım kazanmaları, dış etkilere dayanıklılıkları, düşük ısı iletkenlikleri ve yüksek hacim stabilitesine sahip olmaları sayılabilir [12,13]. Alkali aktivasyonu toksik atık ve nükleer kalıntıların, ağır metal iyonlarının stabilizasyonunda da başarıyla kullanılmıştır [14]. Ayrıca uçucu kül gibi silis ve alüminli endüstriyel atıkların alkali aktivasyonu ile üretilen harçlar, çimento harçlarına göre daha hafiftirler ve dayanıklılık özellikleri daha yüksektir [15,16].

Betonarme yapıların yangına karşı dayanım kabiliyeti, beton ve donatının ısınma ve soğuması sırasında oluşan birbiriyle bağıntılı karmaşık değişikliklere bağlıdır. Beton normal sıcaklıklarda sünerek fakat yüksek sıcaklıklarda sünme oranı çok artar. Young modülünün azalması hızlanarak artan sünme ve çatlak oluşumu yüksek ısı ve yük altında mukavemetteki azalma soğuma döneminde gevrek betonun yapısını değiştirir. Bir yangında betonun içindeki suyun kuruyarak çekilmesi betonda büzülmelere, kristal yapının ve elastikiyetinin değişmesine, mukavemetin düşmesine, renkte ve kimyasal yapıda değişimlere neden olur [17]. Betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde azalma, çatlak oluşumu, parçalanma ve dağılma, çelikte ise akma dayanımı, düktilite ve çekme

dayanımında azalmazdır [18]. Sıcaklıktaki artış ile ilk olarak serbest su kaybolur. Bunu fiziksel olarak absorbe edilen suyun kaybı ve son olarak da hidrasyon ürünlerinin kimyasal bağ suyunun kaybı izler. Aynı zamanda, çimento hamuru veya harcın büzülmesi ve agreganın genleşmesinden kaynaklanan farklı termal hareketler betonda mikro çatlakların oluşmasına neden olur. Böylece dayanım daha da azalır. Bununla birlikte, boşluk yapısı da çok önemli değişikliklere uğradığı için betonun permeabilitesinde ve durabilite özelliklerinde azalmaya neden olur. Daha yüksek sıcaklıklarda çimento hamurundaki sönmüş kirecin dehidrasyonu veya agregada meydana gelen kimyasal/fiziksel olaylar dayanım kayıplarının fazlasıyla artmasına neden olur [19]. Betonu yüksek ısıya maruz bırakma sırasında ortaya çıkan fiziksel ve kimyasal değişimler açısından önemli kayıplar meydana gelebilmektedir. Isıtma sırasında pek çok faktör bir araya gelerek betonun dayanımını etkilemektedir. Beton farklı sıcaklıklara maruz bırakıldığında, betonda meydana gelen hacimsel değişimler betonda çekme gerilmelerini ve çatlakları meydana getirmektedir. Betonun içyapısında oluşan bu çatlaklar betonun basınç dayanımını etkilemektedir. 250 °C' ye kadar olan sıcaklıkların betonda agrega-çimento hamuru ara yüzeyinde bozulmalara neden olmaktadır [20]. Birçok faktörün etkisinde olan bu olay betonda çimento hamuru agrega ara yüzeyi mikro yapısına bağlıdır [21]. Betonun yüksek sıcaklıklardaki dayanımına ilişkin farklı kaynaklardan alınan veriler birbirlerinden farklıdır. Bunun için, betonun yüksek sıcaklıklardaki dayanım özelliğini ortalama bir referans eğrisiyle göstermek yanıltıcı olabilir [22]. Yüksek sıcaklık, betonun ısı iletkenliğine, ısı genleşmesine, özgül ısıya, birim ağırlığına ve rengine etki eder. Beton yüksek sıcaklık etkisinde kalırsa, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı yayılımı azalır. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur [23].

Beton içerisine katılan tüm malzemeler belirli bir amaca ve belirli bir özellik ya da özelliklerin iyileştirilmesine yönelik olarak kullanılır. Değişik ortamlarda çeşitli etkilere karşı betonun gösterdiği davranışları ya da bu davranışlardan herhangi birini tek bir matematik modelle açıklamak mümkün değildir. Bu nedenle yapılması gereken, beton hangi etkiye ya da hangi zorlamaya karşı çalışacaksa bu durumun açıkça tanımlanarak betonun bu yönünün güçlendirilmesi gerekmektedir [24]. Bunun için betonda lif kullanılmaktadır. Beton içerisinde yaygın olarak kullanılan lifler; çelik, polipropilen, karbon ve alkali dirençli cam liflerdir. Lifli betonlarda, bütün lif çeşitlerinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton içerisinde homojen olarak dağılması ve bu

dağılımın beton karıştırıldıktan sonra da bozulmamasıdır. Üniform bir şekilde dağılan lifler, beton içerisinde de oluşan çatlakları önlemekte ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak betonu daha dayanıklı hale getirdiği bilinmektedir. Bu özelliğinden dolayı lifli betonun özellikle çekme ve eğilme dayanımını arttıran faktörler darbe etkisine kaşı dayanımını da arttıırırlar [25]. PVA lif 50 yıl önce Japonya'nın ilk organik lifi olarak üretilmiş ve bu zamandan itibaren çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır. Özellikle 1980'li yıllardan itibaren çimento esaslı kompozitlerin donatılandırılmasında kullanılmıştır. PVA lifler diğer organik liflere kıyasla yüksek dayanıklılık ve elastisite modülü değerine sahiptir. PVA lifler yüksek eğilme dayanımları ve elastisite modülleri ile çatlak ilerlemesine karşın çok iyi performans gösterirler [26]. PVA lif donatılı betonlarla ilgili olarak yürütölen çalışmalar neticesinde, bu betonların eğilmede çekme dayanımlarının yalın betonlara kıyasla oldukça yüksek olduğu, enerji yutma kapasitelerinin yüksekliğı nedeniyle oldukça sünek bir davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir [27]. PVA lifler diğer organik liflere kıyasla yüksek dayanıklılık ve elastisite modülü değerine sahiptir. PVA lifler yüksek çekme dayanımları ve elastisite modülleri ile çatlak ilerlemesine karşın çok iyi performans gösterirler. PVA lifler yüksek derecede lif-matris aderansı gösterirler ve üretim esnasında liflerin yüzeylerinde yapılacak deformasyonlar ile lif-matris aderansının daha da güçlü kılınması mümkündür [28].

Bu tez çalışmasında,uçucu kül alkali ile aktivite edilerek üretilen geopolimer çimentoya % 0, % 1 ve % 2 oranlarında polivinil alkol fiber katılarak üretilen numunelerinyüksek sıcaklığaolan direnci araştırılmıştır.

2. GEOPOLİMER

Geopolimer terimi ilk olarak Davidovits tarafından dile getirildiği günden beri, bu alanda birçok araştırmalar yapılmıştır [29,30]. Ayrıca aynı tip malzemeler için farklı isimler kullanılmıştır. Düşük sıcaklıklı alüminosilikatlar [31], alkali aktive edilmiş çimentolar [32], alkali bağlı seramikler [33], inorganik polimer beton [34] ve hidroseramik [35] gibi isimler en çok kullanılanlardandır [36]. Geopolimerler olarak da bilinen inorganik polimerlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin önemli kısmı alüminosilikatların alkali aktivasyonu ile oluşmaktadır. Geopolimerlerin kullanımı ve özellikleri, organik kimya, fizikokimya, mineroloji ve mühendislik gibi, birçok bilimsel alanlarda araştırılmaktadır. Geopolimerlerin uygulama alanları çok fazladır. Bunlar özellikle, yangına dayanıklı malzemelerde, dekoratif taşlı eserlerde, seramiklerde, çimento ve beton üretimlerinde, altyapı ve onarım için kompozit karışımlarda, radyoaktif ve zehirli atık maddelerin değerlendirilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [37].

Cheng ve Chiu tarafından yapılan çalışmada yüksek fırın cürufu ve metakaolin kullanarak geopolimer üretilmiştir. Alkali aktivatör olarak, potasyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmışlardır. Üretilen geopolimer betonların maksimum basınç dayanımı 79 MPa olarak bulunmuştur. Ayrıca, farklı oranlarda potasyum hidroksit kullanımının yangın dayanımını etkilemiştir. Geopolimerlerde K_2O içeriği de mekanik özelliklerde etkili olmuştur. K_2O oranının artmasıyla, priz süresinin, basınç ve yangına karşı dayanıklılığının arttığı gözlenmiştir [30,38]. Olivia ve Nikraz yaptıkları çalışmada, uçucu kül kullanılarak üretilmiş ve numunelerin mekanik özellikleri ve dayanıklılığı incelemişlerdir. Karışımlardaki agrega içerikleri, kür sıcaklıkları, alkali aktivatörlerle uçucu küllerin oranlarını, geopolimer beton üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 28 günlük kür süresinde 55 MPa basınç dayanımına sahip geopolimer beton üretmişlerdir. Portland çimentoya göre çekme ve eğilme mukavemeti daha yüksek geopolimer üretilmiştir. Ayrıca elastisite modülü daha düşük sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmaların sonucunda geopolimer betonun kontrol betonuna göre deniz suyu ortamlarında mekanik özellik olarak daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [30,39].

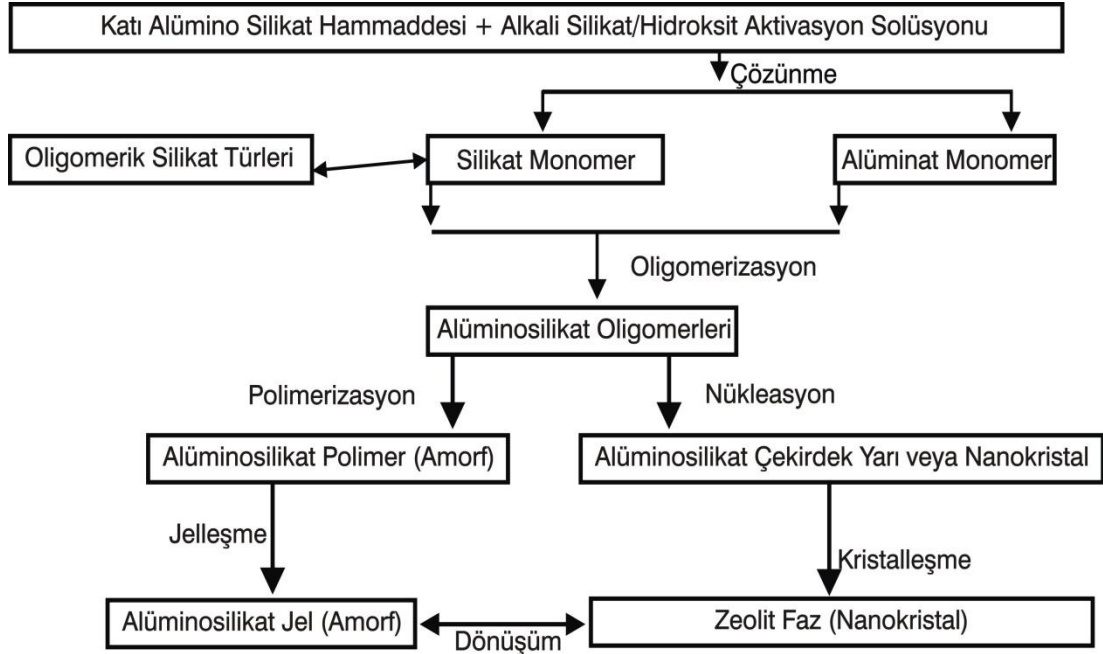
Topçu ve Toprak, termik santral taban külünün alkalilerle aktive edilerek hafif harç üretmişlerdir. Bunun için öğütülmüş taban külü sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali çözeltileri kullanılarak çimentosuz harç numuneler üretilmiştir. Numunelere 20 saat 75°C

sıcaklıkta etüvde veya laboratuvarında 20°C sıcaklıkta laboratuvar ortamında kür olmak üzere iki farklı kür uygulanmıştır. En iyi numune taban uçucu külünün sodyum hidroksit ve sodyum silikat alkali çözeltileri ile aktivasyonu ve 20°C kür yapılan numuneden elde edilmiştir. Üretilen en yüksek basınç dayanımı 18.51 MPa ve su emmesi % 6.58 bulunmuştur. Üretilen geopolimer beton numunesinin 30 ve 80 donma-çözülme çevrimi sonunda kütle kaybı sırasıyla % 3.7 ve % 6.2 olarak bulunmuştur. Ayrıca basınç dayanım kaybı sırasıyla % 4.3 ve % 11.5 olarak bulunmuştur. Üretilen geopolimer beton üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneylerinde numunenin 400°C sıcaklığa kadar termal stabilitesini koruduğu, 600°C sıcaklıkta ise dayanım kaybının yüksek olduğu görülmüştür [40].

Ravikumar ve diğerleri uçucu külle üretilen geopolimer betonların ve ayrıca öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufuyla oluşturulan geopolimer betonların basınç dayanım değerleri incelemiştir. Yüksek fırın cürufu geopolimer betonların basınç dayanımı değerleri, uçucu külle üretilen geopolimer betonların basınç dayanımından daha fazla olduğu görülmüştür. Uçucu küllü geopolimer betonlarda, 75°C’de maksimum basınç dayanımı değeri elde edildiği görülmüştür [41].

2.1. Geopolimer Kimyası

Alkali aktive edilmiş bağlayıcıların oluşumu ve sertleşme reaksiyon mekanizması tam olarak belirlenememiştir. Bununla birlikte hammaddenin yanı sıra alkali aktivatör türüne bağlı olduğu düşünülmektedir. Glukhovslcy ve diğerlerine göre alkali aktivasyon mekanizması hammaddenin düşük kararlı yapısal bileşiklere ayrılmasını ve pıhtılaşma yapıları ile yoğunlaşmış yapıların oluşması arasındaki etkileşimi sonucu oluşan reaksiyonlardan meydana gelmektedir [41]. Bu reaksiyonların Si-O-Si ve Al-O-Si kovalent bağlarının kopmasından oluşur. Bu olay alkali solüsyonunun pH’ı yükseldiği zaman meydana gelmektedir. Böylece bu gruplar koloit fazına dönüşmektedir. Sonrasında pıhtılaşmış yapının oluşumunu sağlayan etkileşimler yıkılmış ürünlerin tahribatıyla oluşur. Böylece yoğunlaşmış üçüncü faz meydana gelir [30,42].



Şekil2.1. Geopolimerizasyonun reaksiyon aşamaları [30]

Geopolimerler iki ana bileşenden oluşurlar. İnce kuru tozlardan ve alkali aktivatörlerden oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler uygun oranlarda karıştırılmalıdır. Alkali sıvı olarak sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit kullanarak alümino silikat reaksiyonları sonucunda geopolimer elde edilir. Bu geopolimerlerin en belirgin özelliği, fiziksel özellik olarak ayrıştırılmış ve çamura benzer katı atıkları oldukça kısa bir sürede yumuşatma özelliğidir. Ayrıca geopolimerler kimyasal etkilere karşı da dayanıklıdır. Geopolimerler fiziksel özellik olarak hızlı mukavemet göstermesi ve kimyasal özellik olarak asidik koşullarda dayanıklılık göstermesi gelecekteki uygulamalar için önemini gittikçe arttırmaktadır [30,43].

Karışım içerisindeki alkali tuzların da etkisiyle geopolimerizasyon süreci ekzotermik bir reaksiyondur. Bu süreçte su moleküllerinin dehidratasyonu geopolimer polikondensasyonunda önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Kullanılacak olan temel hammadde mineral kompozisyonu, incelik modülü, her malzemede olduğu gibi geopolimerik ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini etkilemektedir. Bazı malzemelerden basınç dayanımı düşük olan karışımlar elde edilirken, uygun oranlarda Al-Si bileşiği bulunduran ve serbest kalsiyum oranının düşük olduğu mineral kompozisyonundaki F sınıfı uçucu küllerle yüksek dayanıklılık özellikleri olan malzemeler üretilmektedir. Fırınlanmamış kaolin kili ise daha düşük basınç dayanımı vermektedir. Seramik malzeme üretiminde de uygulandığı gibi hammaddeye uygulanan fırınlama

işlemi; boşluk suyunun ve karbonlu bileşiklerin ayrışmasını sağlamakta ve kompozisyon içerisindeki mineral element ve bileşiklerin enerji düzeyinin yükselmesi ile daha kolay iyonize olmalarını sağlamaktadır. Böylece üretilecek ürünün reolojik özelliklerini iyileştirmektedir. Birçok araştırmada ham maddenin düzensiz özelliklerinin deneysel çalışmaya etkisini azaltarak geopolimer kimyasını tanımlayabilmek için sadece kimyasal yapısı iyi bilinen killer kullanılmıştır. Ancak ham maddede ön iyileştirme yapılsa dahi alüminosilikat minerallerin kimyasal ve yapısal özellikleri farklı sonuçlar verebilir. İstenilen jel kompozisyonunu sağlamak için geopolimer çözelti içerisindeki Al çözünümü azaldığında, kaolinit ya da Alüminyum elementi eklenebilir. Aluminatların yavaş reaksiyon vermesi sayesinde tepkimenin tüm ana bileşenleri arasında bağlanma reaksiyonları gerçekleşmektedir. Ancak yalnızca yüksek aluminat içeren kaolinit ağırlıklı bir karışımın zayıf malzeme özellikleri göstereceği belirtilmiştir [30,44]. Polisialatlar kristal yapıda iken polisialat silokso daha amorf yapıdadır. [45-50]. Geopolimer kaynağı olarak kullanılan Al ve Si içerikli malzemelerin alkali çözeltilerle tepkimesinden en iyi sonuçlar metakaolin esaslı geopolimerlerde görülmekle beraber, Metakaolin > Zeolit > Cüruf > Uçucu kül > Puzolan > Kaolin sırasına göre azalmaktadır [30,51].

Silis dumanı (SiO_2) ve korindon (Al_2O_3) geopolimer tepkimesine yatkın bileşiklerdir. Geopolimer işlemi bu alumino-silikat oksitlerin alkali hidroksit tuzlarda çözünmesi ile başlamaktadır. Kullanılan jeolojik malzemenin incelik modülünün yüksek olması ile alüminyum ve silisyumlu moleküllerin çözünürlük düzeyi tepkimeyi etkilemektedir [51]. Alümino-silikat jel çözeltinin oluşum süreci ham maddelere uygulanan kür sıcaklığına ve süresine bağlıdır [30,44]. Kullanılan ham maddedeki Al-Si oranlarına göre geopolimerin fiziksel özellikleri değişiklik göstermektedir. İstenilen özellikleri kazandırmak için ham maddenin kimyasal özelliklerini iyi tespit ederek karışımlar oluşturulabilir.

2.2. Geopolimer Bileşenleri

2.2.1. Uçucu Kül

Uçucu küller betonda mineral katkı olarak kullanılan yapay bir puzolandır ve çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı olmadıkları halde, sönmüş kireçle hidrasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşirler. Uçucu küller elektrik üreten termik santrallerden elde edilir. Genellikle endüstride kullanılmayan düşük kalorili kömürlerin çok ince

öğütülerek termik santral fırınında yakılması sırasında yukarıya yükselen uçucu küller bacanın üst kısmında elektro filtreler veya siklon adı verilen toz tutucularda, elektrostatik veya mekanik yöntemlerle tutularak depolanırlar. Uçucu küllerin parçacıkları küresel olup çapları 1-300 µm mertebesinde [52]. Uçucu küller beton teknolojisinde ya çimento ile birlikte doğrudan betona katılarak, ya da kum yerine kullanılabilirler. Çimento üretimi sırasında klinkere katılıp öğütülerek uçucu küllü çimento olarak da kullanılabilirler. Kum yerine kullanıldığında özgül yüzey artarsa da kumdan az da olsa tasarruf sağlanır. Uçucu küllerin puzolanik özellikleri de olduğundan bunları çimento yerine kullanmak daha avantajlıdır. Uçucu küller daha büyük özgül yüzey ve inceliğe sahip olduklarından bağlayıcı hacminin artmasını ve çimentodan ekonomi yapılmasını sağlarlar. Araştırmalar çimentoyla ağırlıkça % 15-40 oranında uçucu küllü kullanılması betonun dayanımını olumlu etkilediğini göstermiştir [53]. Bunun yanında uçucu küllü kullanılması ile betonun erken yaştaki basınç ve eğilme dayanımları düşmekte ve prizi geciktirmektedir [54-56]. Küçük danelerden oluştuğu için uçucu küllü beton daha düzgün yüzeye sahiptir. Birim ağırlıkları düşük olduğu için betonun birim ağırlığının azalmasına sebep olur. Uçucu küllü betonun hidrasyon ısısı düşük olduğu için termik rötre ve çatlama olmaz dolayısıyla kütle betonları için uygundur. Uçucu küller küresel bir yapıya sahip olduklarından su gereksinimini arttırmazlar ve düşük bir su/çimento oranı ile istenilen işlenebilirlik sağlarlar. Uçucu küller sulu ortamda kireci bağladıkları için betonu dış etkilere daha dayanıklı yapar ve su geçirimsizliğini azaltır. Uçucu kül, hafif agrega ve tuğla üretiminde kullanılabilir olduğu yapılan çalışmalarda görülmüştür [57,58]. Uçucu küllü betonlarda kür sıcaklığının artırılması basınç dayanımını iyileştirmiş, birim ağırlıkları düşürmüş ve hacimce su emmelerde artışa neden olmuştur [59]. Davidovits 2008 yılında yaptığı bir çalışmada Amerika’da uçucu kül ve alkali silika çözeltilisi ile üretilen CAFA adlı bir ürünü incelemiştir. Çalışma sonucunda 90 °C’de 18 saat kür edilmiş beton örnekleri 85 MPa basınç dayanımı göstermiştir [5].

2.2.2.Silis Dumanı

Silisyum metalinin veya alaşımlarının elde edilmesi için yüksek saflıktaki kuvars mineraline elektrik fırınlarında yaklaşık 2000 °C sıcaklıkta kömürle indirgeme işlemi uygulanmaktadır. Bu işlem sırasında büyük bir miktarı SiO₂’den gaz ortaya çıkmaktadır. SiO₂’nin, yüksek sıcaklıktaki elektrik ark fırının kısmen soğuk bölümünde bulunan

havadaki oksijenle hızlı bir şekilde soğuması sonucunda, camsı yapıdaki SiO_2 parçacıkları oluşmaktadır. Bu parçacıklar fiber filtrelerden geçirildikten sonra yoğunlaştırılmış silis dumanı parçacıkları olarak elde edilmektedir [60].

Silis dumanı çok güçlü bağlayıcı özeliğe sahip özel bir puzolandır. Yüksek dayanımlı ve çelik lifli reaktif pudra betonlarının üretiminde çok yaygın kullanılan bir malzemedir [61]. Silis dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı % 20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal betonlara göre daha azdır. Sıcaklık $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'yi geçtiği zaman jel adsorbe suyu serbest hale geçmekte, yüksek performanslı betonlarda kılcal boşlukların boyutu küçük olduğundan bu boşluklarda buhar basıncı artmakta, betonda büyük gerilmeler oluşmaktadır. Ortaya çıkan basınç etkisi, betonda patlamalara ve dağılmalara neden olmaktadır [62-64].

Poon vd. yaptıkları çalışmada % 10 silis dumanı katkılı numunelerde, silis dumanının yüksek sıcaklık etkisinde betona herhangi bir yararının olmadığı ifade edilmiştir. Silis dumanı katkılı betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişmekle birlikte, %10'un üzerinde silis dumanı katkılı betonlar hariç tüm puzolan katkılılar, katkısız betonlara oranla yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermektedir [63, 65]. Davidovits'in 2008 yılında yaptığı bir çalışmada M.Ö. 200'lü yıllarda Hun saldırılarını durdurmak için Çinliler tarafından inşa edilen ve günümüze kadar dayanan Çin Seddi'nde araştırmalar yapmıştır. Çin Seddi'nin harcında % 80 civarında SiO_2 pirinç çeltiği külü ve Ca(OH)_2 bulunmaktadır [5,30].

2.2.3. Cüruf

Demir cevherleri doğada esas olarak içerdikleri demir oksit bileşimlerinin yanı sıra silis, alümin, kükürt, fosfor ve mangan gibi bazı elementleri de bünyesinde bulundurmaktadır [66]. Cürufun kimyasal yapısı, demir cevherinin kimyasal yapısını yansıtmaya karşın, cürufu oluşturan kireç, silis, alüminyum yüzde miktarları önemli şekilde değişiklikler göstermektedir (Tablo 2.1.). Bu değişiklikler sadece demir cevherinin yapısından değil, kok kömüründen, ekonomi sağlamak için farklı demir cevherleri ile hazırlanan karışımlardan ve yüksek fırındaki yüksek dereceli sıcaklıklardan meydana gelmektedir [67]. Kendi halinde soğumaya bırakılan cürufun granülometrisi çok düzensizdir. Ancak eleme ve kırma işlemine tabii tutulduğunda istenilen granülometriye

getirilebilir. Havada soğutulan yüksek fırın cürufu kırılıp elendiği zaman fiziksel özellikleri genel olarak diğer agregalara nazaran özel avantajlar göstermektedir. Bünyesinde kil ve silt bulunmaması, iyi bir sürtünme özelliğine ve pürüzlü bir yüzeye ve dolayısı ile iyi bir adhezyona sahip olması üstün özellikleridir [68].

Tablo 2.1. Dünyadaki yüksek fırın cüruflarının karşılaştırmalı kimyasal analizi [30].

	ABD ve Kanada	Güney Afrika	Avusturalya	Türkiye	Portland Çimentosu
CaO	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
SiO₂	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al₂O₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe₂O₃	0.1-1.5	-	0-0.7	0.3-2.5	0.5-6.0
MgO	0-19	8-2.1	1-3	4-7	0.1-4.0
MnO	0.2-1.5	-	0.3-1.5	1-2.5	-
S	0-0.2	1-1.6	0.6-0.8	1-2	-
SO₃	-	-	-	-	1-3

Bougara ve diğerleri yaptıkları çalışmada, düşük CaO/SiO₂ oranı ile Cezayir cürufu üzerinde araştırmalar yapmıştır. Cüruf; mekanik olarak 250, 360 ve 420 m²/kg blaine yüzey alanına sahip olacak şekilde öğütülerek, 20, 40 ve 60°C’de kür edilerek termal olarak ve cürufun farklı konsantrasyonlardaki NaOHve KOH alkalileriyle karıştırılmasıyla kimyasal olmak üzere, üç yöntemle aktive edilmiştir. Numuneler 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük sürede basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonuçları incelendiğinde cürufun incelikteki artışın dayanım gelişiminde artışa neden olduğu gözlenmiş ve cüruf inceliğinin çimentoya nazaran daha fazla olduğu durumda daha iyi performans sağlanacağı görülmüştür [69]. Li ve Zhaoyaptıkları çalışmada çimentodan farklı oranlarda öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu kül ikame edilerek yüksek dayanımlı beton numuneleri üretilmiştir. Üretilen numunelerin basınç dayanımı, H₂SO₄ direnci ve mikro yapısı araştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda; uçucu kül katkılı beton numunelerin faydalı sonuca ulaşmak için oldukça uzun zaman gerektiği bildirilmiştir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve uçucu külü birlikte kullanılan beton numunelerin hem kısa vadede hem de uzun vadede özelliklerini en iyi oranda geliştirdiği tespit edilmiştir [70].

Sakulich ve diğerleri, alkali aktivatör olarak ise NaOH ve Na₂CO₃ kullanıp geopolimer hammaddesi olarakda kireçtaşı ve cürufkullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Oda sıcaklığında küre bırakılan beton numuneler 45 MPa basınç dayanımı ve 28 günün sonunda 4 MPa eğilme dayanımına sahip geopolimer numuneler üretilmiştir [71].

2.2.4.Fosfat

Fosfat esaslı geopolimer diş protez harcı üretiminde kullanıldığı gibi en önemli kullanım alanlarından biri de radyoaktif atık depolama işleminde kullanılmasıdır [30]. Fosfat esaslı geopolimer ile ilgili çalışmalar oldukça kısıtlıdır [37]. Kimyasal olarak bağlanmış fosfat seramik/çimentolar (Mg-fosfat kompozisyonlar için) oda sıcaklığında yüksek mukavemet, düşük porozite ve iyi dayanıklılık göstermektedir. Bu özelliklerinin alümina-silikat geopolimerleriyle benzer olduğu görülmüştür. Davidovits'in, fosfat ve fosfor-silikatın kimyasal yapısının geopolimer olarak kullanılabilir olduğunu söylemiştir [37]. Fosfor-silikatlı geopolimerin mikro yapısını inceleyerek, kristal fosfat minerallerinin, fosfor-silikat geopolimerlerin amorf malzeme ile bağlantılı bir ağ oluşturduğunu ifade etmiştir [72].

Silisyum ve alüminyum yapı taşları sioloxo ve sialate yapılar oluşturmak için bağlantılıdır. Benzer bir şekilde, fosfor, fosfat yapılar da oluşabilir. Sadece sioloxo ve sialates C-geopolymeri, fosfat-fosfor-sialoxo veya P-geopolimerleri fosfor-sialate zincirleri ile oluşmaktadır [73]. Mısır'da Keops piramidinin iç kısmından alınan bir örnek üzerinde X ışınları incelemesinde CaCO₃ ve SiO₂ oluşan matris içinde fosfat molekülleri ile elde edilmiştir [74].

2.2.5. Pomza

Pomza, gözenekli yapısı, hafifliği, yüksek izolasyon etkileri, atmosferik şartlara karşı direnci ve yüksek puzolanik aktivitesi sebebiyle, insanoğlunun eski çağlardan beri kullandığı en eski yapı malzemelerinden birisidir. Antik Yunan ve Roma dönemlerinde pomza, amfitiyatrolar, tapınaklar, su kemerleri, hamamlar, mahzenler, ve konut inşaatlarında yaygın olarak kullanılmıştır. Bu tapınaklar zamana karşı hala direnmektedir. Teknolojik özellikleri ve birçok endüstriyel hammadde türüne göre değişik avantajlara sahip olan pomza (bims) taşı giderek artan bir eğilimle, farklı endüstri dallarında yaygın bir

kullanım alanı bulmaktadır [75]. Son yıllarda hafif yapı malzemelerine verilen önemin giderek artmasına paralel olarak, hammadde tüketiminde pomza taşı düşük birim hacim ağırlığı, yüksek ısı ve ses izolasyonu, iklimlendirme özelliği, kolay sıva tutması, mükemmel akustik özelliği, deprem yük ve davranışları karşısındaki elastikiyet ve alternatiflerine göre daha ekonomik oluşu gibi üstün özelliklerinden dolayı, inşaat ve yapı endüstrisinde geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Pomza taşı, yalnızca inşaat sektöründe değil, tarım sektörü, kimya sektörü, tekstil sektörü, sanayi gibi endüstri alanlarında da çok farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Ancak, ne var ki pomza taşının kullanım kriterleri ve karakteristikleri, endüstri alanlarında uygulanabilirliği gibi konular üzerinde, ülkemizde deneysel ve gözlemsel incelemeler, pomza ile ilgilenen kuruluşlar tarafından, henüz yeterli düzeye ulaşmamıştır. Bu bakımdan, pomzanın önemli rezerv potansiyeline sahip bir endüstriyel ham maddemiz olmasından dolayı, üzerinde yeterli incelemenin yapılması ve kullanım alanlarının yaygınlaştırılması ile ülke ekonomisine yüksek oranda bir katma değer sağlanacağı şüphesizdir [75]. Allahverdi ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında pomza ve aktivatör olarak NaOH ve Na_2SiO_3 'ün farklı kombinasyonlarını kullanarak geopolimer beton numuneler üretmişlerdir. Üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımı olarak 63 MPa'ı olarak elde edilmiştir [76].

2.2.6.Zeolit

Zeolit doğal ya da yapay olmak üzere atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip sulu alümina silikat bileşiklerine verilen isimdir. İlk olarak İsveç'li mineralog Fredrick Cronstedt tarafından 1756 yılında bulunmuştur. Bu kristaller ısıtıldıklarında yapılarında bulunan suyun köpürmesinden dolayı Yunanca kaynayan taş anlamına gelen Zeolit adını almıştır. Zeolit, geniş anlamındaki tanımıyla alkali ve toprak alkali katyonları ihtiva eden sulu alümina silikat olarak tanımlanır. Doğal zeolitler yaygın kullanım alanlarının varlığı ve büyük pazar potansiyeline rağmen, birçok pazar alanında daha yeni yeni kabul görmeye başlamıştır. Zeolitler endüstriyel alanlarda kullanılabildiği 1940'lı yıllarda ortaya konulmasına rağmen tali mineral olarak volkanik kayaların boşluk ve çatlaklarında bulunduğu bilinmesi kullanımlarını sınırlamıştır. Ancak 1950'li yıllardan sonra denizel ve gölssel tüflerin de zeolit içerdiklerinin saptanmasıyla zeolitlerin kullanım alanları hızla genişlemiştir [77-82].

Villa ve diğerleri, zeolit ve alkali aktivatör kullanarak geopolimer beton üretmişlerdir. Bu çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. 90 gün kür süresinde ve 80 °C kür sıcaklığının dayanım üzerinde olumsuz etkisi olduğu görülmüştür. 40°C kürde bekletilen numunelerin en yüksek basınç dayanımı değeri elde etmişlerdir [83].

2.2.7. Kayaç

Kil kayaçların esasları olan feldispatoitler ve kumu oluşturan kuvarz yeryüzünde en çok bulunan toprak madenler olmakla birlikte kimyasal potansiyelleri tam olarak bilinmemektedir. Düşük ve yüksek pH'lı ortamlarda oluşan radyoaktif çözeltilere dayanabilecek malzemelerin her iki ortamda da kararlı davranması gereklidir. Çeşitli feldispat kayaçlar ve kuvarsın etkileştirilmesinden üretilen geopolimer radyoaktif nükleotid eşlenik ve eşlenik olmayan çözeltileri radyoaktif sızıntıyı önleyici özellikte depolama amacıyla kullanılabilmektedirler. Radyoaktif elementler geopolimer monomerlerin çerçeve yapısında hapsolmaktadır. Böylece uzun süre radyoaktif sızıntı ya da ısınma oluşmamaktadır. Diğer geopolimer oluşumlarından farklı olarak kayaç esaslı geopolimer sentezinde farklı tipteki kayaçların asit içerisinde çözünümü söz konusudur. Cs, Co, Sr, Tc, U ve Cr gibi radyoaktif elementlerin düşürülmüş enerjili atık izotopları asit çözeltilerinde reaktivliklerini tamamen yitirmekte, ancak yine de hiperalkalin çözeltiler oluşturmaktadır. Çözünmüş alümino-silikat kaynağı kayaç daha sonra alkali tuz ve silikat çözeltilerin etkisi ile geopolimere dönüşmektedir [30,84].

2.2.8. Metakaolin

Beton üretiminde kullanılan puzolanların çoğu endüstriyel atık malzemeler veya yan ürünlerdir. Metakaolin bu amaç için üretilen puzolanik bir malzemedir. Puzolanik malzemelerin kullanılması, uzun dönem durabilitesi iyi olan yüksek performanslı betonların elde edilmesinde etkili bir yöntemdir. Bu malzemeler, bir miktar çimentonun yerine kullanıldıkları için çimento tüketimini azaltmakta, aynı zamanda da taze ve sertleşmiş özelliklerini de iyileştirmektedirler. Betonun kimyasal kompozisyonu, parçacık boyut dağılımı, inceliği ve puzolanik aktifliği betonun mekanik özelliklerini etkileyen önemli etkenlerdir [85].

Metakaolinin çimento harcında puzolan amaçlı olarak kullanımı ise 1960'lı yıllara dayanır. 1990'lı yıllardan itibaren ise sağladığı yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır [85]. Saflaştırılmış kaolin kilinin kalsine edilmesiyle üretilen metakaolin, beyaz renkli, amorf yapılı bir alümina silikattır. 100–200 °C civarında kil mineralleri adsorbe sularını kaybederler. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu kaybettiği sıcaklık ise 500–800 °C (diğer bir kaynağa göre 700–900 °C) aralığındadır. Bu sıcaklıkta kaolin bağlı suyunun yaklaşık %10-14'ünü kaybeder ve metakaoline dönüşür. Dönüşüm sonucunda, alümina ve silika tabakaları, kristal yapılarındaki düzeni kaybeder, böylece kaolin, amorf ve kimyasal olarak reaktif bir yapı kazanır. Başarılı bir ısıtma işlemi uygulanması halinde yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip amorf fazlı metakaolin elde edilir [30,86-88].

Davidovits yaptığı çalışmasında ikincil fazların (ilit, kuvars) metakaolinin geopolimer reaksiyonları üzerindeki etkileri, biri saf kaolinitten diğeri ise Cezayir'in Tamazert bölgesinden elde edilmiş iki metakaolin kıyaslanarak araştırılmıştır. Geopolimerizasyon metakaolin ile alkali sodyum silikat solüsyonunun oda şartlarında karıştırılması ve 50°C'de kür edilmesiyle elde edilmiştir. Ürünler X-Işım kırınım yöntemiyle incelenmiştir. Geopolimerler, alkalilerin veya toprak alkalilerin alüminosilikatlar ile aktivasyonu sonucu elde edilen kötü düzenlenmiş polimerik alüminosilikat malzemelerdir. Geopolimerler iyi ısıtma, kimyasal ve mekanik özelliklerinden ve çevreye zararsız çimento gibi bir bağlayıcı malzeme olmasından dolayı yoğun ilgi odağındadırlar [32]. Geopolimerizasyon, metakaolin gibi alüminosilikat ile yüksek alkali silikat solüsyonu arasında ekzotermik reaksiyondan oluşur [30,46].

Yao ve diğeri 2009 yılında yapmış oldukları makalelerinde alkali ve alkali silikat solüsyonuyla aktive edilmiş metakaolin geopolimerizasyon işlemi incelemiştir. Sonuçlar metakaolinin alkali aktivasyonu altında geopolimerizasyonu makul bir şekilde; (I) yıkım, (II) polimerizasyon, (III) sabitleme gibi 3 adımda meydana gelmiştir. Geopolimerizasyonun derecesi aktivatör içinde bulunan silikat anyonlarının varlığına bakmaksızın alkali içeriğinin artmasıyla artmıştır [30,89]. Kaolinit 750°C sıcaklıkta fırınlığında dehidroksilasyona uğrar ve su molekülleri ayrıştığında alümino-silikat oksitler elde edilir. Metakaolinit olarak adlandırılan bu aşağıdaki bağıntılarında gösterilmiştir [35].

2.2.9. Akışkanlaştırıcı Katkı

Betonun kolayca şekil değiştirebilmesi için kayma eşiğinin küçük olması gerekir. Bu özelliğin su miktarını artırarak sağlanması durumunda betonun kararlılığı bozulmakta ve ayrışma meydana gelmektedir. Polimer esaslı katkılarda elektrostatik itkinin yerini daha farklı ayırıcı etkiler alır. Özellikle polimer bazlı katkılarda elektrostatik itkinin yanında polimer zincirlerinin çimento tanesinin üzerine yapışarak oluşturduğu fiziksel etki (*stearik itki*) daha baskındır. Stearik itkinin derecesi polimer zincirinin uzunluğuna, molekül ağırlığına, yan zincir yapısına ve ortam koşullarına bağlıdır. Özellikle polikarboksilat bazlı katkılarda stearik itki çimento dağılımını sağlayan temel faktördür. Ortamda aşırı miktarda katkı bulunması halinde çimento taneciklerinin yüzeyi tamamen sarılacağından bir miktar katkı açıkta kalacaktır. Açıkta kalan katkının olumlu bir işlevselliği olmadığından optimum değer kullanılmalıdır. Katkının optimum miktarına doyum noktası denir [90]. Kullanım dozajları ise yine arzu edilen performans kriterlerini sağlayabilecek ve aynı zamanda betonun taze ve sertleşmiş durumdaki niteliklerini bozmayacak şekilde seçilir. Nitelikli bir betonun sağlanması gereken 3 temel özellik vardır. Bunlardan birincisi işlenebilirlik, ikincisi istenen dayanım özelliklerini karşılayabilmesi ve üçüncüsü ise servis ömrü boyunca bütünlüğünü kaybetmeden dayanım özelliğini ve aynı zamanda içindeki çelik donatıyı koruyabilmesidir (kalıcılık). Katkı tipleri ve kullanım dozajları seçilirken bu üç temel özelliğin sağlanması amaçlanır. Bu noktada dikkate alınması gereken bir diğer önemli husus da katkı maddeleri ile betonda kullanılan diğer malzemeler arasındaki uyumdur. Çimento ve mineral katkı maddelerinin kimyasal özellikleri, kullanılan agregaların fiziksel, kimyasal ve geometrik özellikleri katkıların etkinliğini belirleyen önemli parametrelerdir [91].

2.2.10 Agregalar

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi mineral kökenli malzemelerin genel adı agregadır. Beton içerisinde hacimsel olarak % 60-75 oranında agregalar tane boyutlarına göre ince (kum, kırma kum gibi) ve iri (çakıl, kırmataş gibi) agregalar olarak ikiye ayrılır. Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır;

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları,
- Zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür gibi),

- Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları,
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri,
- Yassı ve uzun taneler içermemeleri,
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir [92].

Agreganın kirlı (silt, kil, mil, toz vs.) olması aderansı olumsuz etkileyip, bu küçük taneler su ihtiyacını da arttırmaktadır. Agregaların betonda kullanılabilmesi için TS EN.706’da belirtilen elek aralıklarında geçen dane dağılımına (granülometriye) uygun olması gerekir [93].

Beton yapımında kullanılacak agreganın değişik özellikleri araştırılmaktadır. Araştırılan özellikler şu şekilde sıralanabilmektedir: Gradasyon, maksimum tane büyüklüğü, tane şekli, yüzey dokusu, su emme kapasitesi, birim ağırlık, özgül ağırlık, agregadaki zararlı yabancı maddelerin türü ve miktarı, aşınmaya dayanıklılık, dona dayanıklılık, dayanım, elastiklik modülü ve ısısal özellikler yukarıdaki özelliklerin tümü, üretilecek betonun özelliklerini etkilemektedir. Bunlardan bazıları, beton karışımının içerisinde yer alacak malzeme oranlarının hesaplanabilmesi (beton karışım hesapları) için kullanılmaktadır [94]. Beton malzemelerinin karışım oranlarının bulunabilmesi için yapılan hesaplarda bilinmesi gereken agrega özellikleri şunlardır:

- Gradasyon,
- Maksimum agrega tane boyutu,
- Agregadaki mevcut su durumu ve agreganın su emme kapasitesi,
- Birim ağırlık,
- Özgül ağırlıktır.

Agrega özellikleri betonun özelliklerini etkilediği gibi, beton karışımında yer alacak malzeme miktarlarında etkiler. Bu nedenle, betonun ekonomikliğini de etkilemektedir. Betonun ekonomikliğini etkileyen bir başka faktör ise, agreganın ne kadar uzak mesafeden temin edilebileceği, maliyeti, bulunabilirliğindeki kolaylıktır. Beton üretiminde, agreganın kolaylıkla elde edilebilmesi hususu da büyük önem taşımaktadır [94].

2.2.11. Su

Betonun bir bileşeni de sudur. Su betonda üç değişik amaca yönelik kullanılmaktadır:

- Çimento ve agrega ile birlikte beton karılmasında karışım suyu olarak,

- Yerine yerleştirilen taze betonun yüzeyine uygulanan “bakım yada kür suyu” olarak,
- Betonda kullanılacak agregaların temiz olmalarını sağlamak veya betona karma, üretim işlemi bittikten sonra üretim araçlarını temizlemek için yıkama suyu olarak kullanılmaktadır.

Bunlardan en önemlisi ilki olup, karma suyu iki önemli görevi yerine getirmektedir. Birincisi çimento ve agrega tanelerinin yüzeyini ıslatarak yani yağlayıcı etki oluşturarak, beton malzemelerinin kolayca karıştırılabilmesini ve yerleştirilebilmesini kısaca işlenebilmeyi sağlamaktır [95]. Beton karma suyu olarak kullanılacak suyun uygunluğu hakkında, TS EN 1008’ de su içilebiliyor ise, beton yapımında karma suyu olarak kullanılmaya uygundur hükmü vardır. Şehir sularının hepsi kalite olarak birbirinin benzeri olamaz [96].

2.2.12.Alkali Aktivatörler

Geopolimerlerde kullanılan alkali aktivatörler,

- Sodyum Hidroksit
- Sodyum Silikat
- Kalsiyum Hidroksit
- Potasyum Hidroksit’dir.

2.2.12.1.Sodyum Silikat

Silikat, mineral grupları arasında en ilginç ve en geniş grup silikat grubudur. Silikatlar tüm minerallerin % 30'unu oluşturmakta olup, yerkabuğunda var olan minerallerin de % 90'ını meydana getirmektedirler. Pratik olarak yerkabuğu silikat minerallerinden oluşmaktadır denilebilir. Dolayısıyla yer kabuğunda en bol bulunan 2 element Si ve O dir. Yerde ve diğer gezegenlerde yaygın olarak rastlanan silisyum-oksijen bileşikler yerkabuğunun yaklaşık % 95’ini oluşturan silikatlar korkayaçların büyük bölümünün temel bileşenleridirler. Altı yüz kadar silikat minerali bilinmektedir. Bunların arasında yalnızca feldispatlar, amfiboller, piroksenler, mikalar, olivinler, fedispatoitler ve zeolitler kayaçların oluşumunda önem taşır. Bütün silikat minerallerinin temel yapısal birimi, merkezinde bir silisyum atomu, köşelerinde ise silisyum atomuna bağlanmış dört oksijen atomu bulunan

düzgün bir dörtyüzlüdür [30]. Suda çözünmeyen silikatların çoğundan cam eşyâ ve emâye, çanak, çömlek, porselen ve başka seramik malzemelerin üretiminde faydalanılır. Su camı olarak bilinen sodyum silikatlar sabun yapımında, ahşap malzemenin çürümesini önlemede, yumurtaların saklanması, çimento olarak ve boyalarda kullanılır. Sodyum silikat suda çözünen bir cam türüdür ve zaten bu nedenle de su camı diye de bilinir değişik türlerde sodyum silikatlar bulunur. Bunlardan en yaygın olanı sodyum ortosilikat (Na_4SiO_4), sodyum metasilikat (Na_2SiO_3), sodyum disilikat ($\text{Na}_2\text{Si}_2\text{O}_5$) vs. gibi başka türevleri de vardır. Cam gibi şeffaf, kristal halinde ve suda çözünebilen bir katıdır. Piyasada çoğunlukla toz halinde satılmaktadır ya da sulu çözelti olarak yüksek erime noktasına sahiptir ($800\text{ }^\circ\text{C}$ üzeri). Silika jel yapımında kullanılır. Ayrıca, seramik, cam benzeri nesneler için yapıştırıcı olarak da kullanılır [97].

2.2.12.2. Sodyum Hidroksit

Sodyum hidroksit, beyaz renkte nem çekici bir maddedir. NaOH formülüyle gösterilir. Suda kolaylıkla çözünür ve yumuşak kaygan ve sabun hissi veren bir çözelti oluşturur. İnsan dokusuna kaşıntıverici bir etkisi vardır. Sodyum hidroksit (kostik soda veya suda kostik te denir), laboratuvarlarda CO_2 gibi asidik gazları yakalamak için kullanılır. Endüstride birçok kimyasal maddenin yapımında, yapay ipek, sabun, kâğıt, boya, deterjan endüstrisinde ve petrol rafinelerinde kullanılır. Ayrıca serigrafide pozitif 20 ile beraber kullanılır. Bir bazdır. Su ile tepkimeye girdiğinde yaklaşık 5 dakika içinde sıcaklığı $50\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye çıkar ve yaklaşık 15 dakika sıcak kalır [98].

2.2.12.3. Kalsiyum Hidroksit

Kalsiyum hidroksit sönmemiş kirece su ilave edilmesiyle elde edilen kimyasal bileşiktir. Kristal beyaz renkli toz halde bulunur. Suda çözündüğünde hamurumsu görüntü veren bir alkalidir. Geleneksel adı söndürülmüş kireç veya hidratik kireçtir. Eğer $512\text{ }^\circ\text{C}$ 'ye, kadar ısıtılırsa bozunarak kalsiyum oksit ve suya dönüşür.

Kullanımı;

- Su içerisindeki atıkları temizlemede ve toprağı nötralleştirmede kullanılır.
- Ağartıcılarda, harç ve beton malzemelerinde,
- Tabaklama endüstrisinde,

- Petrol arıtma endüstrisinde,
- Akvaryumlarda salyangoz, algler ve mercanlar gibi canlıların yaşaması için biyolojik denge oluşturmada,
- Gıdalarda ve alkolü içeceklerde,
- Dişhekimliğinde tedavi materyali olarak da kullanılır [99].

2.2.12.4. Potasyum Hidroksit

Akkor derecede uçucu olan, 360 °C’de eriyen, suda ısı açığa çıkararak çözünen, beyaz renkte katı bir maddedir. Alkalik bir baz olan potasyum hidroksidin geniş bir kullanım alanı vardır. Endüstride arap sabunu üretiminde, pillerde elektrolit olarak ve gübre yapımında kullanılır. Potasyum hidroksit tarımda özellikle asidik toprakların pH derecesini dengelemek alkalik yapmak amacıyla sıkça kullanılır. Ayrıca tarım ilaçlarının yapımında da kullanılır. Bunun yanında tıpta, endüstriyel kimyada da kullanılır. Potasyum hidroksit endüstriyel kimyada geniş kullanım alanlarına sahiptir. Geri dönüşümlü kâğıtların yapımı, sıvı sabun yapımı ve birçok temizlik ürününün üretiminde potasyum hidroksitten yararlanılır. Ayrıca veteriner hekimliğinde bazı hayvan ilaçlarının yapımında kullanılmaktadır. Potasyum hidroksit CO₂ tutucudur bu yüzden bitkisel deneylerde yararlanılmaktadır [98].

2.3. Geopolimerde Yüksek Sıcaklık Etkisi

Geopolimerler yüksek sıcaklık etkilerine dayanıklı malzemelerdir [100]. McNulty yaptığı çalışmada, iki tip normal Portland çimentosunun yangın dayanımı ile iki çeşit geopolimerin yangın dayanımını karşılaştırmış ve geopolimerin daha yüksek yangın dayanımı gösterdiğini tespit etmiştir [101]. Sarker ve Meillon, 800 °C sıcaklığa maruz kalan uçucu küllü geopolimer betonun dayanımını incelemiştir. Numuneler 60 °C sıcaklıkta kür edilmiştir. 800 °C’de geopolimer çimentoların dayanımlarının, portland çimentoların dayanımlarına göre daha yüksek sonuçlar verdiğini belirlemiştir [29,102]. Elimbi ve diğerleri, geopolimer çimentolar üretiminde kaolinit kil için en uygun sıcaklığı araştırmışlardır. 450 °C’de geopolimer çimento hamurunun priz süresi çok uzundur. 500 °C ve 700 °C arasında geopolimer çimento hamurunun sıcaklık artışıyla priz süresinin azaldığı gözlenmiştir. 700 °C’nin üzerindeki sıcaklıklarda priz süresi artmaya başlamıştır. 21.ve 28.

günler arasında büzülme en düşük değerlere ulaşmıştır. Geopolimer çimento hamurunun 500 °C ve 700 °C arasında basınç dayanımı değeri 11.9 ve 36.4 MPa arasında değerler elde edilmiştir. Sonuç olarak kaolinit kil geopolimer üretmek için en uygun sıcaklık değerinin 700 °C olarak belirlenmiştir [29,103]. Rashad ve diğerleri yaptıkları çalışmada düşük kalsiyum içeren F tipi uçucu külü kullanarak geopolimer üretmişlerdir. Yapılan çalışmada uçucu kül tabanlı geopolimer çimento ile portland çimentosu karşılaştırılmıştır. % 20, % 30 ve % 40 içerikli sodyum silikat ile uçucu kül karıştırılmış ve geopolimer hamurlar oluşturulmuştur. 28 günlük numuneler 105 °C’de etüvde kurutulmuş ve kurutulduktan sonra 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C’de fırına atılıp yangın dayanımları incelenmiştir. Çalışma sonucunda uçucu kül tabanlı geopolimer hamurların, yangın direncinin Portland çimentoya göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Geopolimer beton 1000 °C’ye maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanım değeri 33.35 MPa olarak tespit edilmiştir [29,104].

2.4. Çimentonun Çevreye Etkileri ve Geopolimer Uygulama Alanları

Çimento fabrikaları partiküller hava kirleticileri arasında ilk sırada yer almaktadır. Çimento imalatı esnasında çimento kliniklerini yakmak için kullanılan döner fırınlarında meydana gelen gazlar (SO, CO, NO), öğütülmüş kireçtaşı ve çimento tozları bu endüstride çevreye yayılan en önemli kirleticilerdir. Çimento fabrikalarının bilinen bu etkilerinin yanı sıra belkide üzerinde durulmayan en önemli etkisi çevreye kadmiyum elementi yaymasıdır. Çevreye yayılan kadmiyum toprakta birikmekte böylece bitkilere geçip daha sonra besin zinciri ile insanlar tarafından tüketilmektedir. Kadmiyum insan vücudunda sadece bitkilerle değil aynı zamanda solunum yoluyla da alınmaktadır. Kadmiyumun maruz kaldığı insanlarda sürekli baş ağrısı, baş dönmesi, mide bulantısı, kusma, uykusuzluk, sinirlilik daha sonra göğüs ağrıları ve astım gibi solunum sistemi hastalıkları ortaya çıkmaktadır. Bu konuyla ilgili Eskişehir Çimento fabrikası çevresinde yapılmış bir araştırmada fabrikadan uzaklaştıkça insanların kan örneklerinde kadmiyum miktarının düştüğü görülmektedir. Bu durum çimento fabrikalarının kadmiyum yaydığının açık bir kanıtıdır. Ayrıca yine çimento fabrikalarının muhtemel etkileriyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Çanakkale çimento fabrikasının çıkardığı gazların zeytin ağaçlarına olan etkisinin araştırıldığı bir çalışmada fabrikadan uzaklaştıkça bitki boyunda belirgin bir artış olduğu bulunmuştur. Yine fabrikaya yakın olan arazilerdeki ağaçlarda % 76.19 daha az meyve alınmaktadır. Çimento tozları bitkilerde sürgün ve yapraklarda büyüme ve

gelişmeyi olumsuz etkilemektedir. Buda bitkisel üretimde önemli verim kayıplarına neden olmaktadır. Bilim adamları çimento tozlarının bitkilerde strese neden olduğunu böylece yapraklarda sentezlenen bitki büyüme hormonu indol-3-asetik asit (oksin) oranının düştüğünü ve yine büyüme engelleyici hormon olan absisik asit oranında da bir artış olduğunu bildirmektedir. Çimento fabrikalarından kaynaklanan kirlilik sadece bitkisel üretimi değil aynı zamanda hayvansal üretimi de etkilemektedir. Hayvanların otlatıldığı meralar da ve özellikle su kaynaklarında çimento fabrikalarından kaynaklanan birçok toksik madde bulunmaktadır. Bu tesisler sadece tarım alanlarında verim kaybı ve insan sağlığına olumsuz etkilerle karşımıza çıkmamaktadır. Aynı zamanda görüntü kirliliği ve özellikle ham madde temin edilmesinde patlatılan dinamitlerden dolayı deprem riskini de beraberinde getirmektedir [105]. Geopolimerin göstermiş olduğu fiziksel ve kimyasal özellikleriyle; prekast yapı endüstrisi, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan yapı malzemeleri, heykeltçilik ve süsleme sanatları, beton esaslı yol kaplamaları, zemin iyileştirme, nükleer atıkların depolanması, refrakter seramik malzeme üretimi, ağır iklim şartlarına ve yangına dayanıklı duvar kaplaması üretimi, güçlendirme, tarihsel yapıların taşıyıcı sistemlerinin restorasyonu, uçak endüstrisi ve nükleer santrallerde kullanılabilir [45].

Hanzlıcek ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada geopolimer bağlayıcıların, değerli tarihi yapıların restorasyonunda bağlayıcı ve onarıcı malzeme olarak kullanılacağını göstermiştir [30,106]. Sürekli kullanıma açık bulunan yerlerin (havaalanı gibi) onarılmasında geopolimer betonlar kullanılabilir [37].

Heitzmann ve Sawyer yaptıkları araştırmalar sonucunda geopolimerlerin Portland çimentoyla benzer şekilde özellik gösterdiği gözlenmiştir [81]. Geopolimer çimentoların, portland çimentolarla birlikte kullanılarak, düşük üretim maliyetli daha iyi özellik gösteren çimento malzemeleri üretilmiştir. Bu karışım % 80 portland çimento ve % 20 geopolimer malzeme içermektedir. Bu üretilen çimento oldukça hızlı ve çok erken yüksek dayanım kazanma özelliği göstermiş ve inşaat sektöründe tanınmıştır. Ayrıca bu malzemenin, endüstriyel kaplamalarda ve otoban yollarda, pist onarımı için dökülen betonlarda ideal bir malzeme olduğu görülmüştür. Bu malzeme, pistte 4-6 saat arası sertleşmektedir. Fakat düz beton birkaç gün sonra sertleşmekte ve geopolimer çimentolar 4 saat sonra, yaklaşık 20 MPa basınç dayanımı göstermektedir [45].

3. BETONDA LİF ÇEŞİTLERİ VE KULLANIMI

3.1. Lif Çeşitleri

Lifler malzemelerin en geliştirilmiş halidir, dayanımları ve elastisite modülleri genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre çok büyüktür. Farklı özellikleri ve kullanım alanları bakımından birçok lif türü vardır [107].

Lifler genel olarak şöyle sınıflandırılabilir:

Doğal Lifler;

- Hayvansal Lifler
- Bitkisel Lifler
- Mineral Lifler

Sentetik Lifler;

- Polimer Lifler
- Metalik Lifler
- Seramik Lifler

Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler tablo 3.1’de görülmektedir [108,109].

Tablo 3.1.Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler [108,109].

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü(10^3 MPa)	Maksimum Uzama(%)	Özgül Ağırlık(gr/cm^3)
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0,6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Polietilen	690	0.14-0.4	10	0.95
Yük. Perf. Polietilen	2700	120	5	0.97

Polipropilen	552-759	3.5	25	0.90
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0,6	2.7
Çelik	276-2760	200	0.5-35	7.8
PVA	880-1600	25-40	6-10	1.30

3.1.1. Metalik Lifler

Çelik lifler, betona katılan metalik liflerin en yaygın olanıdır. Ortaya çıkan ürün de, kısaca ÇLTB (çelik lif takviyeli beton) veya MLTB (metal lif takviyeli beton) diye adlandırılır. Takviye elemanları olarak üretilen çelik lifler, aynı uzunluktaki cam ve polimer liflere göre daha kalın ve daha serttir. Dairesel kesitli çelik liflerin çapları 0.2 ila 1.0 mm arasında değişmektedir. Uzunlukları ise genelde 20 ila 50 mm arasında değişmektedir. Eritip çekme yöntemi ile veya amorf yapıda şerit biçiminde üretilen çelik liflerin, üretim yöntemine göre belirlenen boyut ve şekilleri vardır. Bu lifler genellikle yaklaşık 1.8 mm genişlikte ve 0.025 mm ile 0.100 mm kalınlıkta ve düz kesitlidir, uzunlukları da 10 mm ila 60 mm arasındadır. Çelik liflerin sertlikleri ve karıştırma sırasında bükülmeye karşı gösterdikleri yüksek dirençleri, diğer liflerle karşılaştırırken çelik liflerin narinliğini göz önünde bulundurmaya gerektirmektedir. Narinlik oranı, lifin boyunun çapına bölünmesiyle (L/d) bulunur. Çelik liflerin narinlik oranı 20 ile 250 arasında değişmektedir [110]. Türk standardı TS 10513/92 [111] ise çelik lifleri şekillerine göre şu şekilde sınıflandırmaktadır:

- Düz, pürüzsüz yüzeyli lifler,
- Bütün uzunluğunca deforme olmuş lifler,
- Sonu kancalı lifler.

B sınıfı lifler, uzunluğu boyunca deforme olma şekline göre;

- Üzerinde girintiler (çentikler) açılmış lifler,
- Uzunluğu boyunca dalgalı (kıvrımlı) lifler,
- Ay biçimi dalgalı lifler.

C sınıfı lifler sonlarındaki kancalara göre;

- İki ucu kıvrılmış lifler,

- Bir ucu kıvrılmış lifler olmak üzere ikiye ayrılır.

Çelik tel donatılı betonlar, geleneksel betonlarla mukayese edildiğinde, daha yüksek süneklik, tokluk, eğilme dayanımı ve şekil değiştirme kapasitesi gibi üstün mekanik özellikleri nedeniyle, günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Çelik tel donatılı betonlar, hemen her türlü inşaat projesinde kullanım alanı bulabilmeleri nedeniyle de yine en yaygın olarak kullanılan lif donatılı beton türlerinden birisidir [112].

Çelik lif takviyeli betonun mekanik özellikleri; lifin boyu, şekli ve beton içerisindeki miktarı, liflerin narinlik oranı, çimento cinsi ve miktarı, numunelerin boyutu, şekli, hazırlanma metotları, su/bağlayıcı oranı, kullanılan agreganın cinsi ve tane dayanımı ile yakından ilgilidir. Ayrıca, ısıtma işlem uygulamasının da lifli betonun mekanik özelliklerine etkisi büyüktür. Bu tip etkenler deney sonuçlarını büyük ölçüde etkiler ve normal betonun zayıf olan birçok özelliğini iyileştirerek performansını artırır. Bu iyileşmeler genel olarak Tablo 3.2’de görülmektedir.

Tablo 3.2. Lif takviyeli betonların bazı özelliklerinde matris malzemesinin özelliklerine oranla görülen artışın yaklaşık değerleri [113].

Betonun Özelliği	Artış %
Tokluk	100-1200
Darbe Dayanımı	100-1200
İlk Çatlak Dayanımı	25-100
Çekme Dayanımı	25-100
Basınç Dayanımı	±25
Yorulma Dayanımı	50-100
Şekil Değiştirme Oranı	50-300
Eğilme Çekme Dayanımı	25-200
Kavitasyon-Erozyon Direnci	200-300
Elastisite Modülü	±25

3.1.2 Mineral Lifler

En bilineni cam lifler olup, sertlik, dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar. Esnek, hafif ve pahalı olmayan bu

malzemeler genelde çimento hamuruna veya harç karışımlarına katılarak kullanılır. İri agregalı betonda pek kullanılmaz [114]. Cam lifler; sertlik, korozyona dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla tepkimeye girmeme gibi tipik cam özelliklerini sergiler. Ayrıca, esnek, hafif ve pahalı olmayan bir malzemedir. Bu özellikler, cam liflerini düşük maliyetli endüstriyel uygulamalarda en çok tercih edilen lif tipi yapmaktadır. Cam lifler yüksek dayanıma sahip olduklarından, lif yüzeyinde oluşan kusurlar hem sayıca az, hem de boyutça küçüktür. Cam liflerin özellikle E tipi, beton ve çimento gibi alkaline içeren ortamlarda kullanılması zamanla korozyona neden olabilir, bu yüzden cam liflerin bu uygulamalarda kullanılması istenmez. CEM-Fil diye adlandırılmış olan, alkali etkisine dirençli nitelikteki cam liflerini üretmesi, cam lifi donatı alanında bir dönüm noktası oluşturmuştur. Bundan sonra, beton ve harçların donatılmasında, bu özel cam lifleri kullanılmaya başlamıştır. Bazı önemli cam liflerinin tipik özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir [114].

Tablo 3.3. Bazı cam liflerinin tipik özellikleri [114].

Cam lifi tipi	Özgül Ağırlık (gr/cm³)	Çekme Dayanımı (GPa)	Elastisite Modülü (GPa)
E	2.54	1.7-3.5	69-72
S	2.48	2.0-4.5	85
C	2.48	1.7-2.8	70
CEM-FİL	2.70	-	80

Cam Lifi Takviyeli Betonlar (Glass Fiber Reinforced Concrete), alkaliye dayanıklı özel cam lifiyle güçlendirilmiş; yüksek dozajda çimento, ince agrega ve katkı malzemelerinin karıştırılmasıyla oluşan kompozit malzemelerdir [115]. Cam lifi takviyeli betonlarda, cam lifi kullanılması, malzemenin kırılma sırasında gevrek davranış göstermesini engellemektedir. Cam lifi içermeyen numuneler gevrek bir şekilde kırılırken, cam lifi içeren numuneler yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü ve uzun sürede kırılmaktadır. Bu özellik ile kompozit malzemelerde karşılaşılan ve en önemli sorun olan gevrek davranış ortadan kalkar. Malzeme içerisindeki cam lifi miktarı arttıkça kırılma enerjisi, net eğilme dayanımı ve karakteristik boy büyük oranda artmaktadır [114].

3.1.3. Polimerik Lifler

Polimer lifler çok geniş uygulama alanları ve çeşitleri olan bir lif türüdür [112]. Polimerik lifleri doğal ve sentetik olmak üzere iki grupta toplamak mümkündür. Doğal polimerik lifler, pamuk, sisal, hint keneviri gibi bitkisel kökenli yada yün, deri gibi hayvansal kökenli liflerdir. Sentetik polimerik liflerin başlıcaları ise polipropilen, naylon, polietilen, aramid ve perlondur [113].

Polipropilen lifler, aynı zamanda çimento esaslı malzemelerin takviyesinde de kullanılabilir. Fakat liflerin kullanım miktarı genelde çok düşüktür (% 0.5 ile %10 arası). Harç ve betona lif katılmaya başlamasının nedeni; lifin malzemenin çekme ve darbe dayanımını arttırması ve çatlak oluşumundan sonra sünek bir yapı göstermesidir [114]. Bazı polimer liflerin fiziksel özellikleri tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4.Polimer liflerin fiziksel özellikleri.

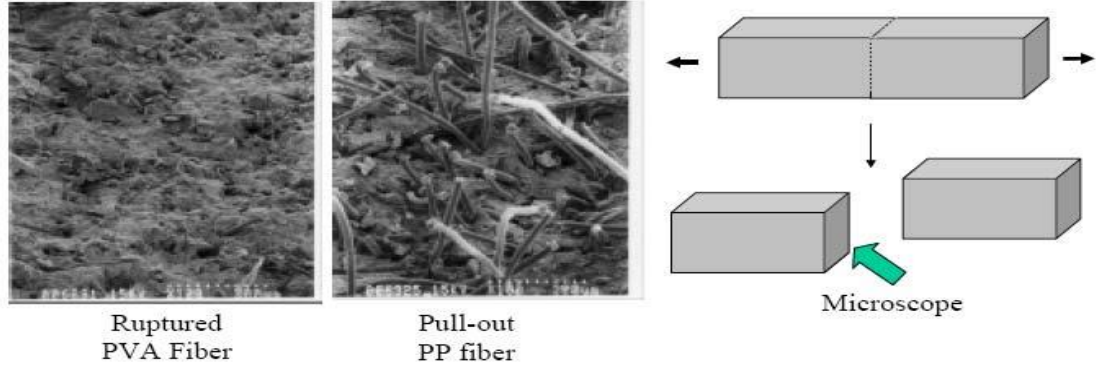
Lif Tipleri	Etkili Çap (10⁻³ mm)	Özgül Ağırlık (gr/cm³)	Çekme Dayanımı(MPa)	Elastisite Modülü(GPa)	Nihai Uzama (%)
Akrilik	13-104	1.17	207-1000	14.6-196	7.5-50.0
Aramid I	12	1.44	3620	62	4.4
Aramid II	10	1.44	3620	117	2.5
Naylon	-	1.16	965	5.17	20
Polyester	-	1.34-1.39	896-1100	17.5	-
Polietilen	25-1020	0.96	200-300	5	3
Polipropilen	-	0.90-0.91	310-760	3.5-4.9	15

3.1.4. PVA Lifler

PVA (polivinil alkol) lifler ilk olarak 50 yıl önce Japonya’da üretilen organik liflerdir. Bu noktadan itibaren PVA lifler çeşitli endüstriyel uygulamalarda yoğun olarak kullanılmışlardır. PVA lifler yüksek elastisite modülü ve çekme dayanımına sahip oldukları gibi, UV ışınları, kimyasal etkiler ve hava koşullarına karşı mükemmel direnci ile öne çıkarlar. 1980’li yıllardan itibaren asbest kökenli liflerin sağlığa karşı tehlikelerinin

üzerinde giderek daha fazla durulması PVA liflerin asbest liflerin yerini almaya başlamasına neden olmuştur. Çelik, karbon, Kevlar ve fiberglas lifler gibi, PVA lifler de eğilmeye karşı betonun çok daha dayanıklı olmasını sağlayan yüksek elastisite modülüne sahip olup çimentolu kompozitlerin direncini arttıırırlar. Diğer liflerden farklı olarak PVA lifler hidrofil özelliğini gösterirler ve bu durum hidrasyon ve kür aşamalarında matrisle arasında moleküler bağ kurulmasını sağlar. Bağ direnci, eğilme dayanımı ve yüksek elastisite modülü PVA lif katkılı betonların eğilme ve çekme dayanımı açısından yüksek performans göstermesine yol açarlar.

PVA lifler yüksek bağ dayanımı ve ultra inceliklerinden dolayı yüksek yayılım göstermeleri ile kuruma büzülmesi çatlaklarını açılmadan önlerler. İsviçre’de yapılan deneyler sonucunda PVA liflerin 20 yıl sonrasında bile herhangi bir bozunmaya uğramadıkları görülmüştür. Zirkonyum kaplı polipropilen, AR ve naylon liflere göre, kuvvetli alkali ortamlarda PVA lifler daha yüksek performans göstermektedirler. PVA lifler sudan daha yüksek yoğunluğa sahip oldukları için karıştırma, pompalama ve yüzey sonlama işlemleri sırasında karışım içinde stabil kalarak yüzeye çıkmazlar. Yüzey sonlama işlemleri sırasında yatay kaldıkları için pürüzsüz bir yüzey elde edilir. PVA lifler, perde duvarlar, shotcrete uygulamaları, tünel çalışmalarında, lif donatılı çimentolu levhaların üretiminde kullanılmaktadırlar. PVA liflerin ana maddesi olan PVA reçinesi Amerikan Gıda ve İlaç Kurulu tarafından da onaylanmıştır. PVA’nın kimyasal yapısının ana taşlarını karbon, hidrojen ve oksijen meydana getirdiği için, yanma sırasında dioksin ve amonyak gibi zararlı maddeler çıkmaz. PVA lifler diğer organik liflere kıyasla yüksek dayanıklılık ve elastisite modülü değerine sahiptir. PVA lifler yüksek eğilme dayanımları ve elastisite modülleri ile çatlak ilerlemesine karşın çok iyi performans gösterirler. PVA lifler yüksek derecede lif-matris aderansı gösterirler ve üretim esnasında liflerin yüzeylerinde yapılacak deformasyonlar ile lif-matris aderansının daha da güçlü kılınması mümkündür. Şekil 3.1’de PVA lifli ve Polipropilen lifli kompozitin kırıldıktan sonraki mikroskop görüntüsü görülmektedir. Polipropilen liflerin sıyrıldığı PVA liflerin koptuğu görülmektedir [115].



Şekil 3.1.PVA lifli ve Polipropilen lifli kompozitlerin mikroskop altındaki görüntüsü [115].

PVA lif donatılı betonlarla ilgili olarak yürütülen çalışmalar neticesinde, bu betonların eğilmede çekme dayanımlarının yalın betonlara kıyasla oldukça yüksek olduğu, enerji yutma kapasitelerinin yüksekliği nedeniyle oldukça sünek bir davranış sergiledikleri gözlemlenmiştir [115]. Ayrıca bir başka çalışmada, PVA lif donatılı betonların eğilmede çekme dayanımlarının ve donma çözülme çevrimlerine karşı dayanıklılıklarının çok iyi olduğu belirtilmiştir [116].

3.2. Liflerin Beton Takviyesinde Kullanımı

Betonda lif kullanımının başlıca yararları şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek taşıma kapasitesine sahip, sünek bir beton elde edilmesi,
- Donatı korozyonunun önlendiği düzgün yüzeyli beton üretimi,
- Etkin çatlak kontrolü,
- Dayanıklılık,
- Donatı işçiliğindeki önemli azalma [111].

Gevrek bir malzeme olan betona karışım sırasında lif ilave edilmesiyle daha sünek bir yapı oluşturularak betonun bazı mekanik özelliklerinde iyileşme beklenir [108]. Çimento esaslı kompozitler, plastik şekil değiştirme esnasında eşsiz bir özellik gösterirler, birçok küçük çatlak oluşması ile tek bir çatlağın genişlemesi kontrol edilmiş olur. İlk çatlak oluşumundan sonra yük taşıma kapasitesi şekil değiştirmenin devam etmesine rağmen hala artmaktadır [114]. Betonun kırılma mekanizması ilk çatlağın oluşmasıyla tamamlanmaktadır. Kısa ve rastgele dağıtılmış liflerle donatılan beton ise kırılma mekanizması birçok paralel çatlağın oluşması ile tamamlanır. Beton içinde, gerek priz

anında oluşan mikro çatlaklar gerek içsel gerilmelerden oluşan çatlaklar, eleman çalışmaya ve yük almaya başladıktan sonra büyümeye başlayacaktır. Çatlak, beton içinde ilerlerken liflerle karşılaştığında, çatlağın ilerlemesini sağlayan gerilme enerjisi liflere aktarılacak ve lifler tarafından karşılanmaya başlayacak, lif bu enerjiyi karşılayamadığı anda ya kopacak ya da betondan sıyrılacaktır. Lif koptuktan ya da sıyrıldıktan sonra, gerilme enerjisi tekrar betona aktarılacak, çatlak bir sonraki lifle karşılaşınca kadar ilerlemeye devam edecektir. Bu işlem yük arttıkça tekrarlanacak ve elemanda paralel çatlaklar oluşacaktır. Nihai kırılma gerçekleşinceye kadar elemanda oluşan paralel çatlaklar elemanın sünekleştiğinin göstergesidir. Normal beton ile lifli betonların yük deplasman eğrisine bakıldığında, ilk çatlak oluşuktan sonra normal beton derhal kırılacak, ancak lifli beton yük almaya devam edecek, hatta eğilme dayanımının arttığı görülecektir [114].

Liflerle donatılı harç ve betonların üretiminde genelde üç temel yöntem kullanılmaktadır. Bunlar ön karıştırma, püskürtme ve fitil veya örgü elyaf kullanma yöntemleridir. Ön karışım yapılması halinde, kompozit içinde lifler serbest ve üç boyutta olmak üzere gelişigüzel dağılmaktadır. Püskürtme yönteminde ise matrise püskürtülen lifler, kesitte düzlemde dağınık olarak yer almaktadır. Fitil ve örgü lif kullanılması halinde ise, donatı bir yönde ve sürekli olmaktadır [110]. Rasgele dağıtılmış kısa liflerle donatılandırılmış çimento pastası ya da beton karışımları, normal betondan farklı olarak, sadece çimento, kum, su, lifler ve çeşitli katkı malzemeleri kullanılarak imal edilirler. Rasgele dağıtılmış kısa liflerle donatılandırılmış betonların ya da kompozitlerin iki türlü uygulaması vardır:

- Kısa lifler rasgele çimento pastasının içine karıştırılır, agrega, kum gibi betonu oluşturan malzemelerden biri olarak kullanılır ve bununla oluşturulan yapı elemanı geleneksel olarak donatılandırılır,
- Rasgele beton içine karıştırılmış lifler doğrudan donatı olarak kullanılır, başka bir donatı kullanılmaz [110].

3.3. Lif Narinlik Oranı ve Lif Yüzdesinin Etkileri

Narinlik oranı, lifleri tanımlayan en önemli parametrelerden biridir. Lif uzunluğunun yuvarlak kesitli lifler için $\frac{l}{d}$, yuvarlak olmayanlar içinse eşdeğer $\frac{l}{dc}$ bölünmesiyle bulunur. Bu oran 40 ila 1000 arasında değişir ama genelde 300' den daha düşüktür [113]. Narinliğin artmasıyla beraber, mekanik performans artsa da, yerleştirmede

ve karıştırmada karşılaşılan problemler dolayısıyla, bu değerin 100 gibi bir değerle sınırlandırılması önerilmektedir [115].

Üretimde kullanılan lif içeriği de optimum bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Lif içeriğinin yüksek olması durumunda karıştırma ve yerleştirme problemleri ortaya çıkar ve lifler karışım içerisinde topaklanır. Bu topaklanmalar matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olur. Karışımda iri taneli agrega kullanılmaması, lif narinlik oranının optimum bir değerde olması, liflerin karışıma kuru katılması ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması ile liflerin matris içerisinde homojen dağılması sağlanabilir [117].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tez çalışmasında, geopolimer çimentonun ana hammaddesi olan uçucu kül Seyit Ömer Termik Santrali'nden temin edilmiştir. Ayrıca geopolimer betonu üretebilmek için kullanılan uçucu külün Si/Al oranı 2.64'dür. İki farklı alkali çözelti ve uçucu külün % 0, %1 ve % 2 oranlarında polivinil alkol fiber kullanılmıştır. Agregası olarak ise 0-8mm ve 8-16 mm dere agregası kullanılmıştır. Hazırlanan taze betonlar 108 adet 75x75x300mm boyutlarındaki kiriş ve 108 adet 100x100x100 mm boyutlarındaki küp kalıplarına dökülmüştür. Numuneler sarsma tablasında yerleştirildikten sonra etüvde 60 °C, 80 °C ve 100 °C olmak üzere üç farklı ısı işleme tabi tutulup 28 gün 20±2 °C'deoda koşulları altında küre bırakılmıştır.

4.1. Malzemeler

4.1.1. Uçucu Kül

Bu tez çalışmasında, Seyit Ömer Termik Santrali'nden temin edilen F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. elde edilmiştir. Kullanılan uçucu küle ait kimyasal bileşim ve fiziksel özellikler ise Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1. Uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim (%)	Uçucu Kül
S(SiO₂)	54.49
A(Al₂O₃)	20.58
F(Fe₂O₃)	9.27
S+A+F	84.34
CaO	4.26
MgO	4.48
SO₃	0.52

K₂O	2.01
Na₂O	0.65
KK	3.001

4.1.2. Agregalar

Deneylerde 0-8 mm ve 8-16 mm arası dere agregası olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan agregaya ait özellikler tablo 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.2.Deneylerde kullanılan agregaya ait özellikler

Özellik	İri Agreg	İnce Agreg
Kuru özgül ağırlık (kg/dm³)	2.67	2.73
Su emme (%)	2.0	2.1
500 devir aşınma (%)	5.6	-

4.1.3. Akışkanlaştırıcı Katkı

Karışımlarda Sika firmasına ait “Visco Crete Hi-Tech 36” serisi yüksek performanslı 3. nesil süper akışkanlaştırıcı beton katkısı kullanılmıştır. Yapılan deneme karışımları sonucu tüm serilerde akışkanlaştırıcı katkı maddesi %1.5 oranında kullanılmıştır. Tablo 4.3’de ise kullanılan akışkanlaştırıcının özellikleri verilmiştir.

Tablo 4.3. Akışkanlaştırıcı katkının kimyasal ve fiziksel özellikleri

Görünüm / Renk	Açık kahverengi sıvı
Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1.07 – 1.11 kg/l (20 °C’de)
pH Değeri	3 – 7
Donma Noktası	-9°C
Suda Çözünabilir Klorür Yüzdesi	En fazla % 0.1, Klorür içermez.
Alkali Miktarı	En Fazla % 4

4.1.4. Su

Deneysel çalışmaların tamamında TS EN 1008'e [118] uygun, Elazığ İli Şebeke suyu kullanılmıştır.

4.1.5. Sodyum Hidroksit

Bu tez çalışmasında, alkaliyi aktifleştirmek için sodyum hidroksit kullanılmıştır. Sodyum hidroksitin özellikleri tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4.Sodyum hidroksitin kimyasal özellikleri

Kimyasal adı	Sodyum hidroksit, Kostik
Kimyasal formül	NaOH
Molekül ağırlığı	39.9971 g/mol
CAS numarası	[1310-73-2]
Yoğunluk	2.1 g/cm ³
Erime noktası	318 °C (591 K)
Kaynama noktası	1.390 °C (1.663 K)

4.1.6. Sodyum Silikat

Bu tez çalışmasında alkali aktivatör olarak sodyum silikat kullanılmıştır. Sodyum silikatın özellikleri tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Sodyum silikatın kimyasal özellikleri

Asitik Değer, %	0.05
Yoğunluk (kg/litre)	0.933-0.936
Kaynama Noktası, °C	101
Donma Noktası, °C	-48
Saflık, %	99.99
Suda Çözünürlüğü (gram/litre)	15

4.2. Numunelerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında, agregası olarak 0-8 mm ve 8-16 mm dere agregası kullanılarak 28 gün $20\pm2^{\circ}\text{C}$ 'de hava küründe bekletilen geopolimer beton serileri hazırlanmıştır. Hazırlanan beton numunelerin karışım oranları tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Deneylerde kullanılan betonun karışım oranları.

Karışım	Uçucu Kül (kg/m ³)	PVA Fiber (kg/m ³)	Sodyum Silikat (kg/m ³)	Sodyum hidroksit çözeltisi (lt/m ³)	Akışkanlaştırıcı (kg/m ³)	Agrega 0-8 mm (kg/m ³)	Agrega 8-16 mm (kg/m ³)
GK	400	-	197	198	6	914	609
G1	400	4	197	198	6	909	606
G2	400	8	197	198	6	904	602

Basınç dayanımı, ultrasonik geçiş hızı ve eğilmede çekme deneyleri için 75x75x300mm boyutundaki kırı ve 100x100x100 mm ölçülerindeki küp numuneler hazırlanmıştır. Her karışım ve sıcaklık için 3'er adet numune üretilmiştir. Daha sonra numuneler etüvde 60 °C, 80 °C ve 100 °C'de 24 saat bekletilmişlerdir. 28 gün boyunca $20\pm2^{\circ}\text{C}$ atmosferik oda koşullarında küre tabi tutulmuşlardır. Daha sonra numuneler etüvde $105\pm5^{\circ}\text{C}$ ' de 24 saat kurutulmuştur. Numuneler 20°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra ultrasonik ses geçirgenliği, basınç dayanımı ve eğilmede çekme deneyleri yapılmıştır.

4.3. Uygulanan Deneyler

4.3.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanım deneyi için 3'er adet 100x100x100 mm ölçülerindeki küp numuneler üzerinde, TS EN 12390-3'e göre yapılmıştır [119]. 28 gün hava küründe bekletilen numuneler 3000 kN yükleme kapasitesine sahip, otomatik kontrollü preste kırılarak dayanım değerleri belirlenmiştir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Yük kontrollü pres

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

f_c = Beton deney numunesi basınç dayanımı (N/mm²)

P = Kırılma yükü (N)

A = Kesit alanı (mm²)

4.3.2. Ultrasonik Ses Geçirgenlik Deneyi

Ultrasonik test cihazı ile betonun içine gönderilen ses dalgalarının betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine geçme süresi ölçülüp, dalga hızı hesaplanmaktadır. Bulunan bu ses dalgası hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki elde edilmektedir [120]. Ultrasonik hızı deneyi 3'er adet 100×100×100 mm ölçülerindeki küp numuneler üzerinde uygulanmıştır (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Ultrasonik ses cihazı

Beton numunenin bir yüzeyinden gönderilen ses üstü dalganın diğer yüzeyine ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra dalga hızı aşağıdaki verilen formül yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$(V = \frac{S}{t} \times 10^3) \quad (4.2)$$

Burada;

V = Ses üstü dalga hızı (km/sn),

S = Numunenin ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzeyi arasındaki mesafe (metre),

t = Ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı diğer yüzeye kadar geçen zaman (mikro saniye) [120, 121].

4.3.3. Numunelerin Yüksek Sıcaklığa Maruz Bırakılması

Yüksek sıcaklık deneyi için, numuneler 28 gün hava küründe bekletildikten sonra 20 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C’ deki sıcaklığamaruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonların fırın içerisindeki görüntüsü şekil 4.3’de verilmiştir. Doğal yangını simule edebilmek için sıcaklık artış dakikada 2.5 °C olacak şekilde sabit tutulmuştur. Numuneler

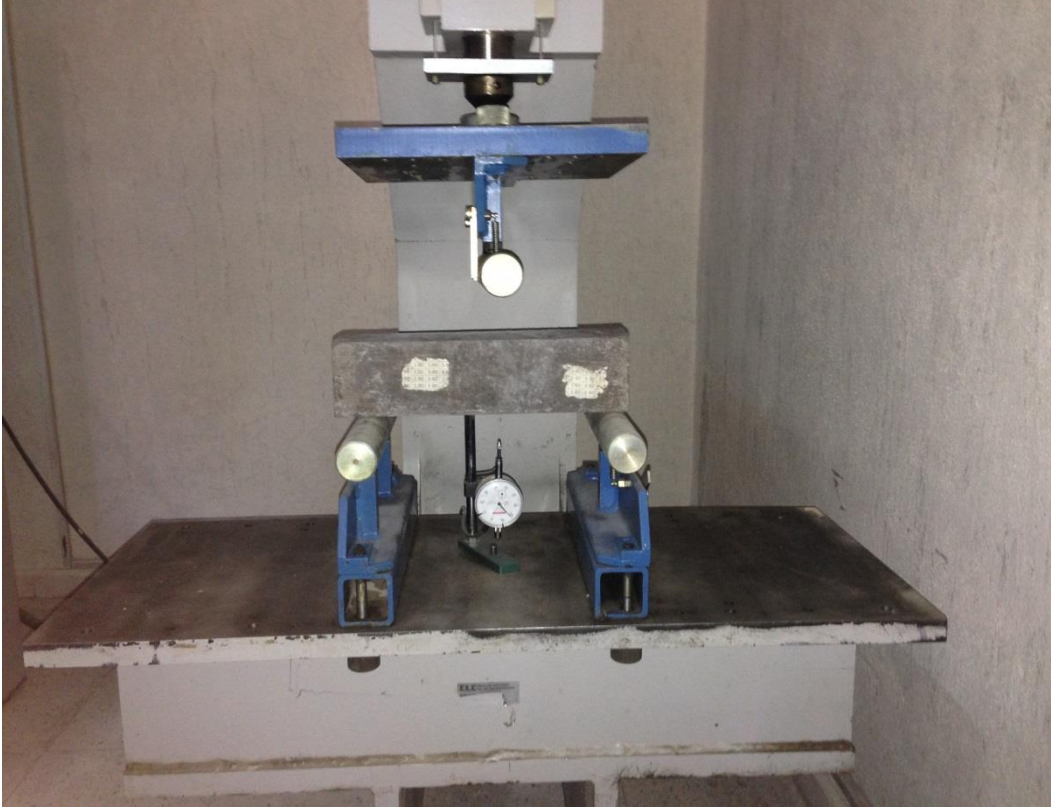
yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra oda sıcaklığına bırakılarak soğuması için bekletilmiştir [122]. Her sıcaklık için 3'er adet numune kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Yüksek sıcaklık fırını

4.3.6. Eğilmede Çekme Dayanımı Deneyi

Eğilmede çekme dayanımı deneyi için 75x75x300 mm boyutlarında kiriş numuneler kullanılmıştır. Her yaş için 3'er adet numune olmak üzere 28 gün sonrasındakidayanımları belirlenmiştir. Numunelerin eğilmede çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-5standardındaki hususlar dikkate alınarak üç noktadan yükleme yapılmıştır[123]. Eğilmede çekme dayanımı deneyinin uygulanmasında Şekil 4.4'deki eğilmede çekme deney aleti kullanılmıştır.



Şekil 4.4. Eğilmede çekme deneyi

$$\sigma_e = \frac{PL}{bd^2} \quad (4.4)$$

σ_e = Eğilme dayanımı (N/mm²)

P = Kırılmaya neden olan basınç yükü (N)

L = Kirişin uzunluğu (mm)

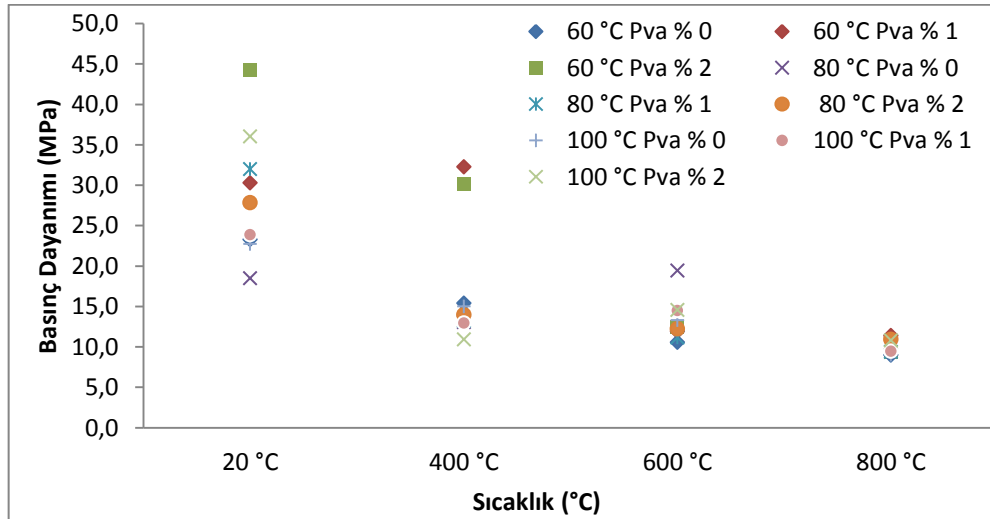
b = Kiriş kesitinin eni (mm)

d = Kiriş kesitinin yüksekliği (mm)

5. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

5.1. Basınç Dayanımı Deneyleri Sonuçları

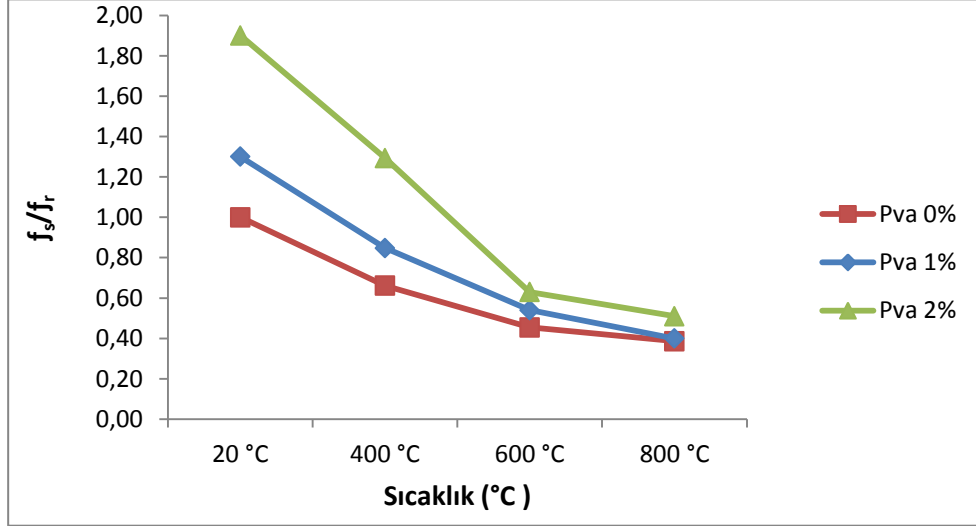
Bu tez çalışmasında, Seyit Ömer Termik Santrali'nden temin edilen uçucu kül iki farklı alkaliyle aktive edilerek geopolimer beton üretilmiştir. Beton üretiminde 0-8 ve 8-16 mm dere agregası kullanılmıştır. Ayrıca beton basınç dayanımını arttırabilmek için uçucu külün % 0, % 1 ve % 2 oranlarında son yıllarda popüler olan polivinil alkol fiber kullanılmıştır. Basınç dayanımı deneyleri için 100x100x100 mm boyutlarında 108 adet küp numune üretilmiştir. Bu numuneler etüvde 60 °C, 80 °C ve 100 °C olmak üzere üç farklı ısıtma işlemde 24 saat bekletilip çıkarıldıktan sonra 28 gün boyunca 20±2°C'de oda koşullarında küre bırakılmıştır. Bu tez çalışmasındaki numunelerin basınç dayanımı değerleri şekil 5.1'de verilmiştir.



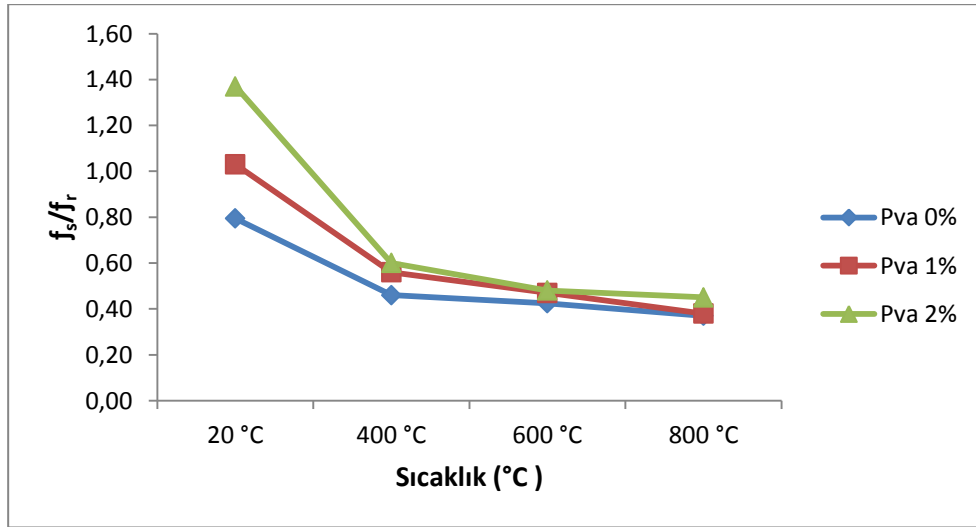
Şekil 5.1. Geopolimer çimentolu polivinil alkol fiberli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı grafiği

Bu çalışmada yapılan deneyleri daha iyi analiz edebilmek için, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış 60 °C'de kür edilen % 0 polivinil alkol fiber içeren betonun basınç dayanımına f_r , yüksek sıcaklığa maruz kalan diğer numunelerin basınç dayanımına ise f_s olarak isimlendirilmiştir [124]. Literatürde uçucu külle üretilen geopolimer betonu için en uygun kür sıcaklığının 60 °C olduğu belirtilmiştir [124]. Bunun için 60 °C kür edilen %

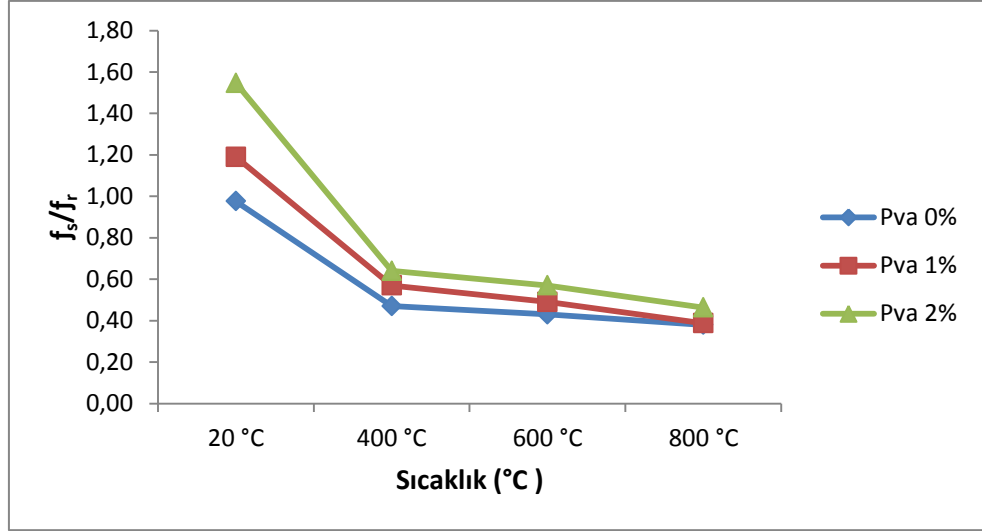
0 povinil alkol fiberli beton numunenin basınç dayanımı f_r olarak seçilmiştir. Numunelerin f_s / f_r oranları şekil 5.2-5.4’de verilmiştir.



Şekil 5.2.60 °C’de ısı işleme tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası f_s / f_r grafiği



Şekil 5.3.80 °C’de ısı işleme tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinilalkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası f_s / f_r grafiği



Şekil 5.4. 100 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası f_s / f_r grafiği

Şekil 5.2’de 60°C’de ısıtılma tabi tutulan ve kür süresi sonunda yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin f_s / f_r grafiği verilmiştir. Şekil 5.2.’de 60°C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli numunelerin basınç dayanımındaki en yüksek artış % 2 polivinil alkol fiberli numunelerde meydana gelmiştir. En düşük dayanım ise % 0 polivinil alkol fiber içeren numunelerde elde edilmiştir. 20 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki artış miktarı % 90 olarak bulunmuştur. 400 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki artış oranı % 29 olmuştur. 600 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki düşüş ise % 37 olarak hesaplanmıştır. Ayrıca 800 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki düşüş miktarı ise % 49 olmuştur.

Şekil 5.3’de 80°C’de etüvde bekletilen ve belirlenen kür süresinin ardından yüksek sıcaklık deneyine tabi tutulan numunelerin f_s / f_r grafiği verilmiştir. Şekil 5.3’de görüldüğü gibi 80°C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli numunelerin basınç dayanımındaki en yüksek artış 60 °C’de elde edilen sonuçlara benzer olarak % 2 polivinil alkol fiberli numunelerde meydana gelmiş ve ayrıca en düşük dayanım ise % 0 polivinil alkol fiber içeren numunelerde elde edilmiştir. 20 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki artış miktarı % 37 olarak bulunmuştur. 400 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numune kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımı ise % 40 dayanım kaybetmiştir. 600 °C’de % 2

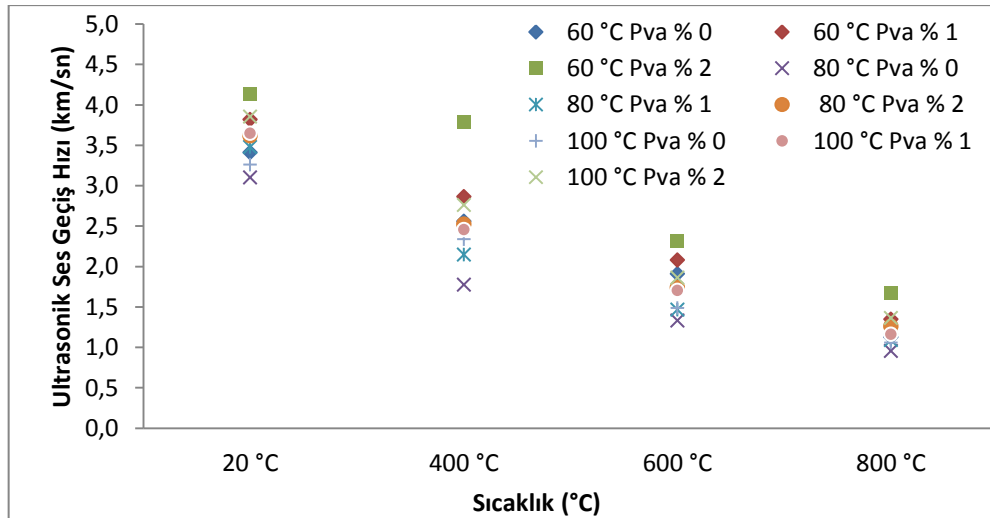
polivinil alkol fiberli numune kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki düşüş miktarı %52 ve 800 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli numune kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki düşüş miktarı %55 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.4'de 100°C'de ısıtılma tutulan ve kür süresi bittikten sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin f_s / f_r grafiği verilmiştir. 100 °C'de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli numunelerin en yüksek basınç dayanımındaki artış, 60 °C ve 80 °C'de olduğu gibi % 2 polivinil alkol fiberli numunelerde elde edilmiştir. En düşük dayanım ise % 0 polivinil alkol fiber içeren numunelerde görülmüştür. 20 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine göre (f_r) basınç dayanımındaki artış miktarı % 55 olarak bulunmuştur. 400 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımı % 36 düşüş göstermiştir. 600 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine göre (f_r) basınç dayanımındaki düşüş miktarı %43 ve 800 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli numunesinin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki düşüş miktarı %54 olarak bulunmuştur.

60°C, 80°C ve 100 °C'de ısıtılma tabi tutulan % 2 polivinil alkol fiber içeren numunelerin kontrol betonuna (f_r) göre en yüksek basınç dayanımları elde edilmiştir. Tüm serilerde 60 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli betonların en yüksek basınç dayanımlarının olduğu görülmüştür. Bu dayanımları %1 polivinil alkol fiber içeren betonlar takip etmektedir. En düşük dayanım ise % 0 polivinil alkol fiber içeren betonlarda elde edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ısıtılma işlemleri karşılaştırıldığında en iyi sonuçlar 60 °C'de elde edilmiştir [124]. Vijai ve diğerleri yaptıkları çalışmada portland çimentosunun çevreye verdiği zararlardan dolayı alternatif çimento olarak uçucu külle yapılan geopolimer çimento üretmişlerdir. Uçucu külle birlikte ince agrega, kaba agrega, sodyum silikat, sodyum hidroksit ve su kullanılarak üretilen geopolimeri ve 60 °C'de kürdeki basınç dayanımları incelenmiştir. Burada 7 günlük ve 60 °C'de kürdeki basınç dayanımı 28.31, 28 günlük 60 °C'de'ki numunenin ise 33.22 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır [125].

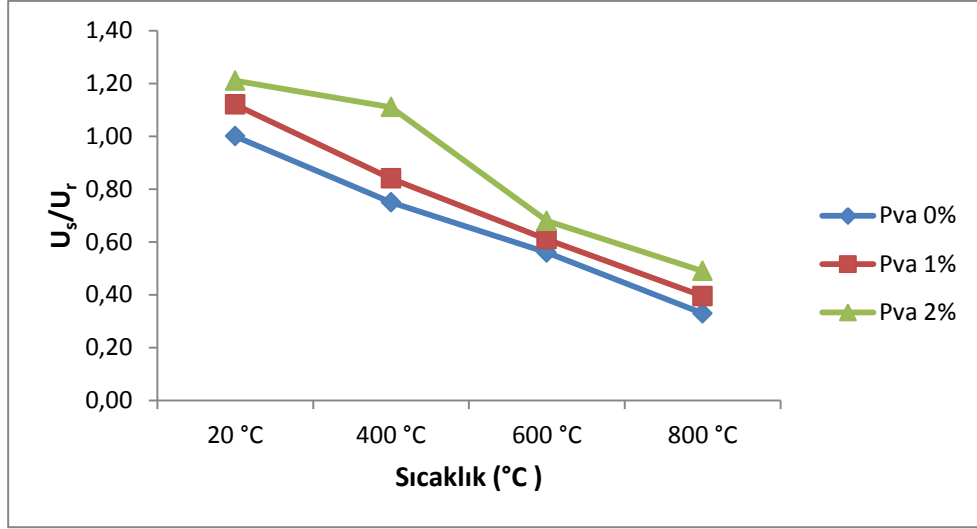
5.2. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı Sonuçları

Ultrases geçiş hızı ile betonun yoğunluğu arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan bir betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, ultrases geçiş hızı betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka şekilde ifade edilirse, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça ultrases geçiş hızı daha az olmaktadır. Bilindiği gibi betonun yoğunluğu ile basınç dayanımı arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu yüksek olan betonların basınç dayanımları da genellikle yüksek olur. Su/çimento oranı yüksek olan betonlar daha çok kapiler boşluk içerdiğinden bu betonların yoğunluğu ve basınçları da yüksek değildir[126]. Bu tez çalışmasında 100x100x100 mm boyutlarında üretilen polivinil alkol fiberli geopolimer beton numuneler 28 gün kür edildikten 20 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan bu numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri şekil 5.5’de verilmiştir.

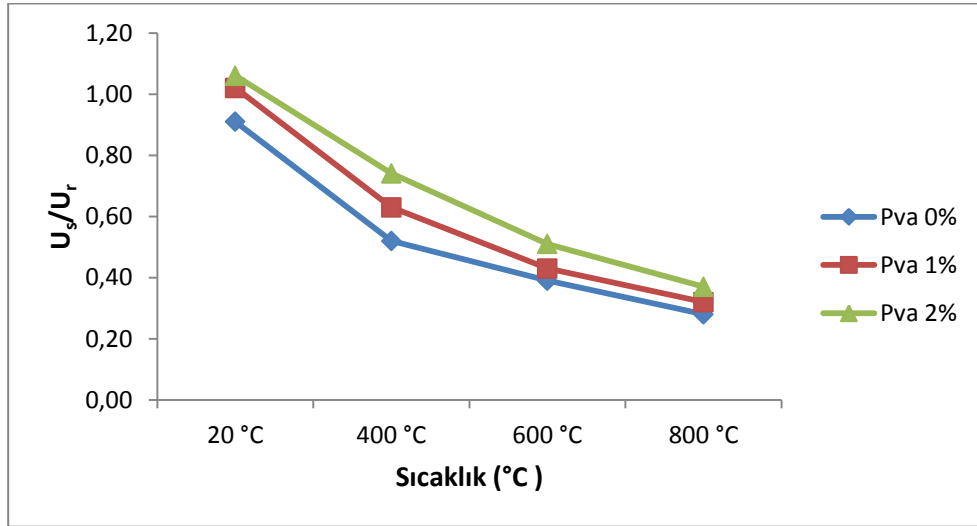


Şekil 5.5. Geopolimer çimentolu polivinil alkol fiberli numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ultrasonik ses geçiş hızı grafiği

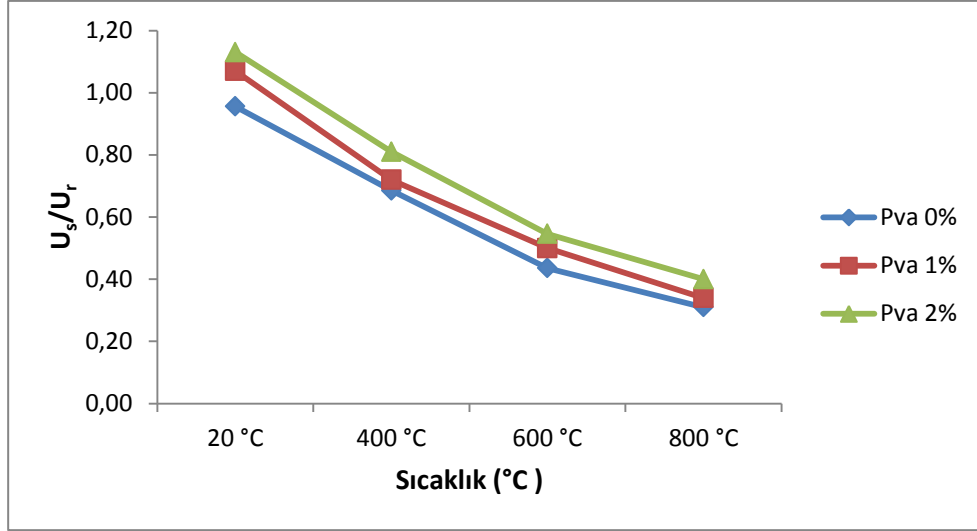
Basınç dayanımında kullanıldığı gibi ultrasonik ses geçiş hızları arasındaki değişimi belirlemek için U_s / U_r oranları belirlenmiştir. U_r 20 °C’ye maruz bırakılan 60 °C’de ısıtılma işlemi tabi tutulmuş % 0 polivinil alkol fiber içeren betonun ultrasonik ses geçiş hızı, U_s ise yüksek sıcaklığa maruz kalan diğer numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı olarak belirlenmiştir. Numunelerin U_s / U_r oranları şekil 5.6-5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.6.60 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası U_s / U_r grafiği



Şekil 5.7.80 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası U_s / U_r grafiği



Şekil 5.8.100 °C’de ısıtılma işlemine tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası U_s / U_r grafiği

Şekil 5.6’da 60°C’de tutulmuş ve belirlenen kür süresi sonunda yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin U_s / U_r grafiği verilmiştir. En yüksek ultrasonik ses geçiş hızı değeri % 2 polivinil alkol fiberli numunelerde elde edilmiştir. En düşük ultrasonik ses geçiş hızı ise % 0 polivinil alkol fiberli numunelerde görülmüştür. Şekil 5.6 incelendiğinde % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızında artış miktarı % 21 olarak bulunmuştur. 400 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki artış miktarı % 11 olarak bulunmuştur. 600 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızında %32 ve 800 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızında %51’lik düşüşler meydana gelmiştir.

Şekil 5.7’de kür süresi öncesinde 80°C’de ısıtılma işlemine tabi tutulmuş ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı grafiği verilmiştir. Şekil 5.7’de görüldüğü gibi en yüksek ultrasonik ses geçiş hızı tüm sıcaklıklarda % 2 polivinil alkol fiberli numunelerden elde edilmiştir. En düşük ultrasonik ses geçiş hızı ise % 0 polivinil alkol fiberli numunelerde elde edilmiştir. 20 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki artış miktarı % 6 olarak bulunmuştur. 400 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki değişim % 26’lık kayıp olarak görülmüştür. 600 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki düşüş ise % 49 olarak bulunmuştur. 800 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli

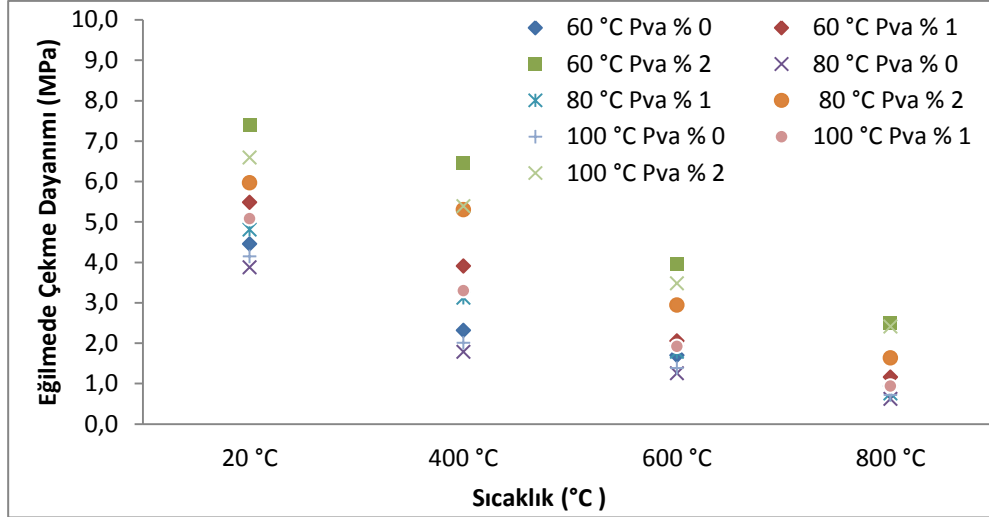
numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki düşüş miktarı ise % 63 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.8’de 100°C’de ısıtılma tabi tutulan ve kür süresi bittikten sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı grafiğı verilmiştir. 100 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli numunelerin en yüksek ultrasonik ses geçiş hızındaki artış, 60 °C ve 80 °C’de olduğu gibi % 2 polivinil alkol fiberli numunelerde elde edilmiştir. En düşük ultrasonik ses geçiş hızı değeri ise % 0 polivinil alkol fiber içeren numunelerde görülmüştür. Şekil 5.8’de 20 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki artış miktarı % 13 olarak bulunmuştur. 400 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki değışim miktarı ise % 19 düşüş olarak hesaplanmıştır. 600 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (U_r) göre ultrasonik ses geçiş hızındaki değışim miktarı ise % 45 düşüş ve 800 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine göre (U_r) ultrasonik ses geçiş hızındaki değışim ise % 60 düşüş olarak hesaplanmıştır.

60°C, 80°C ve 100 °C’de ısıtılma tabi tutulan % 2 polivinil alkol fiber içeren numunelerin ultrasonik ses geçiş hızı kontrol betonunun (U_r) ultrasonik ses geçiş hızı değerlerini geçerek en yüksek değerler elde edilmiştir. Tüm sıcaklıklarda 60 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli betonların basınç dayanımı değerlerine paralel olarak en yüksek değerler elde edilmiştir. Bu değerleri % 1 polivinil alkol fiberli betonlar takip etmiştir. En düşük ultrasonik ses geçiş hızı ise % 0 polivinil alkol fiber içeren betonlarda görülmüştür.

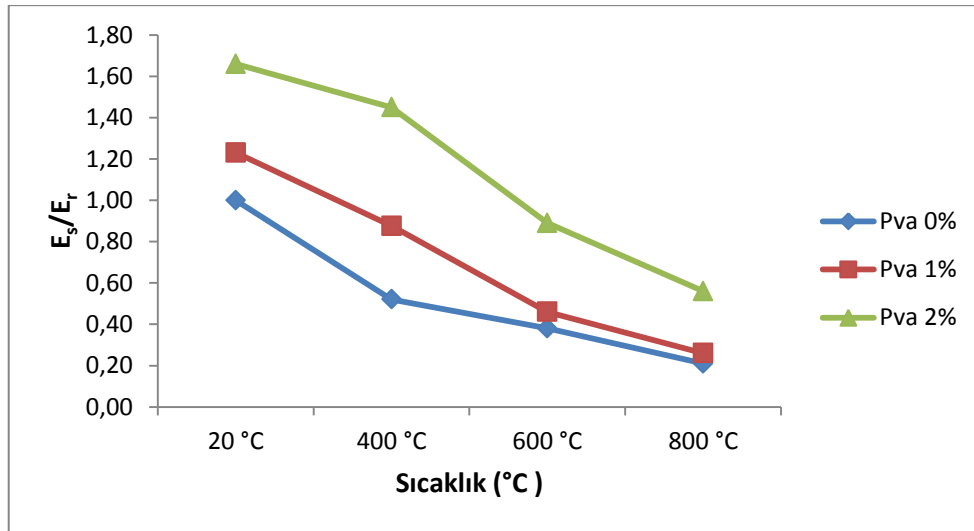
5.3. Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

Bu tez çalışmasında 60 °C, 80°C, ve 100°C’de ısıtılma tabi tutularak geopolimer betonlu kiriş numuneler üretilmiştir. Numunelerin yük taşıma kapasitesini arttırabilmek için uçucu külün % 0, % 1 ve % 2 polivinil alkol fiber kullanılmıştır. Üretilen bu numuneler 20 °C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C’deki sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Bu tez çalışmasındaki numunelerin eğilmede çekme dayanım değerleri şekil 5.9’da verilmiştir.

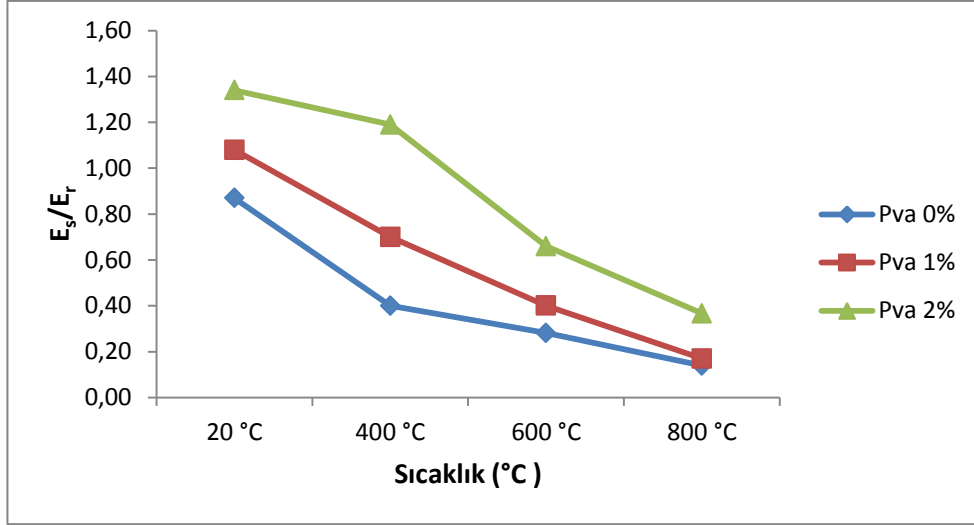


Şekil 5.9. Geopolimer çimentolu polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası eğilmede çekme dayanımı grafiği

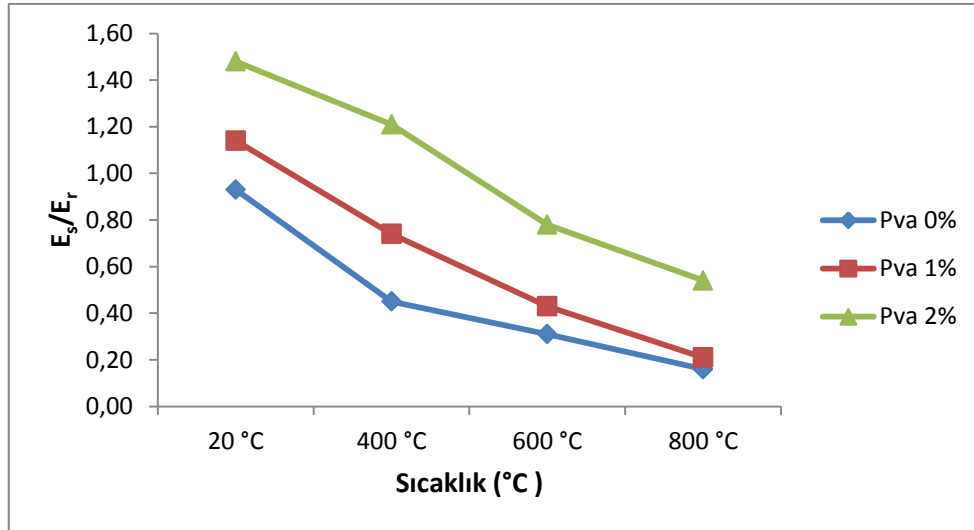
Basınç dayanımında ve ultrasonik ses geçiş hızı değerlerinde olduğu gibi bütün numunelerin birbirleriyle olan ilişkilerini görebilmek amacıyla yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış 60 °C'de kür edilen % 0 polivinil alkol fiber içeren betonun eğilmede çekme dayanımına E_r , yüksek sıcaklığa maruz kalan diğer numunelerin basınç dayanımı ise E_s olarak adlandırılmıştır. Numunelerin E_s/E_r oranları şekil 5.10-5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.10. 60 °C'de ısı işleme tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası E_s/E_r grafiği



Şekil 5.11.80 °C'de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası E_s/E_r grafiği



Şekil 5.12. 100 °C'de ısıtılma tabi tutulmuş geopolimer çimentolu ve polivinil alkol fiberli beton numunelerin yüksek sıcaklık sonrası E_s/E_r grafiği

Şekil 5.10'da 60 °C'a ısıtılma tabi tutulan ve kür süresi boyunca bekletildikten sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin eğilmede çekme dayanımı grafiği verilmiştir. 60 °C'deki tüm serilerden yüksek eğilmede çekme dayanımını % 2 polivinil alkol fiberli numunelerden elde edilmiştir. En düşük eğilmede çekme dayanımı ise % 0 polivinil alkol fiberli numunelerde bulunmuştur. 20 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı % 66 olarak hesaplanmıştır. 400 °C'de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol

numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımında % 45 oranında daha fazla eğilmede dayanım elde edilmiştir. 600°C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımında % 11’lik bir kayıp ve 800 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımında ise % 44’lük bir kayıp görülmüştür.

Şekil 5.11’de 80 °C’de ısıtılma tabi tutulan ve kür süresi bittikten sonra yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin eğilmede çekme dayanımı grafiği verilmiştir. 80 °C’de ısıtılma tabi tutulmuş en yüksek eğilmede çekme dayanımını 60 °C ve 80 °C’de olduğu gibi % 2 polivinil alkol fiberli numunelerden elde edilmiştir. En düşük eğilmede çekme dayanımı ise % 0 polivinil alkol fiber içeren numunelerde görülmüştür. 20 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı % 34 olarak bulunmuştur. 400 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı % 19 olarak elde edilmiştir. 600 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımında %34 dayanım kaybı hesaplanmıştır. 800 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımında ise % 63 dayanım kaybı meydana gelmiştir.

Şekil 5.12’de 100 °C’de etüvde bekletilen ve belirlenen kür süresinin ardından yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış numunelerin eğilmede çekme dayanımı grafiği verilmiştir. Şekil 5.12’de en yüksek eğilmede çekme dayanımı % 2 polivinil alkol fiberli numunelerde meydana gelmiştir. En düşük dayanım ise % 0 polivinil alkol fiberli numunelerde elde edilmiştir. 20 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı % 48, 400 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı ise % 21 olmuştur. 600 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımında % 22 oranında bir düşüş ve 800 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli numunenin kontrol numunesine (E_r) göre eğilmede çekme dayanımında ise % 46 oranında bir azalma görülmüştür.

60 °C’, 80 °C’ ve 100 °C’de ısıtılma tabi tutulan % 2 polivinil alkol fiber içeren numunelerin eğilmede çekme dayanımındaki değerler ve değişimler incelendiğinde; bu numunelerin eğilmede çekme dayanım değeri kontrol betonun eğilmede çekme dayanımın değerinden daha yüksek değerler elde edilmiştir. Bütün numunelerde 60 °C’de % 2 polivinil alkol fiberli betonlarda basınç dayanımı değerlerine paralel olarak en yüksek

eğilmede çekme değerleri elde edilmiştir. Bu değerleri % 1 polivinil alkol fiberli numuneler izlemiştir. En düşük değerler ise % 0 polivinil alkol fiberli numunelerden elde edilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında geopolimer çimentolu polivinil alkol fiberli betonların yüksek sıcaklığa karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Sertleşmiş beton deneyleri için 108 adet 100x100x100 mm küp numune ve 108 adet 75x75x300 mm kiriş numune üretilmiştir. Üretilen numuneler 20°C, 400°C, 600°C ve 800°C'ye maruz bırakılmışlardır. Bu tez çalışmasında aşağıdaki sonuçlar bulunmuştur:

- 60 °C, 80°C, ve 100°C'de ısıtılma tabi tutulan numunelerin basınç dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı ve eğilmede çekme dayanımları incelendiğinde en iyi sonuçlar 60 °C'de ısıtılma tabi tutulan numunelerden elde edilmiştir.
- 60 °C'de ısıtılma tabi tutulan, 20 °C'deki % 2 polivinil alkol fiberli numunelerin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki artış miktarı % 90 , ultrasonik ses geçiş hızında artış miktarı kontrol numunesine (U_r) göre % 21 ve eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı kontrol numunesine (E_r) göre % 66 olarak bulunmuştur .
- 80 °C'de ısıtılma tabi tutulan, 20 °C'deki % 2 polivinil alkol fiberli numunelerin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki artış miktarı % 37 , ultrasonik ses geçiş hızında artış miktarı kontrol numunesine (U_r) göre % 6 ve eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı kontrol numunesine (E_r) göre % 34 olarak hesaplanmıştır.
- 100 °C'de ısıtılma tabi tutulan, 20 °C'deki % 2 polivinil alkol fiberli numunelerin kontrol numunesine (f_r) göre basınç dayanımındaki artış miktarı % 55 , ultrasonik ses geçiş hızında artış miktarı kontrol numunesine (U_r) göre % 13 ve eğilmede çekme dayanımındaki artış miktarı kontrol numunesine (E_r) göre % 48 olarak görülmüştür.
- Bu çalışmada polivinil alkol fiber uçucu külün % 0 % 1 ve % 2 oranlarında kullanılmıştır. Fiber oranı arttıkça geopolimer betonun basınç dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı ve eğilmede çekme dayanımları artmıştır.
- Numunelere uygulanan sıcaklıklar arttıkça basınç dayanımı, ultrasonik ses geçiş hızı ve eğilmede çekme dayanımı çoğu numunede düşüş göstermiştir. Fakat 60 °C'de ısıtılma tabi tutulup 400 °C'de yüksek sıcaklığa maruz kalan geopolimer betonun basınç dayanımı kontrol numunesine (f_r) göre % 29, ultrasonik ses geçiş hızı kontrol numunesine (U_r) göre % 11 ve eğilmede çekme dayanımı ise kontrol numunesine (E_r) göre % 45 artış göstermiştir.

7. KAYNAKLAR

- [1]. İrem Kılıç (2013), Uçucu Kül Esaslı Geopolimerlerin Ekstraksiyonu.
- [2]. Zeybek, O., 2009. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Temmuz.
- [3]. Mehta, P.K. (2000). “Reflections on Recent Advancements in Concrete Technology” *Second International Symposium on Cement and Concrete Technology* in 2000s, September 6-10, Vol.1, s.43-57, Istanbul, 2000.
- [4]. X. Zhaohui and X. Yunping, “Hardening Mechanisms Of An Alkaline Activated Class F Fly Ash”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1245-1249, 2001.
- [5]. Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and applications* .2008 , Saint Quantin, France.
- [6]. Rangan B.V., Fly Ash-Based Geopolymer Concrete, Research Report, No.4, Engineering Faculty, Curtin University of Tech., Perth, Australia, 44s. 2008.
- [7]. Jaarsveld J.G.S., Deventer J.S.J., Effect Of The Alkali Metal Activator On The Properties Of Fly Ash Based Geopolymers, *Indian Engineering of Chemistry Research*, 38 (1999) 3932-3941.
- [8]. Zhaohui X. and Yunping X., Hardening Mechanisms Of An Alkaline Activated Class F Fly Ash, *Cement And Concrete Research*, 31 (2001) 1245-1249.
- [9]. Cioffi R, Maffucci L, and Santoro L. Optimization Of Geopolymer Synthesis By Calcination And Polycondensation Of A Kaolinitic Residue, *Resources Conservation and Recycling*, 40 (2003) 27-38.
- [10]. Topçu İ.B. ve Canbaz M., Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçlarda Donma-Çözülme, *ESOGÜMüh-Mim Fak. Dergisi*, 21 (2008) 1-16.
- [11]. Topçu İ.B. ve Toprak U., Alkalilerle Aktive Edilen Uçucu Külle Hafif Tuğla Üretilmesi, 4. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi, 12-14 Kasım 2008, İstanbul, Türkiye, 38-45.
- [12]. J.G.S. Jaarsveld, J.S.J. Deventer, “Effect Of The Alkali Metal Activator On The Properties Of Fly Ash Based Geopolymers” *Indian Engineering of Chemistry Research*, Vol. 38, No.10 , pp. 3932-3941, 1999.
- [13]. X. Zhaohui and X. Yunping, “Hardening Mechanisms Of An Alkaline Activated Class F Fly Ash”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 1245-1249, 2001.
- [14]. R. Cioffi, L. Maffucci and L. Santoro, “Optimization Of Geopolymer Synthesis By Calcination And Polycondensation Of A Kaolinitic Residue”, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 40, pp. 27-38, 2003.
- [15]. İ.B. Topçu ve M. Canbaz, “Alkali Aktive Edilmiş Yüksek Fırın Cürüflü Harçlarda Donma-Çözülme” *ESOGÜ Müh-Mim Fak. Dergisi*, Cilt 21, No. 2, ss. 1-16, 2008.

- [16]. İ.B. Topçu ve U. Toprak, “Alkalilerle Aktive Edilen Uçucu Külle Hafif Tuğla Üretilmesi”, *4. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, 12-14 Kasım 2008, İstanbul, Türkiye, ss. 38-45.
- [17]. Bilal, F., “Yangın ve Beton”. *İzolasyon Dünyası*, 60, (2006). Pp: 70-2.
- [18]. Kızılkıranat B. A., Yüzer N., Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Harcın Basınç Dayanımı - Renk Değişimi İlişkisi, *İMO Teknik Dergi*, 6, 4381-92, (2008).
- [19]. Çil, İ., Çakır, O.A., Ramyar, K., Bilgin, A., Karaduman, N., Farklı Tip Çimentoların Yüksek Sıcaklıklara Direnci, *Tübitak Proje No: MAG 106M158*, (2007).
- [20]. Saad M., Effect of Temperature on Physi-cal and Mechanical Properties of Concrete Conta-nining Silica Fume, *Cement and Concrete Rese-arch*, 26 (5), 669–5, (1996).
- [21]. Cülfik, M.S., Effect of Elevated Tempere-tures on Mchanical Properties of High Strength, (Yüksek Lisans Tezi), *Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (1993).
- [22]. Khoury G.A., Compressive Strength of Concrete at High Temperature: a Reassessment, *Magazine Concrete Research* 44, 395-06, (1992).
- [23]. Acay, E., Uçucu Kül Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonda Yüksek Sıcaklık Etkisi, (Yüksek Lisans Tezi), *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, (2010).
- [24]. Altun,F.2006.”Çelik Lifli Hafif Betonun Deneysel Araştırılması”,*PÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt.12, Sayı:3, Ss:333-339.
- [25]. Altun,F., Özcan,D.M., Vekli,M.,Karahan,O., 2004, “Çelik Lif Katk.l. C20 Betonun Mekanik Özelliklerinin Deneysel Araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt-4, Say. 1-2, Ekim, Afyon).
- [26]. Horikoshi, T., Ogawa, A., Saito, T., Hoshiro, H., Properties of PolyvinylalcoholFiber as Reinforcing Materials for Cementitious Composites, *International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Compositesin Structural Applications*, 2005,Honolulu, HI, USA.
- [27]. Uğur, A., Lif Donatılarının Yüksek Dayanımlı Betonlarda Yarma Dayanımı Basınç Dayanımı İlişkisine Etkisi, 2007, Yüksek Lisans Tezi, *Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- [28]. Boğazkesen, K.K., Pva Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, 2011, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul*.
- [29]. Maraş, M. M., 2013. Elazığ Ferrokrom Cürufundan Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Sülfat Direncinin Araştırılması, *Fen Bilimleri Ensititüsü, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Malatya*.

- [30]. Kantarcı, F., 2013. Elazığ Ferrookrom Cürufundan Alkali Aktivasyon Metoduyla Üretilen Geopolimer Çimentolu Betonların Yangın Dayanımının Araştırılması, Fen bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi.
- [31]. Rahier, H., Van Mele, B., Biesemans, M., Wastiels, J., Wu, X., 1996. Low-Temperature Synthesized Aluminosilicate Glasses.1. Low-Temperature Reaction Stoichiometry And Structure Of A Model Compound. Journal of Materials Science 31, 71–79.
- [32]. Palomo A, De La Fuente JIL (2003) Cem Conc Res 33:281
- [33]. Mallicoat S, Sarin P, Kriven WM (2005) Ceram Eng Sci Proc 26:37
- [34]. J. Davidovits, “30 Years of Successes and Failures in Geopolymer Applications. Market Trends and Potential Breakthroughs” *Geopolymer 2002 Conference*, October 2002, Melbourne, Australia, Proceedings, pp. 28-29.
- [35]. Bao Y, Grutzeck MW, Jantzen CM (2005) J Am Ceram Soc 88:3287
- [36]. Bakharev T., Geopolymeric Materials Prepared Usin F Fly Ash And Elevated Temperature Curing, Cem and Conc. Research, 36 (2006) 1134-1147.
- [37]. Davidovits, J., *Geopolymer Chemistry and applications* .2008 , Saint Quantin, France.
- [38]. T.W. Cheng, J.P. Chiu, 2003. Fire-Resistant Geopolymer Produced By Granulated Blast Furnace Slag, 205-120.
- [39]. M Olivia, H Nikraz, 2012. properties Of Fly Ash Geopolymer Concrete Designed By Taguchi Method Materials & Design 36, 191-198.
- [40]. İ.B. Topçu ve U. Toprak, “Alkalilerle Aktive Edilen Uçucu Külle Hafif Tuğla Üretilmesi”, *4. Ulusal Yapı Malzemesi Kongresi ve Sergisi*, 12-14 Kasım 2008, İstanbul, Türkiye, ss. 38-45.
- [41]. Ravi Kumar et al. Regarding "Colorectal Neoplasia With FDG-PET/CT Journal of Gastroenterology 02/2012; 47(2):127-35.
- [42]. Glukhovskiy VD (1959) Soil silicates, Gosstroyizdat, Kiev, 154pp
- [43]. Torgal F. P., Gomes J. G. Jalali S., 2008. Alkali-Activated Binders; A Review Part 1. Historical Background, Terminology, Reaction Mechanisms And Hydration Products, *Constructions And Building Materials*, 22, 1305-1314
- [44]. Comrie D.C., Paterson J.H., Ritcey D.J., 1988 Applications Of Geopolymer Technology To Waste Stabilization, In *Proceedings Geopolymer 88* eds: j Davidovits And j Orlinski, Compiègne, France, 107-24
- [45]. Zeybek O., 2009. Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Tuğla Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [46]. Davidovits, J., 1994. Properties Of Geopolymer Cements, Published In *Proceedings, First International Conference On Alkaline Cements And Concrete*, Scientific Research Institute On Binders And Materials, Kiev State Technical University, Kiev, Ukraine, 131-149

- [47]. Xu H., Van Deventer J.S.J., 2002. Geopolymerisation Of Multiple Minerals, *Minerals Engineering*,15(12),1131-1139.
- [48]. Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T., 1999. Alkali-Activated Fly Ashes: A Cement For The Future Cement And Concrete Research, 29,1323-1329.
- [49]. Roy D.M., 1999. Alkali Activated Cement Opportunities And Challenges, *Cement And Concrete Research*, Volume, 29, 2, 249-254.
- [50]. Davidovits, J., 1999. Chemistry Of Geopolymeric Systems, Terminology Geopolymer 99 International Conference, France, pp:9-40
- [51]. Panagiotopoulou C.H. Kontori E., Perraki T.H., Kakali G., 2007, Dissolution Of Alumino Silicate Minerals And By Products In Alkaline Media, *Journal Of Materials Science*, 42, 2967-2973
- [52]. Kocataşkın, F., “Yeni Gelişen Beton Malzemeleri”, İleri Beton Teknolojisi Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi, 1987, İstanbul.
- [53]. Sümer, M., “Uçucu Kül Atıklarının Beton Üretiminde Değerlendirilmesi”, I. Ulusal İnşaat & Çevre Sempozyumu, Salihli, Bildiriler Kitabı, ss. 179-185, 1994.
- [54]. Li, B., Liang, W. and He, Z., “Study on High-Strength Composite Portland Cement with a Larger Amount of Industrial Wastes”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1341-1344, 2002.
- [55]. Naik, T.R., Singh, S.S. and Ramme B.W. “Effect of Source of Fly Ash on Abrasion Resistance of Concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 417-426, September-October 2002.
- [56]. Fu, X., Wang, Z., Tao, W., Yang, C., Hou, W., Dong, Y. and Wu, X., “Studies on Blended Cement with Large Amount of Fly Ash”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1153-1159, 2002.
- [57]. Temiz, H. ve Yeğınobalı, A., “UK ve SD Katkılı Çimento Hamur ve Harçlarının Bazı Özellikleri”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp.*, Bildiri Kitabı,, ss. 213-227, 1995, Ankara.
- [58]. Tokyay, M. Ve Arıöz, Ö., “Uçucu Kül-Desülfürizasyon Alçısı Esaslı Tuğlalar Hakkında Deneysel Bir Çalışma”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp. 3*, Bildiri Kitabı, ss. 171-186, 1997, Eskişehir.
- [59]. Koral, S. ve Özkul, H., “Endüstriyel Atıklardan Desülfojips ve Uçucu Külün Bağlayıcı Malzeme Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması”, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Semp. 3*, Bildiri Kitabı, ss. 197-208, 1997, Eskişehir.
- [60]. Yeğınobalı, A., 2003, Silis Dumanı Ve Çimento İle Betonda Kullanımı, TÇMB Yayını, No. Y01/01, 64 s.

- [61]. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, N. ve Yerlikaya, M., 2004, Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler, Beton 2004 Hazır Beton Kongresi, 24-57.
- [62]. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2010.
- [63]. Yeğinobalı, A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, TÇMB/ARGE/Y01.01, Ankara, 2002.
- [64]. Yüzer, N., Aköz, F., Kızılkant, A. B., "Yüksek Dayanımlı Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklık Etkisi" Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongre, 495-497, İstanbul, 2004.
- [65]. Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. ve Wong, Y.L., "Comparison of the Strength and Durability Performance of Normal-and High-Strength Pozzolanic Concretes at Elevated Temperatures", Cement and Concrete Research, No: 31, pp.1291-1300, 2001.
- [66]. Erdoğan, T.Y., "Atık Malzemelerin İnşaat Sektöründe Kullanımı-Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cüruf ve Kullanımı", *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara,1995.
- [67]. Erdemir Ereğli Demir Çelik Fabrikası, Ar-Ge Müdürlüğü, 2008.
- [68]. Atanur, A., *Yol Yapımında Yüksek Fırın Cürufu* , Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara 1983.
- [69]. Bougara A., Lynsdale C., Ezziene K., 2009, Activation Of Algerian Slag İn Mortars, Construcion And Building Materials, 23, 542-547
- [70]. Li Z., Ding Z., Zhang Y., 2004. Development Of Sustainable Cementitious Materials, Proceedings of International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, China, 55-76
- [71]. Sakulich A., R., Anderson E., Schauer C., Barsoum M. W., 2009 Mechanical And Microstructural Characterization Of An Alkali- Activated Slag/Limestone Fine Aggregate Concrete, Construcion And Building Materials.
- [72]. Wang j. W. And cheng t.w., 2003, Production Geopolymers Materials By Coal Fly Ash, Proceedings Of The 7th International Symposium On East Asian Resources Recycling Technology, Taiwan, pp: 263-266
- [73]. Wogh, A.S., 2011 Phosphate Geopolymers, Developments İn Stragetic Materials And Computational Design 2, vol. 32, naperville, 91-103
- [74]. Barsoum M. W., Ganguly A., Hug G., 2006, Mitrostructural Evidence Of Reconstituted Lime Stone Blocks İn The Great Pyramids Of Egypt, j. American Ceramic Society, 89 12, 3788-3796

- [75]. Tolğay, E. Yaşar, Y. Erdoğan, Nevşehir Pomzasının Agregat Olarak Betonda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, 5. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14 Mayıs 2004, İzmir, Türkiye
- [76]. Allahverdi A., Mehrpour K, Kani E. N., Taftan Pozzolan- Based Geopolymer Cement, Just International Journal Of Engineering Science, 19, 1-5, 2008
- [77]. Okucu, A., (2004). Zeolitik Tüflerin Çimento Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Beton Kongresi.
- [78]. Breck, D.W., (1974). Zeolite Molecular Sieve; Structure, Chemistry and Use. John Wiley and Sons, New York, pp:771.
- [79]. Demirel, H., Aksank, B. ve Öztürk. H., (1971). Zeolitin Çimento Üretiminde Kullanım Olanakları, Türkiye Maden Bil. ve Teknik II, Ankara.
- [80]. Mol, F., (2001). Değişik Oranlarda Pomza-Zeolit Karışımlarının Kimi Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri, Uludağ Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [81]. Sarıkaya, H., (2006). Zeolit Katkılı Betonların Fiziksel ve Mekanik özelliklerinin Araştırılması, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- [82]. Sarıkaya, H., Şengün, N., Başyigit, C., Altındağ, R., Zeolit Katkılı Betonların Elastisite Modülünün Tahmin Edilmesi, e-Journal of New World Sciences Academy 2009, Volume: 4, Number: 4, Article Number: 1A0046
- [83]. Villa c., Pecina E.T., Torres R., Gomez L., Geopolymer Synthesis Using Alkaline Activation Of Natural Zeolite, Construction And Building Materials, 24, 2087-2090, 2010.
- [84]. Arıöz, Ö., Tuncan, M., Tuncan. A., Kavas, T., 2009. Uçucu kül esaslı geopolimer tuğla üretimi, Tübitak projesi, Anadolu Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Eskişehir.
- [85]. Barnes P. Structure and performance of cements. Chapter 15, metakaolin as a pozzolanic addition to concrete. USA, J. 2001
- [86]. Sun SH, Ma JT, Pang XM, Sun YT and Wang SL. Sulfur reduction additive prepared from acid-modified kaolin. Bulletin of the Catalysis Society of India 2005; 4: 72–78.
- [87]. Souza PSL, Molin DCCD. Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity. Cement and Concrete Research 2005; 35(10): 1993-1998.
- [88]. Akçaözoglu, K., Çiftlikli, M., Özcan, F., Özer, E., Niğde Yöresi Fesleğen Yayla Kaolin Kilinden Metakaolin üretilirliğinin Araştırılması, Niğde Üniversitesi.
- [89]. Yao X., Zhang Z., Zhu H., Chen Y., 2009. Geopolymerization Process of Alkali-Metakaolinite Characterized By Isothermal Calorimetry, Thermochimica Acta, 493, 49-54.
- [90]. Türköl, S., Felekoğlu, B., 2004. Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Taze Ve Sertleşmiş Betonun Bazı Özellikleri Üzerine Etkileri, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, İzmir, Ocak 2004, 6 (1), ss. 77-89.

- [91]. Pekmezci, Y. B., Atahan, N. H., 2013. Kimyasal Ve Nano Katkılar: Betonda Kullanımı Ve Beton Performansına Etkileri, Hazır Beton 2013 Kongresi.
- [92]. Serap Alp, 2004. İstanbul Ticaret Odası, Kum, Kıl Ve Taş Ocakları Sektör Raporu.
- [93]. TS EN 706 Kitaplığı, TSE, Ankara.
- [94]. Erdoğan, T.Y., Beton, 2003, ODTU Geliştirme Vakfı Yayın ve İletişim Şti., Ankara, Pp: 130-160.
- [95]. Uyan, M, Akışkanlaştırıcı Katkıların Etkinliği 4. Ulusal Beton Kongresi İstanbul. 30 Ekim- 1 Kasım 1996 S.13 -23.
- [96]. TS EN 1008, 2003. Beton Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki işlemlerden Geri Kazanılan Su da Dahil Olmak Üzere Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, TSE, Ankara.
- [97]. <http://www.turkcebilgi.com/ansiklopedi/silikat>
- [98]. <http://tr.wikipedia.org>
- [99]. <http://www.notdenizi.com/kalsiyum-hidroksit-51526/>
- [100]. Topçu İ. B., Toprak, M. U., 2009. Alkalilerle Aktive Edilen Taban Küllü Hafif Harç Üretimi, Journal Engineering And Architecture Faculty Of Eskişehir Osmangazi University, Vol. XXII, No:2 153-164.
- [101]. McNulty E., 2009. Geopolymers: An Enviromental Alternative To Carbon Dioxide Producing Ordinary Portland Cement, Depermant Of Chemisrty, The Catholic University Of America.
- [102]. Sarker P. K. And Meillon T., 2007 Geopolymer Concrete After Exposure To High Temperature Heat Recnt Developments İn Structural Engineering, Mechanics And Computation, Zingoni A., Millpress, Rotterdam, the Netherlands, 1566-1571
- [103]. Elimbi A., Tchakoute H. K., Njopwouo D., 2011 Effects Of Calcination Temperature Of Kaolinite Clays On The Properties Of Geopolymer Cements, Construcsion And Buildings Materials, 25, 2805-2812.
- [104]. Rashad A.M., Zeedan S.R., 2011. The Effect Of Activator Concentration On The Residual Strength Of Alkali-Activated Fly Ash Pastes Subjected To Thermal Load, Constuction and Building Materials, 25, 3098-3107.
- [105]. Kartalkanat A., Çimento Fabrikalarının Çevreye Muhtemel Etkileri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi.<http://www.ovamadokunma.com>
- [106]. Hanzileck T., Steinerova M., Straka P., Perna I., Siegl P., Svarcova T., 2009. Reinforcement of the Terracotta Sculpture by Geopolymer Composite, Materials and Design, 30, 3229-3234.

- [107]. Shilang, X., and Qianghua, L., An Experimental Study on Bending Behaviour of Cementitious Composites Reinforced in Combination with Carbon Textile and Short-Cut PVA Fiber, Department of Civil Engineering, Dailan University of Technology, China.
- [108]. Arısoy, B., Lifli Hafif Betonların Optimum Karışım Tasarımı, Deprem Sempozyumu, Kocaeli, 23-25 Mart 2005, s.912-916
- [109]. Soroushian, P. And Bayasi, Z., 1991. Fiber-Type Effects on the Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials Journal*, V.88, No.2, March/April.
- [110]. Bartos, P., 1992. French Concrete-Properties and Tests, *Elsevier Science Publishers B.V.*, Amsterdam.
- [111]. TS 10513, 1992. Beton Takviyesinde Kullanılan Çelik Teller, Türk Standartları
- [112]. Balaguru, P. B. and Shah, S. P., Fiber-Reinforced Cement Composites, 1992, McGraw-Hill, Inc.
- [113]. Ersoy, H. Y., 2001. Kompozit Mazleme, Literatür Yayınları: 66, İstanbul, Türkiye.
- [114]. Kılınçarslan, Ş., Başıyigit, C. ve Uzun, İ. , 2010. Ağır Betonların Sülfat Etkisinde Mekanik Özellikleri, Süleyman Demirel Üniversitesi, SDU International Technologic Sciences.
- [115]. Kurt, G., Lif İçeriği ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri, 2006, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü.Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [116]. Url-1 <http://www.archprecast.org/documents/GFRC_handbook.pdf>, alındığı tarih 15.05.2010
- [117]. Bogazkesen, K. K.(2011). PVA Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (2011).
- [118]. TS EN 1008, 2003. Beton Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki işlemlerden Geri Kazanılan Su da Dahil Olmak Üzere Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, TSE, Ankara.
- [119]. TS EN 12390-3, 2003, *Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [120]. Erdoğan, T. Y., 2003, *Beton*, ODTÜ Geliştirme vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- [121]. ASTM C 597, 1994, *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete*, Annual Book of ASTM Standards.
- [122]. H, Tanyıldızı, A, Coşkun., 2007, *Hafif Betonun Basınç Dayanımı ve Yüzey Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi*, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları.
- [123]. TS EN 12390-5, 2003. Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinde Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

- [124]. Yaopeng Wua, Bo Wua, 2014. Residual Compressive Strength And Freeze–Thaw Resistance Of Ordinary Concrete After High Temperature, *Construction and Building Materials* 54, 596–604.
- [125]. Vijai K., Kumutha R., Vishnuram B. G., 2010, Effect Of Types Of Curing On Strength Of Geopoymer Concrete, *International Journal Of The Physical Sciences*, vol:5 9, 1419-1423.
- [126]. Erdoğan, T.Y., Beton, 2003, ODTU Geliştirme Vakfı Yayın ve İletişim Şti., Ankara, Pp: 130-160.

8. ÖZGEÇMİŞ

Yavuz YONAR 1987 Elazığ doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamlamıştır. 2006-2010 yılları arasında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi, Yapı Öğretmenliği bölümünden mezun olmuştur. Şuan Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaktadır.

Yavuz YONAR
yyonar@gmail.com